

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО РАДИОТЕХНИКИ,  
ЭЛЕКТРОНИКИ И СВЯЗИ им. А.С. ПОПОВА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ – 2020**

*Сборник материалов XXVI Международной  
научно-технической конференции*

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексева, 2020

Нижний Новгород, 2020

**УДК 621:681**  
**ББК 32.97**

**Информационные системы и технологии - 2020:** [Электронный ресурс]: сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции – Электрон. дан. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 1 электрон. диск (CD-ROM): зв., цв., 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486; ОЗУ 8 Мб.; операц/ система Windows 95; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – 200 экз.

В сборнике представлены материалы докладов XXVI Международной научно-технической конференции, проведенной 24, 27, 28 апреля 2020 г. дирекцией Института радиоэлектроники и информационных технологий при поддержке, оказанной ректоратом НГТУ им. Р.Е. Алексеева с грантовым финансированием РФФИ в рамках проекта №20-07-20038.

Конференция проведена в режиме дистанционного доступа в формате вебинара на специализированной электронной платформе в сети Интернет.

Публикуемые материалы представляют тематику, круг научных интересов и состояние исследований представителей научных и высших учебных заведений Белоруссии, Украины и 21 города России - преподавателей, научных сотрудников, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов - участников НИРС, а также сотрудников МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, МГТУ «СТАНКИН», Высшей школы экономики, Владимирского государственного университета, Национального исследовательского Томского государственного политехнического университета, Орловского государственного университета, Пензенского государственного университета, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Волжского государственного университета водного транспорта, Волго-Вятского филиала МТУСИ; представителей более 25 предприятий и НИИ: ИПУ РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИПФ РАН, ИФМ РАН, НИИИС им. Ю.Е. Седакова, НИФТИ, НПП «По-лет», АПЗ им. П.И. Пландина, АПКБ и других организаций.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта №20-07-20038.*

#### **Организационный комитет:**

А.В. Мякинков (председатель), В.П. Хранилов (зам.председателя), А.А. Куркин, Н.Ю. Бабанов, В.Г. Баранов, О.Г. Берестнева, Д.В. Жевнерчук, В.Ю. Карпычев, В.В. Кондратьев, В.Р. Милов, Д.А. Ляхманов, С.Л. Моругин, А.С. Раевский, А.Г. Рындык, Э.С. Соколова, Ю.М. Туляков, А.Д. Филинских, В.Л. Ягодкин

Редактор О.В. Пугина

Электронное издание подготовлено ЦДОТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, компьютерная верстка С.А. Зубкова

**ISBN 978-5-502-01322-2**

Адрес издающей организации:

НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020



## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пленарный доклад</i> .....	4
<i>Секция 1. Электронные сети и телекоммуникации</i> .....	10
<i>Секция 2. Информационное обеспечение систем автоматизации промышленных объектов</i> .....	240
<i>Секция 3. Информационные технологии (автоматизация проектирования)</i> .....	344
<i>Секция 4. Информационная безопасность систем и сетей</i> .....	448
<i>Секция 5. Техническая кибернетика</i> .....	656
5.1. Системы обработки информации .....	656
5.2. Интеллектуальные системы управления .....	743
5.3. Информационное моделирование когнитивных процессов .....	906
<i>Секция 6. Математическое моделирование геофизических процессов</i> .....	1096
<i>Секция 7. Радиотехнические системы и устройства</i> .....	1215
<i>Секция 8. Проектирование радиоэлектронных устройств ВЧ- и СВЧ- диапазонов</i> ..	1372

В.Г. Баранов, В.П. Хранилов

## РАДИОФАК НА ЗАЩИТЕ ОТЕЧЕСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В год 75-летия Победы СССР над фашистской Германией отмечается вклад в Победу преподавателей и выпускников радиотехнического факультета ГИИ-ГПИ-НГТУ. В годы войны он стал «кузницей кадров» для радиотехнической промышленности города Горького, который может быть без преувеличения назван Городом Трудовой Доблести. Поименно названы выдающиеся выпускники, внесшие значительный вклад в нашу Победу. Накопленный индустриальный опыт стал надежной стартовой позицией для послевоенного развития оборонно-промышленного предприятий радиотехнического профиля города Горького.

**Ключевые слова:** 75-летие Победы в Великой Отечественной войне, город Горький, Горьковский индустриальный институт, горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова, горьковский телефонный завод им. В.И. Ленина, горьковский завод им. М.В. Фрунзе.

Этот год останется особенно памятным: наша страна отметит 75-летие Победы над фашистской Германией в Великой отечественной войне 1941 – 1945 гг.

Подготовка к празднованию протекает в жестких, даже жестоких спорах, дискуссиях, заявлениях, носящих часто абсурдный, провокационный характер, опровергающий реальные документированные и ранее признанные мировым сообществом (Нюрнбергский процесс) факты. Не любят Россию за нашим кордоном, что было почти всегда, не любят те, кто раньше льстил нашей стране, кто заискивал перед ней. К тому же празднование годовщины победы омрачено глобальной бедой – эпидемией COVID-19, борьба с которым требует большого напряжения духовных и материальных сил всей страны.

Однако следует откровенно сказать: «Время было другое, и другая была страна». Сейчас даже в нашей стране приходится слышать, читать заявления, в которых до хрипоты «уточняется», кто с кем воевал, за что погибли миллионы наших соотечественников на поле брани, у станков, на хлебных и картофельных полях. Да, победа была за нами, за нашей страной. Страна же действительно была другая – СССР – Союз Советских Социалистических республик. Лидер страны, Верховный главнокомандующий – Иосиф Виссарионович Сталин – был признанным лидером антигитлеровской коалиции, именно к нему приезжали Ф. Рузвельт, У. Черчилль, его боготворил Ш. де Голль. Сам Сталин же посетил только Германию, посмотреть на руины павшего Берлина.

Победа была обеспечена единым народом, отстаивающим свою независимость, свою землю, свою культуру, под жесткой и четкой организацией борьбы на фронтах и в тылу руководством страны и командованием армии под лозунгами «Всё для фронта, всё для Победы» и «Враг будет разбит. Победа будет за нами».

Буквально в первые дни войны (24 – 26 июня) в Горьком были сформированы несколько дивизий и с площади Минина и Пожарского отправлены на фронт, а крупнейшие предприятия Горького по мобилизационным планам немедленно приступали к выпуску новой воен-

ной техники: танков, пушек, самолетов, средств связи. Горький начал жить как арсенал армии и военно-морского флота.

Построенные в годы индустриализации ГАЗ, авиационный и машиностроительный заводы, завод «Красное Сормово», модернизированный за короткое время телефонный завод, не подлежащие эвакуации, взяли на себя тяжелое бремя по обеспечению армии и флота вооружением. Руководство страны в полной мере понимало значение г. Горького, это нашло отражение даже в тоне обращения И.В. Сталина к руководителям заводов. Он *просил* увеличить выпуск техники на единицы штук, давая понять руководителям и рабочим, что просьба – высшая форма приказа (воспоминания Е.И. Рубинчика и А.С. Еляна). В ответ на «просьбы» труженики Горького выкладывались до потери сознания, работая по 10 – 14 часов: «Все для фронта, всё для Победы».

Отмечая 75-ю годовщину Победы СССР над фашистской Германией, нам, сотрудникам и студентам института необходимо знать и свято помнить о вкладе в Победу преподавателей и выпускников факультета.

Остановимся на работе в 30-40-х годах близких нам по духу и профессиональной направленности предприятий Радиопрома, Минпромсвязи и Минсредмаша.

Ведущим предприятием радиопрома стал в 1936 г. телефонный завод им. Ленина, куда решением правительства была передана разработка и производство военных радиостанций, а кадровое обеспечение осуществлялось за счет выпускников РТФ (открыт в 1936 г.), специалистов из Ленинграда и ЦВИРЛ. Подразделения разработчиков возглавили выпускники факультета П.Н. Гуров, В.А. Авдентов, Б.Д. Увяткин, Е.А. Меркин, Л. И. Панкратов, И.А. Щербаковский (специалист из Ленинграда). Завод в условиях военного времени ежегодно выпускал до 7000 радиостанций, в том числе 6000 типа РСБ (радиостанция скоростного бомбардировщика). РСБ «Двина» стала основной для целого поколения РС и по своим показателям, по признанию немецких специалистов, была лучше РС, устанавливаемых на самолетах «Юнкерс». Всего предприятия Горького выпустили 50402 РС 50 типов, 112000 комплектов переговорных устройств, что составило 60 % радиосредств связи, поставленных в годы войны армии и флоту промышленностью страны. За работы по обеспечению армии средствами связи 13 разработчиков были удостоены Сталинской премии, а пятеро из них – дважды. Особенно успешными были выпускники факультета начала 40-х годов (лауреаты Сталинских премий Увяткин Б.Д., Меркин Е.А., Панкратов Л.И., Покровский А. Г. (дважды), Бочкарев Б.А., Бочкарева Е.А., Курячев В.П., Мальцев А.А.).

Показательна судьба Бориса Дмитриевича Увяткина. Выпускник 1940 г. – инженер, гл. конструктор КБ завода им. Ленина, после передачи в 1951 г. разработок РС на другие заводы, гл. инженер Тамбовского завода «Ревтруд», гл. инженер Красноярского радиозавода, гл. инженер радиотехнического управления Горьковского СНХ, директор Правдинского завода РРА, начальник СКБ ГЗАС им. Попова, гл. инженер завода в Китае.

Наряду с проектированием и производством радиосредств на заводе была организована по приказу И.В. Сталина от 22 июля 1941 г. (!) подготовка и переподготовка комсостава по эксплуатации радиосредств в школе радиоспециалистов. ГКО извлек уроки из трагедии июня 1941 г. на Западном фронте, когда во многом из-за отсутствия радиосвязи было потеряно управление войсками, и армии фронта потерпели тяжелое поражение. И.В. Сталин лично контролировал обеспечение войск средствами связи.

Завод им. Ленина в числе первых в стране был награжден в 1944 г. орденом Ленина, заводу на вечное хранение было передано Почётное Знамя ГКО.

После окончания войны наступили не менее напряженные времена. Руководству страны были известны разработанные планы атомных бомбардировок по меньшей мере 20 круп-

нейших городов СССР. Необходимо было опять же в кратчайшие сроки разработать системы обнаружения оружия предполагаемых противников, а также разработать и произвести свои атомное оружие, и средства его доставки.

По Постановлениям Совета народных комиссаров СССР за подписями И.В. Сталина Горьковскому заводу № 197 им. Ленина поручена разработка на базе радиолокатора ПЗ («Пегмалит») новой подвижной станции П-3А (Печора) и изготовление к 1947 г. 3-х экземпляров (так начал выполняться утверждённый ГКО трёхлетний план развития радиолокации на 1946 – 48 гг., включавший в себя научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки). В 1947 г. на заводе было создано СКБ по разработке РЛС. Центром разработки стала лаборатория, возглавляемая выпускником радиофака Е.В. Бухваловым, ставшим впоследствии одним из главных конструкторов проектирования и производства РЛС на заводе, КБ.

После техникума Евгений Васильевич Бухвалов окончил в 1945 факультет и благодаря своему высокому интеллекту, выдающимся организаторским способностям вскоре стал главным конструктором РЛС П-3А (Печора), РЛС П-8, дважды лауреатом Сталинской премии, в течение 29 лет был главным инженером КБ ГТЗ им. Ленина, поддерживал постоянные связи с ФРК.

В течение 24 лет вместе с Е.В. Бухваловым КБ возглавлял выпускник факультета, лауреат Государственной премии Г.К. Киселев.

В КБ завода им. Ленина сформировалась из выпускников радиофака когорта выдающихся конструкторов радиолокационной техники: Ю.Н. Соколов – лауреат Ленинской и Государственной премий, участник войны, награжден орденом «Красной звезды»; лауреаты Ленинской премии В.А. Карпов, А.М. Клячев, К.И. Ложкарев, И.В. Махин, Лауреат Государственной премии директор НИИРТа В.А. Проскурин.

В последние десятилетия в НИИРТе сформировалась новая когорта конструкторов радиолокационной техники.

Под руководством главного конструктора А.А. Зачепиского (выпускника ННГУ и ученика Д.В. Агеева) была разработана и освоена в серийном производстве РЛС 55 Ж6 с дальностью и высотой обнаружения объектов соответственно 600 и 75 км. Под руководством выпускника факультета И.Г. Крылова была разработана 2-х координатная цифровая РЛС дежурного режима с автоматизированной системой диагностики. Станция освоена в серийном производстве. За особые заслуги в развитии отечественной радиолокации А.А. Зачепиский и И. Г. Крылов были удостоены персональных Государственных премий, а Александр Аронович Зачепиский получил звание Генерального конструктора радиолокации.

Последние 10 лет серийно выпускается РЛС 55Ж6У (главный конструктор – выпускник радиофака, лауреат Государственной премии А.Д. Бомштейн).

Под руководством главного конструктора направления Н.Н. Махровой и главного конструктора В.А. Антонова (выпускники факультета) был разработан радиокomплекс на базе вертолета радиолокационного дозора. В настоящее время ведутся работы (гл. конструктор А.Б. Бляхман) над комплексом обнаружения низколетящих целей методом «локации на просвет», «Барьер». В этой работе активно участвуют профессора ИРИТ А.Г. Рындык и А.В. Мякинчиков.

В 60-х годах на КБ Правдинского завода РРА была разработана РЛС дежурного наблюдения (зам. гл. конструктора – выпускник факультета Ю.В. Пантелеев). Разработка была удостоена Государственной премии СССР.

За заслуги в области радиолокации Государственной премии был удостоен профессор кафедр радиосистем Ю.И. Пахомов, ранее работавший в КБ завода им. Ленина.

Работы по развитию теории и техники радиолокации успешно развиваются сейчас в НИ-ИРТе и на кафедре ИРС ИРИТ НГТУ.

До окончания войны было ещё далеко, когда стало известно о разработке в США атомного оружия и средств его доставки. Руководство страны приняло решение о работе по проекту «Уран», выделяя на его реализацию огромные финансовые, материальные и другие ресурсы. В Горьком, «закрытом» городе, имевшем опыт разработок радиотехнических изделий связи, навигации, научные школы А.А. Андропова, Г.С. Горелика, М.Т. Греховой, В.И. Гапонова, радиофак ГПИ и образованный в 1945 г. радиофизический факультет ННГУ, способные решить задачи кадрового обеспечения исследований и производства, создавался научный центр решения радиотехнических задач проекта «Уран».

В ТТЗ на атомную бомбу, выданном 01.07.1946, предписывалось создание высотного взрывателя бомбы – радиодатчика. Разработка была поручена гл. инженеру завода Фрунзе А.П. Скибарко (преподававшему на радиофаке ГИИ и имевшему опыт создания самолетного высотомера). В 1948 году опытный образец РД-1 был готов и принят для комплектации первой атомной бомбы РДС-1. В 1953 г. коллектив под руководством Главного конструктора В.П. Курячьева (выпускник 1940 г.) создал радиодатчик РД-2 для первой советской водородной бомбы. Обе разработки были отмечены Сталинскими премиями. Под руководством В.П. Курячьева был разработан и передан в серийное производство РД «Ласточка» для первой тактической ракеты с ядерным зарядом «Луна». В дальнейшем эти работы были развиты на новых принципах схемных и технологических решений. В 1965 г. цикл работ завершился созданием РД «Колибри» (автор и ГК – С.В. Катин – выпускник радиофака, до сих пор тесно сотрудничающий с ИРИТ). С.В. Катин был удостоен Государственной премии и в 30 лет стал заместителем ГК предприятия.

С 1960-х годов НИИИС наряду с разработкой РД начал заниматься созданием радиотелеметрических систем специального контроля в процессе летных испытаний (главный конструктор – Ю.Е. Седаков). Государственной премии был удостоен наш выпускник Н.И. Дмитриев.

НИИИС им. Ю.Е. Седакова становится ведущим центром разработки и производства радиоэлектронных средств Минсредмаша (ГК «Росатом»). Около 50 % ведущих научных и инженерных работников предприятия – выпускники нашего факультета (института). В конце 40-х – 50-х годах сотни выпускников радиофака были направлены в ядерный центр в Снежинске (Челябинске) и на заводы в Красноярске.

В 1947 г. в связи с изменениями профиля производства на заводе им. Ленина радиосвязная тематика была передана в СКБ завода им. Попова (гл. конструктор СКБ Б.Д. Увяткин), ныне ФНПЦ «НПП «Полет»».

НПП «Полет» является ведущим предприятием по обеспечению ВВС, гражданской авиации средствами авиационной связи. С момента создания на предприятии было разработано несколько поколений бортовой аппаратуры декаметрового диапазона. В 1978 г. работы отмечены Государственной премией СССР. В 1981 г. впервые в истории отечественного радиостроения был создан мощный бортовой радиопередатчик «Фрегат» и бортовой одноканальный радиоприемник «Новелла» мириаметрового диапазона для ретрансляции команд управления подводными лодками, находящимися в погруженном состоянии, радиосвязное оборудование метрового и дециметрового диапазонов.

В последнее десятилетие на предприятии разрабатывается приемопередающая аппаратура на принципах цифровой обработки сигналов. Разработки по типовым комплексам связи (ТКС) получили широкое распространение на самолетах ВВС, гражданской авиации. В кон-

це 60-х годов были разработаны комплексы средств связи летательных аппаратов, объединенная система связи, обмена данными навигации и опознавания.

За разработку ТКС-2 творческий коллектив: В.Ф. Киселев, Е.Л. Белоусов, и другие выпускники радиофака были удостоены Государственной премии.

Важнейшим направлением работ было также создание воздушных пунктов управления, оборудования самолетов 5-го поколения.

На предприятии были разработаны, испытаны и освоены серийно несколько десятков комплексов систем и средств связи и организована их поставка МОРФ и гражданской авиации, зарубежным партнерам. Предприятие имеет развитую испытательную базу.

Руководивший предприятием более 35 лет Генеральный директор Евгений Леонидович Белоусов (выпускник радиофака), лауреат Государственных премий СССР и РФ, Заслуженный деятель науки и техники был удостоен звания «Генеральный конструктор авиационной радиосвязи»).

На всех 3-х предприятиях созданы базовые кафедры, ведется целевая подготовка специалистов в магистратуре и аспирантуре. В НИИ «Полет» образован совместно с НГТУ совет по защите диссертаций.

Мы рассказали о выпускниках, работавших и работающих на предприятиях ОПК, известных нам. К сожалению, о многих выпускниках, проявивших на других предприятиях, в научных учреждениях и вузах, у нас нет сведений.

Назовем еще достойнейших радиофаковцев.

Это – студент 4-го курса, ушедший в 41 г. добровольцем на фронт - Ю.И. Онусайтис, Герой Советского Союза, генерал-майор, начальник кафедры военно-дипломатической академии.

Медведев В.Н., призванный в армию в 1952 г. с 4-го курса (продолжил учёбу в академии Дзержинского), генерал-майор, д.т.н., Заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии в области математики.

Студент начала 60-х годов Поскребетьев С.В. – генерал-полковник, начальник военной академии.

Юхтанов Г.Ф. – выпускник 1961 г., генерал-майор, д.т.н., лауреат Государственной премии.

Руководитель предприятий ОПК Ульянов А.А. - дважды лауреат Государственной премии СССР, д.т.н., заслуженный деятель науки и техники.

Горшков А. П., дважды лауреат Государственной премии.

Академик РАН, директор ИФМ Гапонов С.В.

Чл.-корр. АН СССР Салашенко Н.Н.

Генеральные директора предприятий Комяков А.В., Батырев А.В.

Наконец, скажем о самом факультете.

Несмотря на «молодость», факультет обеспечивал в 40-х годах предприятия инженерами-разработчиками высокой пробы. В этом была большая заслуга первых преподавателей факультета, совмещавших преподавательскую работу с производственной: Л.В. Виткевич, А.Т. Углов, В.А. Соколовский, А.В. Аренс, Н.А. Катков, А.Н. Долбнев, И.С. Белый, А.П. Скибарко, Л.И. Поливанов, В.И. Верховцев, В.А. Авдентов, Л.Н. Осташкин.

Прием на факультет в первые годы составлял 3 группы, с 1950 г. – 6 групп, с 1952 г. – 8 групп по специальности «Радиотехника». Принимая во внимание наличие государственного распределения специалистов, почти все они были направлены на предприятия ОПК.

После переезда в г. Горький профессора Д.В. Агеева и начала заведования им кафедрой радиотехники, а потом радиоприемных устройств, факультет включается в решение задачи

подготовки для предприятий научных работников через аспирантуру. Большинство из 55 подготовленных Д.В. Агеевым кандидатов наук – работники предприятий ОПК. Научных работников успешно готовили Ю.С. Лезин, В.В. Маланов, В.В.Кондратьев, Л.А. Моругин, Г.В. Глебович, С.Б.Раевский, В.Я. Сморгонский, В.И. Сагунов, Д.А. Кабанов.

Факультет и задумывался как обеспечивающий кадрами оборонку с правилами приема, установленными для втузов народного комиссариата оборонной промышленности.

В послевоенное время на факультете преподавали награжденные боевыми орденами профессор Г.В. Глебович, доценты К.К. Птицын, В.Д. Катунцев, ст. преподаватель Л.В. Горячев.

Успешно развиваясь, факультет в 2005 г. был преобразован в «Институт радиоэлектроники и информационных технологий» численностью 3000 студентов и аспирантов, 14 специальностей и профилей подготовки, 500 преподавателей, инженеров и научных сотрудников. К преподавательской работе привлекались 42 доктора наук, 130 кандидатов наук, 1 чл.-корр. АН СССР. Институт тесно сотрудничал со всеми предприятиями ОПК радиоэлектронного профиля.

В настоящее время, несмотря на объективные и особенно субъективные трудности управления наукой и высшей школой, институт прилагает много усилий для сохранения подготовки специалистов высокой пробы.

**V.G. Baranov, V.P. Khranilov**

## **RADIOFAC TO GUARD THE FATHERLAND**

Nizhny Novgorod state technical university na. R.E. Alekseev

In the year of the 75th anniversary of the Victory of the USSR over fascist Germany, the contribution of teachers and graduates of the radio engineering faculty of the GII-GPI-NSTU to the Victory is noted. During the war, he became a "forge of personnel" for the Gorky radio industry without exaggeration of the city of Labor Valor. Outstanding graduates who made a significant contribution to our Victory are named by name. The accumulated industrial experience has become a reliable starting point for the post-war development of the military-industrial enterprises of the radio-technical profile of the city of Gorky.

**Keywords:** 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War, Gorky, Gorky Industrial Institute, Gorky Polytechnic Institute n. a. A.A.Zhdanov, Gorky Telephone Plant n.a. V.I. Lenin, Gorky Plant n. a. M.V. Frunze.

## Секция 1. Электронные сети и телекоммуникации

УДК 621.376.6

М.В. Артамонов, А.С. Полозкова, Н.А. Чащина, Е.Р. Штейн

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ДКМВ МОДЕМОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ МОДУЛЕЙ СВЯЗИ

ФНПЦ АО «НПП «Полет», г. Нижний Новгород

Предлагается новый режим работы широкополосного модуля связи в ДКМВ диапазоне, позволяющий достигать высоких скоростей передачи данных (вплоть до 240000 бит/с).

**Ключевые слова:** радиосвязь, радиоканал, модем, кодек, скремблер, перемежитель.

Важным видом авиационной радиосвязи была и остается ДКМВ радиосвязь. Декаметровые волны способны распространяться на очень большие расстояния за счёт отражения от ионосферы. Однако связь в этом диапазоне является неустойчивой, очень сильно зависит от состояния ионосферы, погодных условий и времени суток, из-за чего возможны длительные замирания. Тем не менее, несмотря на сложные условия распространения радиоволн ДКМВ диапазона данный вид связи является основным видом дальней радиосвязи. Следует отметить, что в последние годы возрос интерес к ближней ДКМВ связи, так называемой NVIS-связи, способной конкурировать с МВ-ДМВ связью или, как минимум, дополнять ее.

В радиосвязи постоянно возрастают требования к скорости передачи данных и надежности доведения информации до потребителя. По этой причине разработка высокоскоростных ДКМВ модемов для современных авиационных широкодиапазонных модулей связи является актуальной задачей. Основной проблемой при создании высокоскоростного ДКМВ модема является грамотный выбор сигнально-кодовой конструкции (СКК), модели канала и робастных алгоритмов приема сигнала. Зарубежная техника и технологии радиосвязи пока еще обгоняют отечественные, поэтому целесообразно опираться на их разработки при создании отечественной радиосвязной аппаратуры. Новые виды высокоскоростных ДКМВ модемов для современных авиационных широкополосных модулей связи предлагается строить на базе стандарта MIL-STD-188-110D, принятого в декабре 2017 года [1]. В нем содержатся требования, относящиеся к модуляторам-демодуляторам (модемам) с полосами частот от 3 до 48 кГц, которые работают как в системах дальней связи, так и в системах тактической связи.

Стандарт MIL-STD-188-110D предусматривает скорости передачи данных от 75 до 240000 бит/с в полосе частот от 3 до 48 кГц. Для обеспечения наилучшего качества связи (включая оптимизацию скорости передачи информации в широких пределах) при различных условиях распространения радиоволн и при различных частотных ресурсах предусмотрен ряд СКК. В табл. 1 и 2 представлены виды модуляции, используемые в различных СКК для обеспечения заданного ряда скоростей. При работе на самых низких скоростях (и при самых низких отношениях сигнал/шум) используется модуляция с помощью ортогональных функций Уолша (табл.1). При более высоких скоростях используется многопозиционная фазовая



модуляция (ФМ, PSK) с числом позиций 2, 4 и 8 (BPSK, QPSK, 8PSK) (табл. 1). Для еще большего увеличения скорости применяется квадратурная амплитудная модуляция (КАМ, QAM) с числом позиций 32, 64 и 256 (32QAM, 64QAM, 256QAM) (табл. 2).

Для обеспечения помехоустойчивости предусмотрено сверточное кодирование со скоростями кода от 1/16 до 9/10 (1/16, 1/12, 1/8, 1/6, 1/4, 2/7, 1/3, 2/5, 1/2, 9/16, 4/7, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10). Длина сдвигового регистра кодера может быть 7 и 9 [1].

Для борьбы с пакетированием ошибок путем их разнесения во времени используется блочный перемежитель. Возможны четыре интервала перемежения в диапазоне от 0.12 до 10.24 с. Перемежитель представляет собой одномерный массив с ячейками, пронумерованными от 0 до величины, равной его размеру в битах минус один. Размер массива зависит как от скорости передачи данных, так и от интервала перемежения [1]. Кодированные биты перемежаются перемежителем, а перед декодированием выстраиваются в исходном порядке. В результате этого удастся избежать существенного группирования ошибок, возможного, например, из-за замираний, с которым декодер не может справиться.

*Таблица 1*

**Скорости передачи информации при использовании модуляции ортогональными функциями Уолша и многопозиционной ФМ**

Номер СКК	0	1	2	3	4	5	6	7	13
Модуляция	Уолш	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	QPSK	8PSK	QPSK
Полоса (кГц)									
3	75	150	300	600	1200	1600	3200	4800	2400
6	150	300	600	1200	2400	3200	6400	9600	
9	300	600	1200	2400	-	4800	9600	14400	
12	300	600	1200	2400	4800	6400	12800	19200	
15	300	600	1200	2400	4800	8000	16000	24000	
18	600	1200	2400	4800	-	9600	19200	28800	
21	300	600	1200	2400	4800	9600	19200	28800	
24	600	1200	2400	4800	9600	12800	25600	38400	
30	600	1200	2400	4800	9600	16000	32000	48000	
36	1200	2400	4800	9600	12800	19200	38400	57600	
42	1200	2400	4800	9600	14400	19200	38400	57600	
48	1200	2400	4800	9600	16000	24000	48000	72000	

*Таблица 2*

**Скорости передачи информации при использовании многопозиционной КАМ**

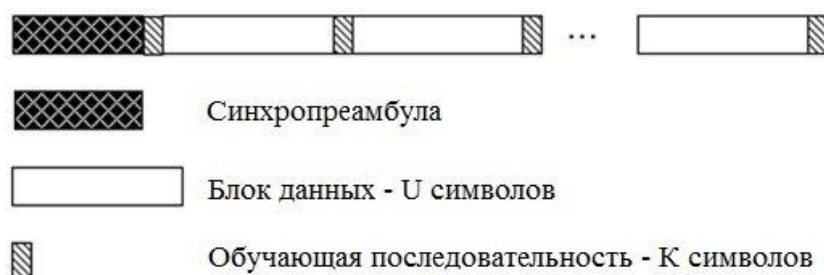
Номер СКК	8	9	10	11	12
Модуляция	16QAM	32QAM	64QAM	64QAM	256QAM
Полоса (кГц)					
3	6400	8000	9600	12000	16000
6	12800	16000	19200	24000	32000
9	19200	24000	28800	36000	48000
12	25600	32000	38400	48000	64000
15	32000	40000	48000	57600	76800
18	38400	48000	57600	72000	90000
21	38400	48000	57600	76800	115200
24	51200	64000	76800	96000	120000
30	64000	80000	96000	120000	160000
36	76800	96000	115200	144000	192000

42	76800	96000	115200	160000	192000
48	96000	120000	144000	192000	240000

Для обеспечения эффективной работы высокоскоростного модема также используется скремблирование, которое обеспечивает рандомизацию сигнала в эфире. Для сигналов, не использующих модуляцию Уолша, полином генератора скремблирующей последовательности имеет вид  $x^9+x^4+1$ , при этом сам генератор инициализируется единицей в начале каждого кадра данных. Длина скремблирующей последовательности равна 511. При использовании функций Уолша применяется скремблер со сдвиговым регистром длиной 159, с табличной инициализацией. Длина такой скремблирующей последовательности составляет 2048 [1].

Для того, чтобы спектрально ограничить форму передаваемого сигнала в пределах указанной полосы пропускания, используется формирующий фильтр, частотная характеристика которого имеет вид «корня квадратного из приподнятого косинуса» [1]. Автокорреляционная функция такого фильтра обладает свойством отсечности, то есть если применить этот фильтр и при модуляции, и при демодуляции, то у импульсной характеристики суммарного фильтра на расстоянии кратном длительности символа от ее максимума будут нули. Таким образом, при использовании такого фильтра при качественной тактовой синхронизации будет отсутствовать межсимвольная интерференция, если ее не внесет канал связи [3].

На рис. 1 показана структура кадра. Видно, что каждый кадр данных начинается с синхропреамбулы, за которой следуют чередующиеся блоки известных и неизвестных символов. Блок известных символов является обучающей последовательностью. Блок неизвестных символов содержит в себе полезную информацию.



**Рисунок 1. Структура кадра**

Синхропреамбула используется для быстрой начальной синхронизации и обеспечивает средства для обнаружения информационного кадра и устранения неопределенности по времени и частоте. Синхропреамбула включает в себя 2 основных сегмента: сегмент для установления АРМ и АРУ (сегмент TLC (transmitter level control)) и сегмент синхронизации, содержащий повторяющийся суперкадр. Суперкадр повторяется М раз и состоит из трех различных разделов. Первый раздел представляет собой неизменяемый элемент, второй - содержит в себе декрементный счетчик повторов суперкадра, третий - содержит в себе идентификатор используемой СКК (WID (Waveform ID)), включая тип перемежителя и длину сдвигового регистра сверточного кодера. После сегмента синхронизации передается информационный сегмент (Рисунок 2).

Сегмент TLC может состоять из ряда одинаковых блоков, количеством от 0 до 255 (если 0, то TLC не передается). Образующий TLC блок представляет собой табличный набор 8PSK символов, количество которых зависит от полосы частот, занимаемой СКК. Неизменяемый элемент суперкадра состоит из 1 или 9 символов, представляющих собой ортогональные

функции Уолша. 1 символ передается, если суперкадр передается однократно. Неизменяемый элемент предназначен исключительно для временной синхронизации и устранения частотной рассинхронизации. Второй и третий разделы суперкадра для передачи служебной информации (содержимое счетчика повтора суперкадра и WID) также используют ортогональные функции Уолша [1].

Обучающие последовательности не используются в нулевой СКК, основанной на функциях Уолша. Во всех остальных СКК обучающие последовательности используются и различаются размером и содержанием для разных полос сигнала и скоростей. Каждая последовательность представляет собой базовую последовательность, циклически расширенную до необходимой длины.

В более ранних стандартах на высокоскоростные ДКМВ модемы рекомендовалось использовать модель канала Ватерсона, описанную в ITU-R F.1487 [6], где также были предложены характерные параметры модели и некоторые статистические данные о радиоканалах для разных регионов Земли. Однако, как указано в этом документе, данная модель была подтверждена для полос канала до 12 кГц. В Приложении E MIL-STD-188-110D [1] использование модели Ватерсона расширено до полосы 24 кГц. Там же описаны рекомендации по построению аппаратно-программного имитатора радиоканала. В Приложении D MIL-STD-188-110D [1] приведены отношения сигнал/шум в канале с АБГШ и в 2-х лучевом замирающем канале для разных СКК, при которых должна быть обеспечена вероятность ошибки на бит не более  $10^{-5}$  (табл. 3) при использовании рекомендованного имитатора канала.



Рисунок 2. Структура преамбулы синхронизации

Таблица 3

Требования к качеству приема широкополосного модема (для всех полос)

Номер СКК	Среднее значение отношения сигнал/шум (дБ) при коэффициенте битовых ошибок $BER \leq 10^{-5}$		Исключения (для определенных полос сигнала)
	Канал с АБГШ	«Плохой» канал согласно ITU-R	
0	-6	-1	При 9кГц для «плохого» канала +1дБ
1	-3	3	
2	0	5	
3	3	7	При 9 кГц +1дБ
4	5	10	Эта СКК отсутствует для 9 и 18кГц
5	6	11	
6	9	14	

7	13	19	
8	16	23	
9	19	27	
10	21	31	При 24 кГц для «плохого» канала $BER \leq 10^{-4}$ и сигнал/шум 33дБ
11	24	-	
12	30	-	
13	6	11	Эта СКК доступна только для 3кГц

В Приложении G стандарта MIL-STD-188-141D [2] описана автоматическая процедура составления канала при использовании, в том числе, и новых широкополосных режимов связи (ALE 4G (Wideband ALE (WALE))). Там описана, по сути, процедура установления соединения абонентов с многопараметрической адаптацией. Используя ALE 4G можно осуществлять радиосвязь на основе СКК стандарта MIL-STD-188-110D с параметрами, близкими к оптимальным для текущих условий в эфире. Сам по себе стандарт MIL-STD-188-110D предоставляет пользователю широкий спектр вариаций параметров режима связи, но не дает методики их выбора.

Описание алгоритмов и методов эффективного приема сигнала стандарт MIL-STD-188-110D не содержит, поэтому разработка алгоритмов обнаружения сигнала, демодуляции, выравнивания (или идентификации) канала, декодирования и еще множества других обязательных алгоритмов выполняется научными сотрудниками ФНПЦ АО «НПП «Полет». Эта работа ведется не с чистого листа, основана на базовых методах и алгоритмах, описанных в отечественной и зарубежной литературе, а также на проведенных ранее на предприятии исследованиях. Но, в основном, на базовые и ранее разработанные алгоритмы можно лишь опираться, так как мы имеем дело с новыми сигнально-кодowymi конструкциями и новыми требованиями.

Основным направлением при создании современных комплексов средств связи (КСС) в ФНПЦ АО «НПП «Полет» является построение комплексов на базе широкодиапазонных модулей связи (ШМС) [7]. Разработаны ШМС и для бортовых, и для наземных КСС. Это позволяет разрабатывать, исследовать и внедрять режимы работы не только для модемов, но и для всей системы радиосвязи. Есть возможность при внедрении нового режима проанализировать нюансы работы каждого элемента и наземного и бортового узлов связи и предусмотреть меры, нейтрализующие выявленные недостатки, мешающие достичь проектных критериев качества. Также появляется возможность модифицировать ряд процедур или алгоритмов взаимодействия и управления, если это изменит какие-либо характеристики в лучшую сторону.

В MIL-STD-188-110D приведены параметры модели канала, при которых должно обеспечиваться заданное качество работы модема. Но мы должны ориентироваться, прежде всего, на особенности условий использования комплекса, для которого будет разрабатываться режим работы. Например, в северных широтах типовые скорости замираний гораздо выше, чем в средних, для которых в стандарте приведены параметры модели. Возможно, в подобных случаях требования будет целесообразно скорректировать.

Эффективность требований к разработке модемов, содержащихся в стандарте MIL-STD-188-110D, была доказана практически и описана в литературе. Например, согласно [5], в Центральной Азии в осеннее время, в условиях высокой солнечной активности на трассе протяженностью 1515 км осуществлялась связь с беспилотным летательным аппаратом, во время которой была достигнута устойчивая скорость передачи данных

38 кбит/с, за исключением предрассветных часов, и 48 кбит/с утром и вечером, мощность излучения была 1 кВт. С помощью таких модемов также оказалось возможным обеспечить ближнюю радиосвязь: натурные испытания показали, что на трассе протяженностью 68 км, как и в случае дальней связи, скорость передачи данных, равная 38 кбит/с, поддерживается в течение большей части дня при низкой солнечной активности, а скорость передачи данных, равная 48 кбит/с - утром и вечером. При этом связь с беспилотным летательным аппаратом обеспечивалась при мощности 200 Вт [5]. Следует отметить, что, по крайней мере, за рубежом активно используется ближняя ДКМВ связь (NVIS-связь), при которой радиоволны распространяются практически вертикально вверх в ионосферу, после чего преломляются обратно вниз и могут быть приняты на расстоянии до 650 км от передатчика. Нет принципиальной разницы между NVIS-связью и обычным распространением радиоволн: практическое различие вытекает исключительно из разных желательных диаграмм направленности антенн [4]. Наиболее надежные частоты для NVIS-связи составляют от 1.8 до 8 МГц. Используемые частоты определяются ионосферными условиями, которые сильно зависят от географического положения. Оптимальные частоты NVIS-связи, как правило, выше в тропиках и ниже в арктических регионах. Они также выше в период высокой активности солнечных пятен. NVIS-связь наиболее полезна в горных районах, где распространение на линии прямой видимости неэффективно. Считаем, что целесообразно рассмотреть вопросы внедрения ближней ДКМВ связи для отечественной авиации, тем более что новые ДКМВ режимы способны обеспечить более высокие скорости передачи информации, чем типовые МВ-ДМВ режимы связи. Кроме того, возможность использования средств дальней связи в ближней зоне позволит повысить надежность всего комплекса связи за счет дополнительного резервирования средств ближней связи.

Анализируя табл. 3, можно получить представление о возможной пригодности тех или иных СКК в типовых условиях работы. К СКК 11 и 12 не предъявляются требования для работы в замирающем канале, поскольку они почти непригодны при многолучевых замираниях. СКК, использующие КАМ, требуют очень большого отношения сигнал/шум, которого нелегко добиться даже в лабораторных условиях. Вряд ли в реальной электромагнитной обстановке часто удастся обеспечить столь малые шумы. Следует обратить внимание и на то, что требования к отношению сигнал/шум почти не зависят от полосы занимаемых частот. Но эфирные и тепловые шумы при постоянной спектральной плотности мощности будут расти при увеличении полосы частот, а, значит, для широких полос будет гораздо сложнее достичь заданного отношения сигнал/шум. Имеет смысл ограничиться малым набором СКК, которые бы перекрывали основные потребности для реальных задач связи. По крайней мере, на начальном этапе введения новых режимов работы для ускорения процесса разработки и внедрения следует реализовать 2-3 режима с очень низкими скоростями для работы в очень плохих условиях, 1-2 режима со скоростями порядка 2400 бит/с (в том числе, для режима вокодерной телефонии) и 3-4 режима со скоростями до  $\approx 40$  кбит/с (их реальная работоспособность подтверждается [5], а работа на более высоких скоростях вызывает сомнения). В связи с сильным сокращением списка также представляется целесообразным упростить и скорректировать процедуры WALE [2].

Если не использовать модуляции с большими созвездиями, то усилители мощности (УМ) ШМС вполне пригодны для работы с новыми СКК. Но для больших созвездий необходима цифровая линейаризация УМ. ШМС аппаратно вполне пригоден для решения этой задачи, но мы планируем внести некоторые доработки в него, чтобы проще решать эту задачу и улучшить в целом характеристики УМ с помощью ЦОС.

Опираясь на предлагаемые стандартом MIL-STD-188-110D СКК, ФНПЦ АО «НПП «Полет» ведет разработку нового помехозащищенного режима радиосвязи (на основе пространственно-временной обработки сигналов) с адаптацией к среде и помехам. На наш взгляд, на базе рассмотренных СКК с малыми созвездиями удастся реализовать адаптивный среднескоростной режим радиосвязи с хорошими характеристиками помехозащищенности.

В настоящее время ФНПЦ АО «НПП «Полет» ведет активную работу по внедрению новых режимов работы ШМС в ДКМВ диапазоне на базе современных СКК. Учитываются и возможности, предоставляемые ШМС, и ограничения, накладываемые им. Работа ведется в интересах бортовых и наземных комплексов, для дальней и ближней связи, для обеспечения адаптации к очень широкому спектру условий среды и для возможности ведения связи в присутствии помех.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. MIL-STD-188-110D. Military Standard - Interoperability and Performance Standards for Data Modems. - US Department of Defense Interface Standard, 29 December 2017.
2. MIL-STD-188-141D. Military Standard - Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems. - US Department of Defense Interface Standard, 22 December 2017.
3. **Николаев, Б.И.** Последовательная передача дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью / Б.И. Николаев. - М.: Радио и связь, 1988.
4. **Поляков, В.Т.** NVIS – техника ближней связи на КВ // Спецтехника и связь, № 1, 2009.
5. **Eric E. Johnson.** Performance envelope of broadband HF data waveforms. Klipsch School of Electrical and Computer Engineering, New Mexico State University. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5379871>
6. Recommendation ITU-R F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of up to about 12 kHz Using Ionospheric Channel Simulators. - Geneva: ITU, 2000.
7. **Артамонов, М.В.** Проблемы расширения номенклатурного перечня режимов работы современных авиационных широкополосных модулей связи / М.В. Артамонов, А.В. Гришин, Н.А. Чашина, Е.Р. Штейн // XXI Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии»: Сборник трудов.- Нижний Новгород, 2015.- С.115-116.

**M.V. Artamonov, A.S. Polozkova, N.A. Chashina, E.R. Stein**

### DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HIGH-SPEED HF MODEMS FOR MODERN AVIATION WIDEBAND COMMUNICATION MODULES

FSUE JSC «RPC «Polyot», Nizhny Novgorod

**Abstract:** Suggested a new mode of operation of wideband communication module in HF which allows achieving high data rates (up to 240000 bps).

**Key words:** radio communication, radio channel, modem, codec, scrambler, interleaver.

С.С. Белоусов, П.А. Федюнин

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ВОИНСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж

В статье предложены основные направления по обеспечению устойчивости функционирования системы связи воинского формирования противовоздушной обороны в интересах непрерывности управления оперативно подчиненной авиацией.

**Ключевые слова:** телекоммуникации; система связи; устойчивость; беспроводный широкополосный доступ.

### **Введение**

Рассматривая выполнение задач по отражению агрессии в воздушной сфере и защите пунктов управления высших звеньев государственного и военного управления, административно-политических центров, промышленно-экономических районов, важнейших объектов экономики и инфраструктуры страны, решаемые совместно силами истребительной авиацией (ИА) и противовоздушной обороны (ПВО), необходимо понимать, что вопросы выполнения всех требований к системе связи, как технической основе системы управления, имеют приоритетное место в организации работы любого пункта управления.

### **Основные направления обеспечения устойчивости системы связи**

Выполнение указанных требований возможно путем совершенствования системы связи формирования ПВО на основе построения информационно-коммуникационной сети [1], способной, в свою очередь, полноценно обеспечить межвидовое взаимодействие сил и средств ПВО, дислоцирующихся в зоне ответственности (на приморских направлениях совместно с силами Флота), на самых сложных и важных направлениях.

Ключевую роль в недопущении огневого и радиоэлектронного воздействия противника с воздуха, на удаленных от зоны поражения средств ПВО расстояниях, играет ИА, оперативно подчиненная формированию ПВО, с командного пункта (КП) которой и производится управление и напрямую зависит от уровня непрерывности управления.

В настоящее время управление ИА базируется на традиционных подходах обеспечения устойчивости системы связи, в том числе, организационно-техническом построении УС КП формирования ПВО с использованием средств связи предыдущих поколений, которые не могут обеспечить непрерывность управления ИА, отвечающую современным требованиям.

Данный анализ обуславливает противоречие между необходимостью непрерывного управления ИА с КП формирования ПВО в условиях возросших возможностей систем управления и неспособностью существующей системы связи обеспечить требуемый уровень устойчивости.

Рассматривая вопрос повышения эффективности управления с КП формирования ПВО истребительной авиацией в условиях огневого и радиоэлектронного деструктивного воздействия со стороны противника и вероятного выхода из строя их элементов системы управления как отдельные узлы ПУ и линии связи, необходимо оперативно реагировать на изменения в обстановке и гарантировать выполнение поставленной задачи.

Решить данное противоречие возможно путем разработки различных приемов и способов обеспечения устойчивости системы связи, основанных как на применении современных образцов наземной техники связи, так и возможностей перспективных образцов авиационной техники поступающих на обеспечение в состав авиационных соединений и частей.

Перечислим основные направления обеспечения устойчивости системы связи в интересах непрерывности управления оперативно подчиненными силами ИА с КП формирования ПВО с учетом анализа опыта вооруженных конфликтов последних лет.

### ***1. Принцип модульного построения УС ПУ***

Разбиение на уровни, или уровневая архитектура, является формой функциональной модульности, которая является центральной при проектировании сетей передачи данных. Под модулем может пониматься как устройство, так и процесс в некоторой телекоммуникационной сети, выполняющие определенную функцию. Разработчики конкретного модуля должны понимать внутренние детали и работу этого модуля.

При организации взаимодействия между устройствами в сети используется универсальный прием - декомпозиция, то есть разбиение одной сложной задачи на несколько более простых задач-модулей. Процедура декомпозиции включает в себя четкое определение функций каждого модуля, решающего отдельную задачу, и интерфейсов между ними. В результате достигается логическое упрощение задачи, а кроме того, появляется возможность модификации отдельных модулей без изменения остальной части системы.

При декомпозиции часто используют многоуровневый подход. Он заключается в следующем. Все множество модулей разбивают на иерархически выстроенную систему уровней. Множество модулей, составляющих каждый уровень, сформировано таким образом, что для выполнения своих задач они обращаются с запросами только к модулям непосредственно примыкающего нижележащего уровня. С другой стороны, результаты работы всех модулей, принадлежащих некоторому уровню, могут быть переданы только модулям соседнего вышележащего уровня. Такая иерархическая декомпозиция задачи предполагает четкое определение функции каждого уровня и интерфейсов между уровнями. Интерфейс определяет набор функций, которые нижележащий уровень предоставляет вышележащему. В результате иерархической декомпозиции достигается относительная независимость уровней, а значит, и возможность их легкой замены.

Модульное построение УС полевой компоненты воинского формирования, не только позволит улучшить устойчивость, но и упростит доступ должностных лиц к ресурсу услуг связи, живучесть и мобильность узлов связи и пунктов управления в целом [2]. Использование унифицированных аппаратных комплексов на узлах связи различных звеньев управления, а также во всех родах войск, приведет к уменьшению количества демаскирующих признаков и значительному увеличению времени, необходимого для распознавания оперативно-тактических признаков пункта управления и деструктивного воздействия противника на объекты связи.

### ***2. Оборудование УС ПУ аппаратурой беспроводного широкополосного доступа***

В последнее время беспроводные сетевые технологии стремительно получают всё большее распространение. Постоянно расширяющийся спектр оборудования, усовершенствован-



ние стандартов и улучшение механизмов защиты позволяет применять беспроводные решения в системах связи военного назначения. Современное беспроводное оборудование соответствует высочайшим требованиям безопасности, устойчивости и обеспечивает высокую скорость передачи данных.

Основным преимуществом систем беспроводного широкополосного доступа (БШПД) является отсутствие кабельных линий так называемой «последней мили» на участке «абонент – точка доступа», так как используется радиодоступ, а также относительно короткий срок развертывания оборудования для использования и низкая стоимость развертывания системы по сравнению с развертыванием аналогичной системы на базе оптоволоконного кабеля или радиорелейной линии (РРЛ) за счет работы системы по принципу «точка-многоточка».

При выполнении мероприятий по повышению живучести системы управления воинскими формированиями различных звеньев управления часть задач по обмену оперативной информацией между должностными лицами будет возложена на полевые компоненты узлов связи пунктов управления (УС ПУ) [3]. Однако при их развертывании возникает ряд проблем, связанных с тем, что существующие полевые сети связи, как правило, являются низкоскоростными и не позволяют обеспечить требуемое расширение функций для объектов воинского формирования в связи с увеличением нагрузки на систему связи (организация дополнительных телефонных каналов и каналов передачи данных, каналов доступа к магистральным линиям связи, каналов видеонаблюдения, локальных вычислительных сетей и других) и необходимостью рационального развертывания полевых аппаратных связи на местности с учетом физико-географических условий.

Применение данного способа организации связи позволит обеспечить встречную работу на скоростях передачи информации до 280 Мбит с оборудованием беспроводного широкополосного доступа (БШПД) и межвидовое взаимодействие с сухопутными подразделениями, но и надежную защиту от воздействий извне, обеспечивающую безопасность передачи данных.

### ***3. Применение радиосредств наземной и воздушной радиосетей шестого поколения, использующих MESH-технологии образования сетей радиосвязи***

Необходимо отметить, что система связи формирования ПВО как элемент наземного эшелона объединенной автоматизированной цифровой сети связи (ОАЦСС) непрерывно взаимодействует с воздушным эшелоном на основе взаимоувязанных линий разнородной связи, узлов и комплексов средств связи наземных объектов и воздушных судов, обеспечивающих образование таких подсистем как:

- магистральные транспортные сети и местные сети воздушного эшелона ОАЦСС ВС РФ;
- сети доступа;
- сети подвижной радиосвязи для подвижных объектов ОАЦСС ВС РФ;
- объектовые сети наземных объектов воздушного эшелона.

Важным вопросом при проектировании и эксплуатации телекоммуникационных сетей является эффективность их функционирования. Современные сети являются мультисервисными – они способны организовывать две и более служб электросвязи, обеспечивающих предоставление услуг заданного качества. Обеспечение мультисервисных сетей является сложной задачей, обусловленной необходимостью обеспечивать работу многих служб с противоречивыми требованиями, а также случайным характером поступающих сообщений.

Для полевых узлов связи и транспортной сети полевой системы связи предлагается использовать базовый комплекс аппаратных, что позволит осуществить развертывание УС КП и УС ЗКП воинского формирования, привязав их к полевой опорной (транспортной) сети

связи и Единой сети связи РФ, тем самым обеспечив оперативному составу ПУ доступ к телекоммуникационным услугам.

### **Заключение**

Применение предлагаемых способов обеспечения устойчивости системы связи, основанных на использовании телекоммуникационных технологий, позволит значительно повысить показатель непрерывности управления силами авиации при выполнении поставленных задач.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### **Библиографический список**

1. **Арсланов, Х.А.** Автоматизированная система управления связью Вооружённых Сил Российской Федерации и приоритетные направления ее развития // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации, Москва, 2016 г. с. 17-20.
2. **Величко, В.В.** Модели и методы повышения живучести современных систем связи / В.В. Величко, В.Г. Попков, В.К. Попков // Москва, «Горячая линия-Телеком», 2016 г., 270 с.
3. **Усиков, А.В.** Военное искусство в локальных войнах и вооруженных конфликтах / А.В. Усиков, Г.А. Бурутин. - М. Военное издательство, 2008 г. - 508 с.

**S. S. Belousov, P. A. Fedyunin**

### **THE USE OF TELECOMMUNICATIONS TECHNOLOGIES IN SUSTAINABLE COMMUNICATIONS SYSTEM FOR MILITARY UNITS**

Military educational and scientific center of the Air Force Military  
«Air Force Academy» (Voronezh)

In article the basic directions for ensuring stability of functioning of communication system of military forces of air defence in the interests of continuity of subordinate operational fighter aircraft.

**Keywords:** telecommunications; communication system; stability; wireless broadband access.

А.Г. Ивануткин, А.В. Блинов, С.Н. Бурянин

## УТОЧНЕНИЕ ЗАДАЧ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

В статье рассмотрены задачи радиотехнического обеспечения по этапам выполнения полетного задания воздушного судна, а также критерии эффективности их решения.

**Ключевые слова:** государственная авиация, радиотехническое обеспечение полетов, воздушное судно, полет по маршруту.

### Введение

Выполнение задач государственной авиации осуществляется в ходе выполнения полетов как по определенным воздушным трассам, так и вне воздушных трасс, при этом каждый полет воздушного судна (ВС) условно можно разбить на следующие этапы [1]: взлет и построение боевого порядка; полет в район выполнения авиационных работ; действия в районе выполнения авиационных работ; полет в район аэродромы посадки; роспуск боевых порядков и выполнение посадки. Таким образом, справедливо предположить, что эффективность радиотехнического обеспечения (РТО) государственной авиации определяется успешностью выполнения каждого этапа полета ВС.

Каждому этапу полета свойственны свои цели и содержание, исходя из которых определяются цели РТО, заключающиеся в создании экипажам самолетов благоприятных условий для успешного выполнения полетного задания.

Процессы взлета и построения боевых порядков влияют на выдерживание установленной последовательности действий экипажей на последующих этапах. Взлет ВС осуществляется в установленное время, по сигналу и по вызову из различных степеней готовности ВС. При взлете в установленное время запуск осуществляется с учетом потребного для выруливания на взлетно-посадочную полосу (ВПП) времени.

### Обеспечение взлета воздушных судов

Общими требованиями к взлету и построению боевых порядков являются обеспечение своевременности, скрытности, безопасности и максимального продвижения по маршруту. При выполнении взлета экипажам при рулении и разбеге необходимо выдерживать направление, ориентируясь по огням магистральной рулежной дорожки, ВПП и взлетным огням, при этом дальность видимости огней светосигнального оборудования (ССО) должна составлять не менее требуемой, при этом учитывается максимальная скорость движения ВС по ВПП. Основная задача РТО полетов на данном этапе заключается в своевременном обеспечении летчику ночью или в сложных метеоусловиях надежного визуального контакта с огнями ССО системы посадки аэродрома в целях точного выдерживания направления взлета относительно осевой линии или боковых сторон ВПП.

Выдерживание заданного места в боевом порядке производится экипажами визуально. При действиях в условиях, исключающих возможность визуального контроля, оно должно

осуществляться с помощью радиотехнических средств. Для контроля за построением боевых порядков, предупреждения экипажей об опасных сближениях и недопущения столкновений группа руководства полетами будет использовать информацию от радиолокационных средств. Особенно это важно для ВС которые не имеют аппаратуру межсамолетной навигации.

### **Обеспечение полета по маршруту**

После взлета, сбора и построения боевого порядка начинается полет по заданному маршруту с целью своевременного и точного выполнения авиационных работ. На этом этапе полета РТО решает задачи формирования и выдачи информации с такой точностью и дискретностью, которая позволит экипажу выдерживать заданный маршрут полета, отыскать назначенный район, выйти на него и выполнить поставленную задачу. Успешность решения данной задачи определяется точностью выдерживания линии заданного пути (ЛЗП) на всем протяжении маршрута.

Особенностью обеспечения данного этапа полета является то, что перед РТО стоят задачи по обеспечению точного вывода экипажей в область работы прицельно-навигационного комплекса ВС в простых и сложных метеоусловиях, после чего экипажи выполняют самостоятельный поиск назначенного ориентира визуально.

Используя параметры прицельных систем ВС можно предъявить минимальные требования к радиотехническому обеспечению вывода самолетов на наземные объекты, а именно в ту область воздушного пространства, в которой будет осуществляться гарантированное применение ВС государственной авиации. Следовательно, задача РТО при обеспечении данного этапа полета будет заключаться в выводе экипажей в область воздушного пространства со следующими характеристиками: минимальная и максимальная дальность до объекта при высоте, обеспечивающей прямую его видимость. Дальность прямой видимости определяется исходя из метеорологической обстановки в районе выполнения авиационных работ. В статье принято, что наихудшими условиями для их выполнения являются сложные метеорологические условия [2].

После выполнения авиационных работ экипажи ВС возвращаются на аэродромы. Обратный маршрут, как правило, может не совпадать с маршрутом полета к району выполнения авиационных работ и осуществляется в назначенных полосах пролета. Задача РТО при этом аналогична второму этапу.

С выходом в район аэродрома будет осуществляться роспуск боевого порядка, заход на посадку и посадка. Цель этапа – выполнение успешной посадки с первого захода, исключая потерю летного состава и авиационной техники. На заключительном этапе полета перед РТО стоят задачи по обеспечению вывода экипажей в точку начала снижения (ТНС) и информацией о местоположении самолета в воздушном пространстве относительно аэродрома и на посадочном курсе, об отклонениях от ЛЗП, по обеспечению визуального контакта с ВПП и о местах стоянок. Значения точности выхода в ТНС зависят от точности определения путевой скорости, ее выдерживания и выдерживания курса полета [3].

### **Критерии эффективности обеспечения полетного задания**

Исходя из решаемых РТО задач, целесообразно выделить три уровня в определении критериев эффективности: высший включает обобщенный критерий эффективности; средний – группу общих критериев; низший – группу частных критериев эффективности.

Учитывая задачи РТО полетов государственной авиации и аддитивность их влияния на эффективность, ее можно оценить функциональным критерием вероятностного типа. Наибо-

лее полно отвечает основной цели РТО критерий, выраженный вероятностью обеспечения выполнения полетного задания. Сущность данного критерия состоит в том, что он количественно отражает эффект достижения общей цели функционирования системы РТО. В качестве такого критерия принята способность РТО полетов эффективно обеспечивать выполнение полетного задания, а показателем его выступает вероятность радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации –  $W_{РТОГА}$ .

Для отражения смысла данного критерия можно представить его содержание упрощенной формулой:

$$W_{РТОГА} = \sum_{k=1}^N \alpha_k W_k, \quad (1)$$

где  $N$  – подмножество задач РТО, способствующих достижению цели;  $\alpha_k$  – весовые коэффициенты каждой из задач РТО полетов, при условии, что их сумма не превышает единицы;  $W_k$  – вероятность решения  $k$ -й задачи РТО с требуемым качеством.

При определении значений обобщенного критерия эффективности наиболее сложным вопросом является вопрос определения «удельного веса» (весового коэффициента) каждой из задач РТО, а также степени ее влияния на эффективность радиотехнического обеспечения полетов в целом. Примем, что наиболее важными задачами РТО являются обеспечение вывода экипажей в район выполнения авиационных работ, так как при выполнении задач необходимо нанести максимальный ущерб противнику и не допустить не боевых потерь авиационной техники и летного состава по вине РТО. В связи с этим второй важной задачей РТО является обеспечение посадки с требуемым качеством. В качестве критериев, характеризующих решение частных задач РТО, целесообразно принять следующие.

Способность РТО полетов эффективно обеспечить взлет самолетов днем и ночью в простых и сложных метеоусловиях, с основного и запасного аэродромов, которая определяется вероятностью обеспечения взлета  $W_{РТОвзл}$  и рассчитывается по формуле:

$$W_{РТОвзл} = 1 - \prod_{\mu}^A (1 - P_{РТОвзл\mu}), \quad (2)$$

где  $P_{РТОвзл\mu}$  – вероятность обеспечения системой РТО взлета самолетов с аэродромов базирования;  $A$  – состав аэродромов, с которых обеспечивается взлет экипажей.

Способность РТО полетов государственной авиации эффективно обеспечить вывод самолетов в район выполнения авиационных работ с аэродромов базирования, которая определяется вероятностью обеспечения вывода самолетов в район цели  $W_{РТОрц}$  и рассчитывается по формуле:

$$W_{РТОрц} = 1 - \prod_{\eta}^C (1 - P_{РТОрц\eta}), \quad (3)$$

где  $P_{РТОрц\eta}$  – вероятность обеспечения системой РТО вывода ВС в район выполнения авиационных работ с аэродромов базирования;  $C$  – состав аэродромов, с которых обеспечивается вывод экипажей в район выполнения авиационных работ.

Способность РТО полетов эффективно обеспечить вывод экипажей в район аэродрома посадки, определяемая вероятностью обеспечения вывода экипажей ВС в район аэродрома посадки  $W_{РТОpa}$ . Данная вероятность в работе рассчитывается по формуле:

$$W_{РТОpa} = 1 - \prod_q^D (1 - P_{РТОpaq}), \quad (4)$$

где  $P_{РТОpaq}$  – вероятность обеспечения системой РТО вывода экипажей ВС в район аэродрома посадки;  $D$  – количество аэродромов посадки.

Способность РТО полетов эффективно обеспечить посадку экипажей на аэродром посадки, которая определяется вероятностью обеспечения посадки  $W_{РТОnoc}$  и рассчитывается по формуле:

$$W_{РТОnoc} = 1 - \prod_{\tau}^V (1 - P_{РТОnoc\tau}), \quad (5)$$

где  $P_{РТОnoc\tau}$  – вероятность обеспечения системой РТО посадки экипажей ВС на  $\tau$ -ом аэродроме;  $V$  – состав аэродромов, выделенных для посадки.

Принятые критерии характеризуют эффективность РТО при решении отдельно взятых частных задач в ходе выполнения полетных заданий. Они учитывают большое число параметров и органично входят в критерий более высокого уровня, принятого за обобщенный. Это позволяет определить их в качестве общих критериев эффективности.

Решение каждой из частных задач РТО полетов государственной авиации должно быть обеспечено на уровне комплексов радиотехнических средств, входящих в состав системы РТО полетов. В связи с этим, вероятности  $P_{РТОвзлм}$ ,  $P_{РТОрцп}$ ,  $P_{РТОpaq}$ ,  $P_{РТОnoc\tau}$  способствуют определению общих критериев эффективности и, находясь по отношению к ним на более высоком уровне, могут обеспечить установление связи между ними и основными показателями, характеризующими качество функционирования системы РТО. Это дает основание принять их в качестве показателей частных критериев эффективности.

### Заключение

Таким образом, структура критериев эффективности РТО полетов государственной авиации представлена тремя уровнями. На первом уровне находится обобщенный критерий, на втором – группа общих, на третьем – группа частных критериев эффективности.

При этом требуемые значения обобщенного критерия эффективности будут достигнуты лишь при удовлетворении требований, предъявленных к процессу РТО. Эти требования нашли свое отражение в каждом из частных и, соответственно, в общих и в обобщенном критериях эффективности.

Таким образом, из рассмотренных целей и содержания этапов полета ВС государственной авиации следует, что на радиотехническое обеспечение полетов возлагается решение следующих основных задач: обеспечение взлета экипажей с основного аэродрома базирования; обеспечение вывода экипажей ВС в район выполнения авиационных работ; обеспечение вывода экипажей ВС в район аэродрома посадки; обеспечение посадки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

## Библиографический список

1. Приказ Минтранса России №297 от 20.10.2014 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь». – Москва : Минтранс России, 2014. – 231 с.

2. **Стафеев, М.А.** Методика оценки качества системы радиотехнического обеспечения полетов авиационного формирования / М.А. Стафеев, А.А. Василевский // Материалы VI международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» 3-5 июня 2019 г. – Тамбов: ТГТУ, 2019. – с. 344-345.

3. **До, Х.Н.** Методика оценки радиотехнического обеспечения авиационных формирований / Х.Н. До, С.Н. Левин, Р.А. Баранов // Материалы XIX международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии», 8-9 февраля 2019 г. – Воронеж: ВГУ, Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2019. – Т.6. – с. 102-106.

**A.G. Ivanutkin, A.V. Blinov, S.N. Buryanin**

### **CLARIFICATION OF TASKS FOR RADIO ENGINEERING SUPPORT OF STATE AVIATION FLIGHTS**

Military educational and scientific center of the Air Force Military  
Air Force Academy» (Voronezh)

The article deals with the tasks of radio engineering support for the stages of performing the flight task of an aircraft, as well as criteria for the effectiveness of their solution.

**Key words:** state aviation, radio technical support of flights, aircraft, flight on the route.

А.М. Карпель, А.В. Рябов

## СЕТЬ ДКМ РАДИОСВЯЗИ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ РЕСУРСОМ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Предложен метод параллельной ретрансляции сигналов, основанный на формировании виртуальной фазированной антенной решетки с пространственно распределенными элементами.

**Ключевые слова:** разведзащищенность, помехоустойчивость, фазированная антенная решетка, параллельная ретрансляция

### Введение

В настоящее время на вооружение Воздушно-космических сил Российской Федерации поступают новые авиационные комплексы (в том числе беспилотные), обладающие уникальными боевыми характеристиками. При этом эффективное применение таких комплексов требует повышения устойчивости, надежности, оперативности и скрытости управления авиационными формированиями, на основе совершенствования системы связи.

При управлении авиационными комплексами за пределами прямой радиовидимости важнейшую роль играют системы декаметровой (ДКМ) радиосвязи, обеспечивающие радиосвязь на дальностях до 2...3 тысяч километров. Эффективность указанных систем снижается вследствие объективных свойств ДКМ радиоканала, являющегося каналом со случайными параметрами и рассеянием энергии передаваемого сигнала в частотной и временной областях [1].

Для обеспечения надежности, оперативности и достоверности связи разрабатываются и совершенствуются способы автоматического установления и адаптивного ведения связи [1].

Наиболее эффективные способы повышения помехоустойчивости и разведзащищенности сетей радиосвязи могут быть реализованы на основе комплексного использования антенных систем, обладающих высокими направленными свойствами, в совокупности с применением следующих методов [1]:

- адаптивного управления уровнем излучаемой мощности передатчиков;
- ретрансляцией сигналов через составные радиолинии;
- использованием разнесенного приема сигналов;
- использованием помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций.

Наиболее эффективными антенными системами, имеющими высокие направленными свойствами и обеспечивающие адаптивное управление формой диаграммы направленности (ДН), являются фазированные антенные решетки (ФАР), которые позволяют [2]:

- формировать диаграмму направленности узконаправленную в направлении корреспондента и имеющую минимальные значения в других направлениях;
- формировать провал в ДН в направлении источников помех;
- обеспечить снижение (минимизацию) мощности радиопередающего устройства (РПДУ) за счет направленного излучения сигналов.



Однако реализация ФАР в основных диапазонах организации наземной и воздушной авиационной радиосвязи (ДКМВ, МВ) связана с известными трудностями [1, 3]. При этом возможности повышения эффективности сетей декаметровая радиосвязи на основе комплексного управления структурой сети и параметрами ее элементов в полной мере не являются исследованными и реализованными.

### Метод параллельной ретрансляции сигналов

Рассмотрим возможность построения в рамках структурной адаптации виртуальной антенной решетки с распределенными на некоторой территории излучающими элементами (передатчиками) [4].

Поскольку антенной решеткой является совокупность излучающих элементов, расположенных в пространстве определенным образом и возбуждаемых одним или совокупностью когерентных источников [2], то расположенные определенным образом в пространстве отдельные передатчики со своими антенными системами также могут являться отдельными излучающими элементами антенной решетки при условии запитки их от одного источника сообщения [4].

Таким образом, адаптивное управление формой диаграммы направленности антенной системы, а, следовательно, ее коэффициентом усиления, может быть реализовано на основе пространственного сложения мощности нескольких передатчиков, объединяемых для параллельной ретрансляции сигналов между источником и получателем сообщений в ФАР с пространственно распределенными элементами.

Рассмотрим сеть радиосвязи, состоящую из узла отправителя сообщения, узла получателя сообщения и  $N$  узлов-ретрансляторов (радиостанций). При этом отправитель сообщения и получатель сообщения так же могут выполнять функции ретрансляторов. Вариант подобной системы представлен на рис. 1.

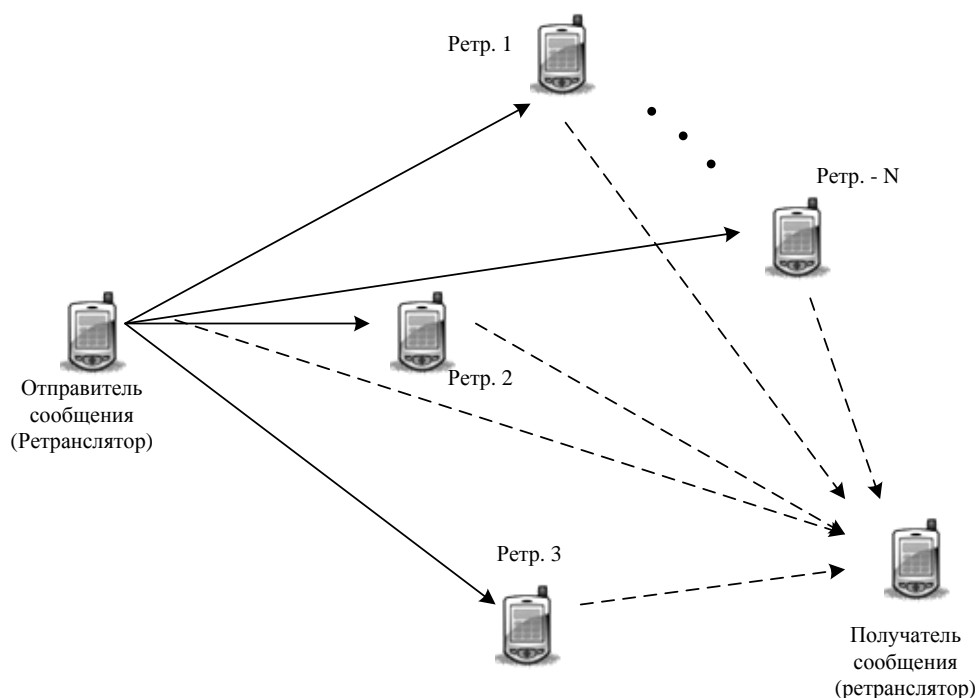


Рисунок 1. Вариант адаптивной сети радиосвязи с параллельной ретрансляцией сигналов

В общем случае узел отправителя сообщения передает свой сигнал, который принимается получателем сообщения, а также может быть принят другими  $N$ -узлами, находящимися в зоне радиодоступа. Если эти узлы готовы поделиться своими ресурсами, они могут направить полученную информацию узла отправителя сообщения в качестве второй копии исходного сигнала, и действовать в качестве ретранслятора для узла отправителя сообщения. Отправителем сообщения может являться маломощная радиостанция или отдельное передающее устройство, находящееся в распоряжении абонента. Такая система представляет собой своего рода виртуальную антенную решетку, состоящую из  $N$ -ретрансляторов (отдельных передатчиков со своими антенными системами), расположенных определенным образом в пространстве (рис. 1).

Принцип работы такой системы заключается в следующем [4]. В общем случае отправитель сообщения является главной радиостанцией. Из совокупности элементов радиосети (Ретр. 1 – Ретр  $N$ ), распределенных на определенной территории, выбирается некоторое количество радиостанций для ретрансляции сигналов главной станции. В процессе параллельной ретрансляции обеспечивается синхронизация передатчиков выбранных ретрансляторов для синфазного сложения радиосигналов в точке приема.

Совокупность ретрансляторов (Ретр. 1 – Ретр  $N$ ) фактически представляет собой ФАР с распределенными в пространстве и не связанными физическими линиями передачи излучателями. Структура рассматриваемой ФАР является переменной (априорно неопределенной) и изменяется в зависимости от расстояния до получателя сообщения, состояния канала связи, оперативной обстановки и других условий связи.

В случае перемещения получателя сообщения могут быть задействованы другие доступные ретрансляторы.

Поскольку расстояния между отправителем сообщения (главной радиостанцией) и ретрансляторами (элементами ФАР) не являются одинаковыми и, в общем случае, изменяются при его перемещении, необходима синхронизация опорных генераторов (ОГ) передатчиков ретрансляторов для обеспечения синфазного сложения их мощности в требуемом пространственном направлении [4].

Синхронизация передатчиков опорным сигналом, формируемым отправителем сообщений (от общего высокостабильного опорного генератора), как это реализовано в активных ФАР [2], не позволит в полной мере решить поставленную задачу из-за стохастичности радиоканала. Различные условия распространения радиоволн, излучаемых отдельными ретрансляторами, приведут к нарушению их синфазности в точке приема. Следовательно, синхронизация передатчиков ретрансляторов должна осуществляться с учетом изменения фазы сигналов в радиоканале, а формирование синхросигналов – станцией получателя сообщений. Такой алгоритм синхронизации рассмотрен в работе [5]. Его реализация возможна при наличии обратной связи между передатчиками и приемниками, которая обеспечивается аппаратурой автоматизации входящая в радиосвязь и ее ведения.

Каждый элемент радиосети при использовании метода параллельной ретрансляции может быть отправителем, ретранслятором или получателем сообщений. Следовательно, данными средствами должны осуществляться дополнительные функции [4]:

- формирование признака главной станции;
- поиск свободных ретрансляторов и выбор оптимальной структуры ФАР;
- формирование адресов ретрансляторов, отправителя и получателя сообщений;
- формирование синхросигналов;
- обработка принятых синхросигналов и формирование управляющих сигналов для автоматической подстройки фазы излучаемых радиосигналов.

Указанные функции могут быть реализованы программно в аппаратуре адаптации перспективных средств радиосвязи 6-го поколения на SDR платформе [7].

Виртуальная ФАР с рассмотренной структурой обеспечит синфазное сложение сигналов ретрансляторов в точке нахождения получателя сообщений и ослабление результирующего сигнала в других направлениях. Это эквивалентно формированию диаграммы направленности (ДН) виртуальной ФАР.

Рассмотрим возможности метода параллельной ретрансляции по повышению разведзащищенности сетей радиосвязи.

Пусть в радиостанциях, входящих в рассматриваемую радиосеть (рис. 1), имеется возможность адаптивного управления мощностью передатчика в диапазоне от 100 до 1000 Вт. При этом каждая радиостанция может работать в следующих режимах:

- автономная работа в радиосети или радионаправлении, земной или пространственной (ионосферной) волной;
- последовательная ретрансляция земной или ионосферной волной;
- параллельная ретрансляция земной или ионосферной волной с пространственным сложением мощности передатчиков.

Последовательная ретрансляция может рассматриваться как частный случай параллельной, когда количество доступных ретрансляторов в зоне радиодоступа снижается до одного.

При отсутствии воздействия систем радио и радиотехнической разведки (РПТР) и радиоэлектронного противодействия (РЭП) противника предполагается работа рассматриваемой адаптивной сети радиосвязи, как правило, в автономном режиме, либо режиме последовательной ретрансляции сигналов через составные радиолинии. При этом в сети необходимо производить мониторинг доступного структурного ресурса и оценку радиочастотной обстановки.

При обнаружении факта воздействия на систему связи систем РПТР и РЭП противника и наличии доступных ретрансляторов осуществляется переход в режим параллельной ретрансляции с формированием виртуальной ФАР. Получатель сообщений осуществляет прием сигналов по параллельным каналам с синфазным сложением мощности и по каналу обратной связи осуществляет синхронизацию передатчиков ретрансляторов.

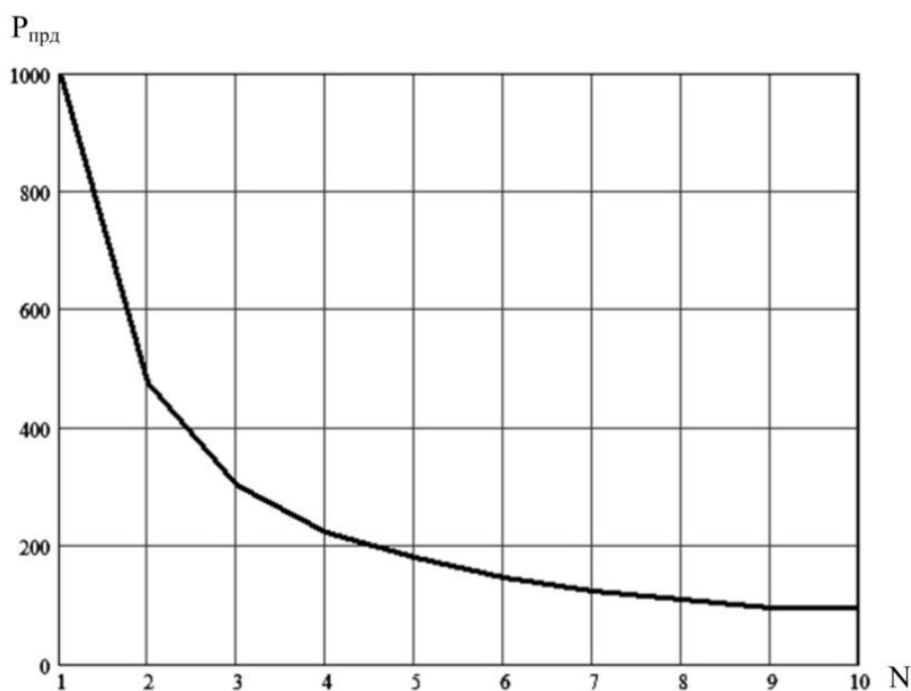
Как следует из уравнения передачи [1], уровень излучаемой мощности передатчиков ретрансляторов при заданном (обеспечивающим требуемую достоверность связи) уровне суммарного сигнала на входе приемника может снижаться пропорционально увеличению коэффициента усиления виртуальной ФАР, состоящей из  $N$ -ретрансляторов до уровня  $P_{\text{пер } i \text{ min}}$ . При этом коэффициент усиления ФАР зависит от количества элементов (ретрансляторов) и слабо зависит от направленных свойств их антенн [2].

Для снижения количества демаскирующих признаков (ДМП) сети, представленной на рис. 1, целесообразно обеспечить равенство мощностей передатчиков, включенных в данный момент в структуру виртуальной ФАР.

Из анализа результатов расчетов, проведенных в работе [7] и представленных на рис.2, следует, что при увеличении количества  $N$  передатчиков в структуре пространственно распределенной ФАР мощность их излучения снижается пропорционально росту коэффициента усиления антенны.

При объединении в АФАР двух передатчиков диапазона ДКМВ их мощность уменьшается в 2,1 раза, четырех – в 4,5 раза, шести – в 6,8 раз, восьми – в 10 раз.

Наибольшая эффективность предлагаемого метода обеспечивается применением от 2 до 6 ретрансляторов. Дальнейшее увеличение их количества приводит к незначительному росту коэффициента усиления.



**Рисунок 2. Зависимость требуемого уровня излучаемой мощности элемента ФАР от количества излучающих элементов**

Системой РРТР ретрансляторы, входящие в состав виртуальной пространственно распределенной ФАР, будут распознаваться как отдельные источники сигналов. Тогда минимизация мощности излучения источников сигналов повышает их разведзащищенность при обеспечении требуемого качества связи. Кроме того, отправитель сообщений остается неизвестным, что приводит к тому, что система РРТР противника не сможет выявить главную радиостанцию и, в общем, не сможет вскрыть состав радиосети.

Необходимо отметить, что повышение разведзащищенности обеспечивает и помехозащищенность системы связи [1].

### Выводы

Предлагаемый метод параллельной ретрансляции сигналов в сетях радиосвязи позволяет при адаптивном управлении коэффициентом усиления формируемой ФАР в условиях структурной адаптации обеспечить минимизацию мощности отдельных передатчиков в рамках параметрической адаптации.

Практическая реализация рассмотренного метода позволит повысить разведзащищенность и помехоустойчивость сетей радиосвязи.

### Библиографический список

1. **Боговик, А.В.** Эффективность системы военной связи и методы ее оценки / А.В. Боговик, В.В. Игнатов. – С.Пб.: ВАС, 2006. – 184 с.
2. **Зырянов, Ю.Т.** Антенны: учеб. пособие / Ю.Т. Зырянов [и др.] – 3-е изд. тер., – С.Пб.: Издательство «Лань», 2018 г. – 412 с.
3. **Березовский, В.А.** Современная дециметровая радиосвязь / В.А. Березовский, В.А. Дулькейт, О.К. Савицкий. – М.: Радиотехника, 2011. – 444 с.

4. **Рябов, А.В.** Особенности пространственного сложения мощности передатчиков декаметрового диапазона // Телекоммуникации: Ежемесячный производственный, научно-технический, информационно-аналитический, и учебно-методический журнал. –М.: Наука и технологии, 2012. – № 9. – С. 22 – 28.

5. **Рябов А.В.** Модернизация метода интегральной аппроксимации апостериорной плотности вероятности в задачах тактовой синхронизации генераторов / А.В. Рябов, П.А. Федюнин, М.Ю. Пресняков // Журнал сибирского федерального университета. – Техника и технологии, 2016. – № 9(4). – Стр. 462-469.

6. **Галкин, В.А.** Основы программно-конфигурируемого радио / В.А, Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 375 с.

7. **Казьмин, А.И.** Модель сети радиосвязи с распределенным структурно-параметрическим ресурсом / А.И. Казьмин, А.В. Рябов // Сб. докладов IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах». (10-12 июля 2017 г.) – г. Тамбов: ТГТУ, 2017. – С. 109-110.

**A.V. Ryabov, A.M. Karpel**

#### **RADIO COMMUNICATION NETWORK WITH PARALLEL RELAYING OF SIGNALS**

Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A method of parallel signal retransmission based on the formation of a virtual phased antenna array with spatially distributed elements is proposed.

**Key words:** reconnaissance, noise immunity, phased array, parallel retransmission

А.А. Першин, Е.В. Головченко

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВОЙ АДАПТИВНОЙ РАДИОСВЯЗИ В ВОЕННО-ТРАНСПОРТНОЙ АВИАЦИИ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Военно-транспортная авиация выполняет множество различных задач на территории РФ и за её пределами. На больших удалениях использование декаметровой радиосвязи (ДКМВ) является основным способом связи по каналу борт ВС-КП ВТА. Зарубежный опыт развития адаптивной декаметровой радиосвязи свидетельствует о перспективности этого направления в авиационной радиосвязи. Существуют некоторые разработки технологий и радиосредств для адаптивного автоматического обмена данными с ВС в РФ. Указанные технологии и методы могут быть применимы для организации авиационной связи.

**Ключевые слова:** декаметровая адаптивная радиосвязь, военно-транспортная авиация, технологии радиосвязи.

Самолёты Воздушно-космических сил (ВКС) могут выполнять различные задачи как в период повседневной деятельности в рамках проведения различных учений, так и в военное время в рамках выполнения боевых задач на театре боевых действий в составе группировки войск. В настоящее время отмечается тенденция к увеличению числа воздушных перевозок. Растущие объемы перевозок воздушным транспортом приводят к перегрузкам каналов управления авиацией. Это, в свою очередь, может привести к снижению безопасности полёта в целом. Дополнительно в условиях выполнения задач в военное время гарантированно ожидается применение противником средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), направленных, в первую очередь, на основные ультракоротковолновые (УКВ) каналы управления авиацией. В связи с этим происходит вынужденный процесс совершенствования методов и способов организации управления воздушным движением, используются спутниковые системы связи, а также повышаются возможности радиолиний передачи данных. Использование новых технологий, как следствие, ведет к усложнениям в конструкции летательных аппаратов. Военно-транспортная авиация РФ непрерывно выполняет задачи по доставке материальных средств и грузов на значительные расстояния. Одними из наиболее сложных задач, решаемых военно-транспортной авиацией, являются задачи по десантированию подразделений ВДВ из состава оперативных воздушных десантов, по доставке вооружения и боеприпасов, техники и грузов, перевозке войск, а также по эвакуации раненых и больных на территории РФ и далеко за ее пределами.

Наличие надежного канала связи в системе управления воздушными судами с командных пунктов (КП) для возможности корректировки задач является обязательным условием. Основной парк воздушных судов военно-транспортной авиации оснащен командными средствами УКВ радиосвязи, а также средствами связи декаметрового (коротковолнового) диапазона. Для обеспечения управления с КП ВТА ВС РФ за пределами прямой видимости на больших удалениях наличие устойчивого канала связи между наземным командным пунктом военно-транспортной авиации возможно лишь с использованием радиостанций декаметрового диапазона.

Декаметровые волны распространяются в основном в виде пространственных ионосферных волн. Обеспечение функционирования образованной системы связи с использованием декаметрового диапазона является сложной задачей, так как образованный канал находится под воздействием внешних факторов случайного характера, из которых наиболее существенны изменения ионосферы Земли и радиопомехи. Эти влияния и воздействия учитываются при составлении волнового расписания, в котором указываются частоты (рабочие и резервные) и время, в которое происходит их смена. Также сложность осуществления бесперебойной и высоконадежной радиосвязи в ДКМВ диапазоне в канале «Борт воздушного судна - наземная станция», в первую очередь, в техническом и организационном плане связано с выполнением задач воздушными судами на высоких скоростях и постоянно меняющейся геофизической обстановкой и соответственно условиями распространения ДКМ радиоволн. Декаметровая радиосвязь обладает рядом особенностей в сравнении с другими видами радиосвязи, к которым можно отнести следующие:

- 1) большую дальность радиосвязи далеко за пределами прямой видимости на расстоянии до 6000 км и более (в зависимости от количества отражений от ионосферы);
- 2) низкую стоимость образованных радиоканалов и более высокую живучесть по сравнению со спутниковыми радиоканалами.

К известным недостаткам систем связи декаметрового диапазона можно отнести низкую пропускную способность, сравнительно большой вес, габариты и энергопотребление аппаратуры. Для поддержания требуемого качества связи, исходя из практики, канал радиосвязи нуждается в постоянной подстройке со стороны оператора. Также наличие ретрансляторов сигнала в системе связи повысит качество образованного канала. Важным является достижения надежности связи при организации канала связи по средствам ДКМВ радиосвязи значения 0,95 - 0,99. Для этого необходимо осуществление комплексной адаптации, которая и позволит производить автоматическую подстройку основных характеристик системы связи в условиях постоянного скоротечного изменения условий распространения радиоволн. Автоматизация процесса поддержания работоспособности канала является перспективным направлением развития ДКМВ связи [1].

В ВВС стран НАТО активно применяются сети ДКМВ радиосвязи. Сети построены на технологиях радиосвязи с использованием технологии передачи данных (CPDLC), включающие бортовой и наземный компоненты. Технология CPDLC обеспечивает обмен данными между пунктами ОВД с использованием диалоговых режимов, осуществляя двусторонний обмен данными между экипажами воздушных судов и органами управления системы ОВД. Такой вид технологии, реализованный в наземной и бортовой системах, позволяет отображать и воспроизводить, а также при необходимости и распечатывать сообщения.

Технологии воздушной радиосвязи, нашедшие свое воплощение в системах адаптивной связи (HFDL и ALE), позволяют производить автоматическое установление и управление между абонентами сети, максимизировать скорости передачи данных и обеспечивать гарантированную доставку сообщений, их автоматическую передачу адресату. Однако система HFDL реализована с использованием огромного количества наземных станций, а система ALE основана на использовании равноправных радиостанций, которые добавляются динамически. К сожалению, в РФ подобных реализованных сетей ДКМВ радиосвязи, как и их стандартов, нет.

Существуют разработки новых технологий и радиосредств для адаптивного автоматического обмена данными с ВС в ДКМВ диапазоне с повышенным качеством и надежностью [2]. Интерес представляет разработанное устройство для анализа и выбора оптимальных авиационных ДКМВ радиоканалов с использованием линейно-частотно-модулированных

(ЛЧМ) сигналов, которое может использоваться для обеспечения высоконадежной ДКМВ радиосвязи. Работа устройства предполагает автоматическое определение наилучшего, оптимального по частоте и направлению ДКМВ-радиоканала в направлении борт ВС - земля за счёт обработки данных наклонного ЛЧМ зондирования по нескольким направлениям, условий распространения радиоволн, помеховой обстановки и оптимальных рабочих частот, выбираемых случайным образом. Осуществляется обеспечение требуемой надежности передачи сообщений 0,95-0,99, адаптированного как по частоте, так и по направлению за счёт использования результатов, полученных вследствие проведения обработки данных наклонного ЛЧМ-зондирования по четырем направлениям. При этом используется специальный алгоритм, который учитывает все факторы, влияющие на канал связи: помеховая обстановка, условия распространения радиоволн и оптимальные рабочие частоты, которые выбираются случайным образом, без предварительного планирования и задания таблицы тестируемых частот. Результат по достижению требуемых диапазонов значений надежности достигается тем, что предложенное устройство, осуществляющее анализ и выбор оптимальных авиационных ДКМ-радиоканалов, включает в себя приемник с антенной сигналов GPS/ГЛОНАСС, содержащий также спецвычислитель. Спецвычислитель осуществляет обработку потоков данных, содержащих разностные квадратурные сигналы, принятые от четырёх наземных зондирующих передатчиков. Приемное устройство имеет четыре канала, включает в себя устройство управления и точного времени, последовательно соединенные с приемной антенной, в качестве которой может быть использована широкополосная активная приемная антенна с фильтрацией входного сигнала, управляемый усилитель высокой частоты (УВЧ), антенный фильтр низких частот, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и четырехканальный приемный процессор. В настоящее время в АО «НПП Полет» разработаны алгоритмы и схема устройства для анализа и выбора оптимальных авиационных ДКМ-радиоканалов с использованием ЛЧМ сигналов. (АО «Научно-производственное предприятие «Полет», дата регистрации патента 17.04.2019 г.) [3].

Приведенные ранее технические устройства и методы могут дать толчок к дальнейшей разработке и созданию отечественных сетей авиационной ДКМВ радиосвязи, при наличии которых существенно повысится «живучесть», пропускная способность каналов «борт воздушного судна - наземная станция». Появится возможность реализовать двусторонний помехозащищенный и закрытый обмен данными в ДКМВ канале при управлении и контроле полетов самолетов ВТА на дальностях до 3000 км; при этом повысится надежность в канале связи до 0,95- 0,97 и скорость обмена данными от 300 до 9600 бит/с:

- унификация обмена данными воздушной связи с ЛА разных родов авиации;
- обмен информацией экипажей ЛА, терпящих бедствие, с ПУ, центрами ЕС ОрВД и средствами поисково-спасательного обеспечения за пределами радиогоризонта [4].

Использование концепции создания единой сети авиационной ДКМВ радиосвязи для воздушных судов военно-транспортной авиации и дальней авиации, основанной на использовании равноправных радиостанций, участники к которой добавляются динамически в сочетании с наземными станциями, даст возможность охватить намного большие площади за пределами РФ, а самое главное в районе проведения операций на театре военных действий в любой точке земного шара.

Дальнейшая практическая реализация собственных технологий воздушной радиосвязи, способов обеспечения надежных каналов связи с воздушными судами военно-транспортной авиации при выполнении ими сложнейших задач в мирное и военное время с использованием каналов связи, образованных по средствам адаптивной ДКМВ радиосвязи, позволит максимизировать скорости передачи данных и обеспечивать гарантированную доставку сообще-



ний. В связи с большими объемами задач, решаемых за пределами РФ, поддержание требуемого состояния безопасности полетов совместно с другими воздушными судами в условиях сокращенных интервалов возможно лишь с использованием адаптивных ДКМВ каналов.

### **Библиографический список**

1. **Антонюк, Л.Я.** Эффективность радиосвязи и методы её оценки / Л.Я. Антонюк, В.В. Игнатов. – СПб.: ВАС, 1994. – 138 с.
2. АО «НТЦ Промтехазро». Технический проект ОКР «Арго» ПАВУ.466535.010 ПЗ 1-3, конструкторская и эксплуатационная документация литеры «О» на адаптивный радиотехнический комплекс (АРТК) ПАВУ.466535.010, состоящий из наземного (АРТК-Н) и бортового (АРТК-Б) сегментов.
3. Акционерное общество «Научно- производственное предприятие «Полёт». Описание изобретения к патенту RU № 2685245.
4. ЦНИИ ВВС. Научно- технический отчёт «Результаты трассовых испытаний экспериментальных образцов адаптивных авиационных ДКМВ радиостанций на трассе Ногинск-Н.Новгород», созданных рамках ОКР «Арго».

**A.A. Pershin, E.V. Golovchenko**

### **PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF DECAMETER ADAPTIVE RADIO COMMUNICATIONS IN MILITARY TRANSPORT AVIATION**

Air Force Academy named by professors N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin

Military transport aviation performs many different tasks on the territory of the Russian Federation and beyond. The use of decameter radio communication is an alternative way of communication via the channel of aircraft- command point military transport aviation at long distances. Foreign experience in the development of adaptive decameter radio communications indicates the prospects of this area in aviation radio communications. There are some developments of technologies and radio facilities for adaptive automatic data exchange with aircraft in the Russian Federation. Technologies and methods may be applicable for the organization of aviation communications.

**Key words:** decameter adaptive radio communications, military transport aviation, radio communications technologies.

Н.Н. Акимов<sup>1</sup>, В.А. Кольцов<sup>1</sup>, А.Ю. Павлин<sup>1</sup>, В.Р. Милов<sup>2</sup>, А.Ю. Кербенева<sup>2</sup>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ СВУ АСУ ТП АЭС

<sup>1</sup> Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Работа посвящена описанию математической модели, составляющей основу системы поддержки принятия решений при обеспечении кибербезопасности системы верхнего уровня автоматизированной системы управления технологическими процессами атомной электростанции (СВУ АСУ ТП АЭС). Алгоритм поддержки принятия решений позволяет найти и ранжировать предпочтительные конфигурации средств защиты информации.

**Ключевые слова:** поддержка принятия решений, кибербезопасность, АСУ ТП, АЭС.

Обеспечение кибербезопасности объектов критической инфраструктуры [1, 2] регламентируется обширной международной и национальной (отечественной) нормативной базой. Основными отечественными нормативными документами являются приказы ФСТЭК. При обеспечении кибербезопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС) используются приказы ФСТЭК России № 31 от 14.03.2014, № 235 от 21.12.2017, № 239 от 25.12.2017, а также стандарты международной электротехнической комиссии IEC 63096, IEC 62645 и др.

Техническое задание на проектирование системы обеспечения кибербезопасности системы верхнего уровня (СВУ) АСУ ТП АЭС включает указание на один или несколько нормативных документов и класс защищенности автоматизированной системы управления, которые определяют совокупность мер, составляющих искомую конфигурацию средств защиты (рис. 1).

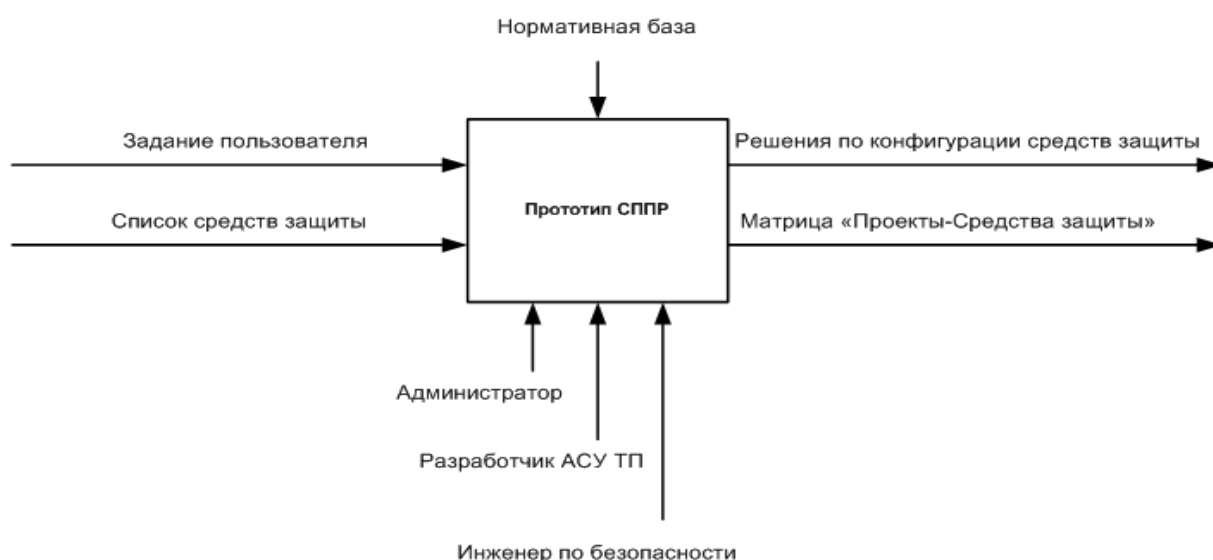


Рисунок 1. Контекстная диаграмма A0 прототипа системы поддержки принятия решений

Приказы ФСТЭК № 31 и № 239 содержат списки мер защиты информации в АСУ, которые распределены по следующим 17-и группам:

- I. Идентификация и аутентификация (ИАФ)
- II. Управление доступом (УПД)
- III. Ограничение программной среды (ОПС)
- IV. Защита машинных носителей информации (ЗНИ)
- V. Аудит безопасности (АУД)
- VI. Антивирусная защита (АВЗ)
- VII. Предотвращение вторжений (компьютерных атак) (СОВ)
- VIII. Обеспечение целостности (ОЦЛ)
- IX. Обеспечение доступности (ОДТ)
- X. Защита технических средств и систем (ЗТС)
- XI. Защита информационной (автоматизированной) системы и ее компонентов (ЗИС)
- XII. Реагирование на компьютерные инциденты (ИНЦ)
- XIII. Управление конфигурацией (УКФ)
- XIV. Управление обновлениями программного обеспечения (ОПО)
- XV. Планирование мероприятий по обеспечению безопасности (ПЛН)
- XVI. Обеспечение действий в нештатных ситуациях (ДНС)
- XVII. Информирование и обучение персонала (ИПО)

Фрагмент состава мер антивирусной защиты (АВЗ) и их базовых наборов для соответствующих классов защищенности АСУ согласно Приложению N 2 приказа ФСТЭК № 31 представлен в таблице.

#### Меры антивирусной защиты (АВЗ) и их базовые наборы

Условное обозначение и номер меры	Меры защиты информации в АСУ	Классы защищенности АСУ		
		3	2	1
АВЗ.0	Регламентация правил и процедур антивирусной защиты	+	+	+
АВЗ.1	Реализация антивирусной защиты	+	+	+
АВЗ.2	Антивирусная защита электронной почты и иных сервисов	+	+	+
АВЗ.3	Контроль использования архивных, исполняемых и зашифрованных файлов			+
АВЗ.4	Обновление базы данных признаков вредоносных компьютерных программ (вирусов)	+	+	+
АВЗ.5	Использование средств антивирусной защиты различных производителей			+

Проектирование системы обеспечения кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС [1, 2] заключается в выборе совокупности средств защиты, покрывающих все  $M$  мер, определенных нормативным документом согласно требованиям ТЗ. Для поддержки жизненного цикла проектирования информационно-управляющих систем [3] и автоматизации процесса определения конфигурации средств защиты информации выполняется разработка системы поддержки

принятия решений (СППР). Основу СППР составляет математическая модель, позволяющая формализовать показатели качества конфигураций средств защиты.

Определим  $k$ -ю конфигурацию средств защиты как вектор  $\mathbf{v}_k = [v_{1k}, \dots, v_{Nk}]^T$ , где  $N$  – количество всех доступных для применения средств защиты. Компоненты вектора конфигурации средств  $v_{nk} = 1$ , если  $n$ -е средство используется в  $k$ -й конфигурации и  $v_{nk} = 0$  в противном случае. Каждое средство защиты характеризуется стоимостью  $c_n, n = \overline{1, N}$ . Тогда стоимость совокупности средств защиты, соответствующих  $k$ -й конфигурации, определяется выражением

$$C_k = \sum_{n=1}^N v_{nk} c_n = \mathbf{c}^T \mathbf{v}_k.$$

Здесь  $\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_N]^T$  – вектор стоимостей отдельных средств защиты. Каждое средство защиты покрывает одну или несколько мер защиты, что представляется вектором  $d_n = [d_{1n}, \dots, d_{Mn}]^T$ . Все доступные для применения средства защиты могут быть охарактеризованы  $(M \times N)$  матрицей  $\mathbf{D}$  «меры-средства». Элементы этой матрицы  $d_{mn} = 1$ , если  $n$ -е средство покрывает  $m$ -ю меру и  $d_{mn} = 0$  в противном случае.

Множество допустимых конфигураций средств защиты составляют те меры, которые обеспечивают защищенность объекта защиты. Условие защищенности является выполненным при наличии в  $k$ -й конфигурации средства защиты для каждой меры. Для проверки условия защищенности введем вектор

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{D} \mathbf{v}_k,$$

компоненты которого равны количеству средств, покрывающих соответствующие меры. Если для  $k$ -й конфигурации средств  $a_{mk} \geq 1, m = \overline{1, M}$ , то защищенность АСУ ТП будет обеспечена. Представим условие защищенности в виде  $s_k \geq 1$ , где

$$s_k = \min_{m=1, M} a_{mk}.$$

Условие защищенности будет выполняться в случае, когда все компоненты вектора  $a_{mk} = 1, m = \overline{1, M}$ . При этом каждая мера покрывается одним средством, что является достаточным для обеспечения защищенности. Однако на практике ряд мер могут быть покрыты несколькими средствами, что приводит к избыточности полученного решения.

Задача поиска допустимых конфигураций средств, обеспечивающих защищенность объекта защиты, может быть представлена, как задача о нахождении столбцового покрытия булевой матрицы. Эта задача заключается в поиске множества столбцов, покрывающих все строки матрицы  $\mathbf{D}$  «меры-средства». Говорят [4], что  $m$ -я строка покрывается  $n$ -м столбцом, если в  $m$ -й строке  $n$ -го столбца стоит единица, то есть  $d_{mn} = 1$ . Соответственно  $m$ -я мера покрывается  $n$ -м средством защиты. Обычно при решении задачи о покрытии булевых матриц требуется найти наименьшее (по мощности) столбцовое покрытие, то есть наименьшее количество столбцов матрицы  $\mathbf{D}$ , покрывающих все строки.

В рассматриваемой задаче поддержки принятия решений при определении совокупности средств защиты требуется найти вариант, характеризующейся наименьшей стоимостью

$$\hat{k} = \arg \min_{k \in K_s} C_k,$$

где  $K_s$  – множество индексов, соответствующих допустимым конфигурациям средств. Для поиска оптимального решения можно применить варианты алгоритма ограниченного перебора. Учитывая большую разреженность матрицы  $\mathbf{D}$ , в качестве базового алгоритма предлагается использовать разработанный в [4] алгоритм, в процессе функционирования которого формируется дерево перебора покрытий. Комбинирование этого алгоритма с методом ветвей и границ может составить основу для СППР при обеспечении кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС.

Дальнейшее развитие математической модели СППР основано на учете экспертных оценок результативностей применения средств защиты  $g_n, n = \overline{1, N}$ . Эти оценки определяются на основе сведений, полученных в результате удачного или неудачного применения средств защиты на эксплуатируемых АЭС. Характеристика результативности применения средства защиты определена в виде порядковой переменной, принимающей следующие значения:

- А – средство применялось успешно;
- В – средство ранее не применялось (новое средство);
- С – средство применялось и были выявлены недочеты;
- Д – средство снято с производства;
- Е – средство не рекомендовано к применению.

Тогда для допустимых конфигураций с номерами  $k \in K_s$  в результате группировки найдутся частоты и относительные частоты  $q_1, \dots, q_5$  средств со значениями результативности А, В, С, Д и Е которые могут быть графически представлены в СППР с помощью гистограммы. Очевидно, что предпочтительными являются конфигурации, в которых как можно больше средств защиты находятся в состоянии А и небольшая часть в состояниях В и/или С. В то же время выбор способа и функции агрегирования результативности конфигурации средств защиты  $Q_k = f(\mathbf{q}_k)$  представляет предмет отдельного исследования. Здесь  $\mathbf{q}_k = [q_{1k}, \dots, q_{5k}]^T$  – вектор результативности средств защиты для  $k$ -й конфигурации.

Учет наряду со стоимостью  $C_k$  показателя результативности  $Q_k$  приводит к бикритериальной задаче поддержки принятия решений по выбору конфигурации средств защиты при наличии ограничения, представляющего условие защищенности  $s_k \geq 1$ . Решение этой задачи методом ограниченного перебора реализовано в прототипе СППР (рис. 2).

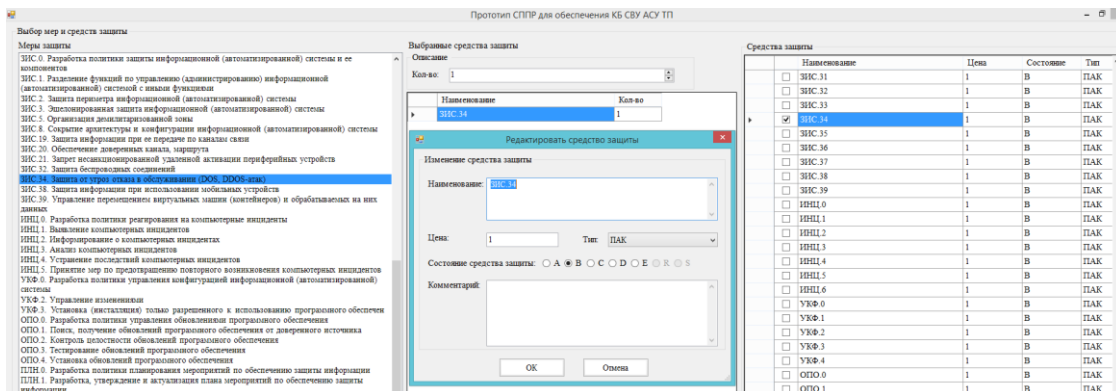


Рисунок 2. Интерфейс редактирования средств защиты

Таким образом, предложена математическая модель, составившая основу для разработанного прототипа СППР при выборе конфигураций средств защиты, обеспечивающих кибербезопасность СВУ АСУ ТП АЭС.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №08-08-06041 и №10-08-06049.*

### Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС / С.М. Дмитриев, Н.Н. Акимов, В.А. Кольцов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8. С. 7–13.
2. **Акимов Н.Н.** Элементы концептуальной модели обеспечения кибербезопасности критически важных промышленных объектов / Н.Н. Акимов, В.Р. Милов, Ю.С. Егоров // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ – 2018). – Н. Новгород: НГТУ, 2018. С. 463–467.
3. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.
4. **Леончик, П.В.** Алгоритм поиска покрытия разреженных булевых матриц // Информатика. 2007. № 2. С. 53 – 61.

**N.N. Akimov<sup>1</sup>, V.A. Koltsov<sup>1</sup>, A.Y. Pavlin<sup>1</sup>, V.R. Milov<sup>2</sup>, A.Y. Kerbeneva<sup>2</sup>**

### MATHEMATICAL MODEL OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CYBERSECURITY OF NUCLEAR POWER PLANT INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM

<sup>1</sup>Branch of «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» (RFNC-VNIIEF)  
«NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The article is devoted to the description of a mathematical model of a decision support system (DSS). This DSS is designed to ensure the cyber security nuclear power plant (NPP) industrial control system (ICS). The decision support algorithm finds and ranks preferred configurations of information security tools.

**Keywords:** decision support, cyber security, Industrial control system (ICS), Nuclear power station.

Д.В. Баранов

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ РАША ДЛЯ ОЦЕНКИ КОМПЕТЕНЦИЙ СОТРУДНИКОВ В КРАУДСОРСИНГОВЫХ ПРОЕКТАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье рассмотрены проблемы развития модели Раша в применении к краудсорсинговым проектам. Обозначены особенности настройки параметров этой модели с учётом многомерных компетенций. Намечены направления развития этой модели.

**Ключевые слова:** виртуальные организации, оценка компетенций, системы поддержки принятия решений, тестирование сотрудников.

В настоящее время интенсивно развивается краудсорсинг (от англ. *crowdsourcing*, от *crowd* — толпа и *sourcing* — использование ресурсов) – вовлечение большого количества людей для совместной работы с использованием современных интернет-технологий в качестве среды для коллективной деятельности [7]. Важной потребностью краудсорсинговых команд является создание модели тестирования и управления компетенциями, благодаря которой можно повысить вероятность успешной работы команды. «Главный принцип краудсорсинга гласит: у группы знаний больше, чем у отдельного человека. Вся хитрость в том, чтобы создать условия для реализации этих знаний»[4].

Пример краудсорсинговой платформы – GoDesigner, где работодатель предлагает свое задание, например, создание названия компании, логотипа, фирменного стиля, требования, сроки и заявляемый гонорар (призовой фонд) за выполнение, затем получает варианты сделанного задания и выбирает из них наилучший. Участникам этого интернет-сервиса предлагаемые задачи высылаются на электронную почту и разработчики (группы разработчиков) в инициативном порядке работают над проблемой. При этом участвовать могут все желающие, но вознаграждение получает только разработчик (группа), предложивший лучшее решение.

Другие сервисы: Wovle – отечественный стартап, который позиционируется как первый интернет-работодатель в России, Huddle – британская частная облачная компания по разработке программного обеспечения.

К краудсорсинговым проектам можно отнести создание Википедии и других проектов на платформе вики. Эффект коллективного интеллекта позволяет решать сложные проблемы.

ПО по найму сотрудников было также представлено компанией Amazon, но его отвергли из-за предпочтения по половому признаку (программа выбирала преимущественно мужчин).

Для работы с краудсорсинговыми командами применяются и стандартные сервисы проектного управления Microsoft Project, Covisint, Project Caiser и др.

Краудсорсинговые проекты и команды характеризуются меритократией. Буквально это слово означает «власть достойных», то есть приоритет способностей при назначении на какую-либо должность. С другой стороны, практика показывает, что в описываемых проектах становится важнее всего выпускаемый продукт, а кто его делает – это не так важно (как в

Википедии). Но в случае узкопрофильных задач, требующих высокого уровня подготовки, разработка моделей оценки контроля способностей сотрудников становится необходимой. Поскольку способности не дают исчерпывающей гарантии выполнения задания, модель должна иметь вероятностный характер.

Отметим критерии результативности. Они основаны на показателях «треугольника проекта» – время, цена и качество. Во времени главное – своевременность, в цене – соответствие бюджету, а показателем качества (правильности выполнения) могут являться оценки за исполнение проекта.

Распространенный подход к моделированию компетенций представляет современная теория тестирования – IRT (Item Response Theory). Теория основана на предположении о латентных параметрах, которые напрямую не измеримы, но раскрываются через другие параметры. Пример латентного параметра вообще – уровень жизни населения – он определяется совокупностью разных показателей (индикаторных переменных), например, средней зарплатой в регионе, средним потреблением мяса и т.д. [2].

Основная модель IRT – это модель датского математика Г. Раша (1901 – 1990)

$$P_{ij} = \frac{e^{(\beta_i - \theta_j)}}{1 + e^{(\beta_i - \theta_j)}}, \quad (1)$$

где  $P_{ij}$  – вероятность выполнения тестового задания  $j$  с трудностью  $\theta_j$  испытуемым  $i$  с уровнем подготовки  $\beta_i$  [1].

Известны и ее модификации – трехпараметрическая модель Бирнбаума (с добавлением параметра угадывания и чувствительности задания, связанной с дисперсией), четырехпараметрическая модель Раша (менее используемая из-за своей сложности) [1].

Рассмотрим дихотомическую и политомическую модель Раша.

В дихотомической модели данные для обучения (оценки параметров) – это элементы матрицы  $x_{ij}$  ( $i$  – испытуемый,  $j$  – задание) выполнения задания, принимающие значения 0 и 1 при выполненном и невыполненном задании соответственно. Иными словами, в «классической» модели Раша ответы на вопросы оцениваются в бинарной шкале: правильно или неправильно. При этом множество оценок имеет вид  $\{0, 1\}$ . Матрица исходных данных  $\mathbf{X}$  представляет собой обучающую выборку для оценки параметров логистической модели (1). Оценка параметров  $\beta_i$  и  $\theta_j$  может осуществляться по методу наименьших квадратов или с помощью метода максимального правдоподобия [2].

В более общем случае отдельные вопросы и особенно задания могут оцениваться в порядковой шкале с несколькими значениями. При этом множество оценок (баллов) содержит более двух элементов, например, {«неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично»} или {2, 3, 4, 5}.

Тогда используемая модель обработки результатов тестирования должна оценивать вероятности получения различных баллов  $P_2, P_3, P_4, P_5$  за ответ на вопрос или решение тестовой задачи. Это реализуется в политомической модели, где элементы матрицы исходных данных  $\mathbf{X}$  (обучающей выборки) могут принимать значения в зависимости от используемой системы оценок.

Оценка параметров политомической модели методом дисперсионного анализа представлено J.M. Linacre в статье [6].

Отметим следующие направления развития модели Раша.



## 1. Обучение с пропусками.

Многие системы тестирования работают в режиме случайной выборки заданного количества вопросов из множества всех вопросов.

В результате выборка (таблица с количеством столбцов, равным числу вопросов) в каждой строке (содержащей результаты одного из тестируемых) содержит пропуски, возникающие, когда тестируемый не дает ответа и пропускает вопрос.

В другом случае тест может содержать  $N$  вопросов, а при тестировании каждому студенту выдается  $K$  случайно выбранных вопросов. Тогда каждая строка выборки будет содержать  $(N-K)/K$  пропущенных значений.

Оценка латентных параметров модели Раша методом наименьших квадратов и максимального правдоподобия без пропусков и с пропусками реализована и показана в статье [2].

## 2. Анализ нескольких компетенций.

В процессе обучения студенты проходят различные тесты по различным дисциплинам и демонстрируют различную успеваемость, связанную с различной подготовленностью по различным дисциплинам. Разработчики также обладают различной подготовленностью к решению различных классов задач (например, разработка графического интерфейса, базы данных, процедур обработки информации и т.д.). Поэтому способности субъектов характеризуются не скалярной величиной (например, IQ), а вектором компетенций.

Как принять учет многомерных компетенций?

Если в классической модели Раша оцениваются скалярные компетенции  $\beta_i$  различных сотрудников, то в более общем случае компетенции сотрудников могут быть представлены вектором. Компетенции, требуемые для решения необходимых задач, можно представить в виде матрицы  $W$ . Например, матрица

$$W := \begin{pmatrix} 1 & 0.8 \\ 0.7 & 0.5 \\ 0.6 & 1 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix}$$

приведена для случая двух задач, для решения которых нужны четыре компетенции (владение объектно-ориентированными технологиями, умение создавать интерфейс, знание языка программирования, умение быстро находить решение проблемы).

Модель Раша с учетом многомерных компетенций, называемая, соответственно, многомерной, описана в книге J. Hartig [5, с. 81].

В работе предложена модификация многомерной модели

$$P_{ij} = \frac{e^{\sum_{k=1}^K (\beta_{ik} - \theta_{jk})}}{1 + e^{\sum_{k=1}^K (\beta_{ik} - \theta_{jk})}}, \quad (2)$$

где  $K$  – число требуемых и имеющихся компетенций.

Применение описанных процедур в краудсорсинговых командах позволит повысить эффективность этих команд.

В дальнейшем на основе разработанных процедур предполагается реализация прототипа системы поддержки принятия решений для назначения заданий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. **Айдаркин, Д.В.** Математические методы анализа результатов тестирования // Научный вестник УВАУ ГА(И), 2011, т. 3. С. 22 – 28
2. **Маслак, А.А.** Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов / А.А. Маслак, С.И. Моисеев, С.А. Осипов // Проблемы управления, № 5, 2015. С. 58 – 66
3. **Уваров И.Д.** Разработка корпоративной системы интерактивного обучения / И.Д. Уваров [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. № 3. - С. 56-62.
4. **Хау, Дж.** Краудсорсинг: Коллективный разум как инструмент развития бизнеса / Джефф Хау; Пер. с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2012. – 288 с.
5. **Hartig, J., Klieme E., Leutner D. (Eds.).** Assessment of Competencies in Educational Contexts. Göttingen, Hogrefe Publishing GmbH. 2008
6. **Linacre, J.M.** Estimating Rasch measures with known polytomous item difficulties // Rasch Measurement Transactions, 1998. Vol 12 (2). P. 638
7. **Коротких, Е.Ю.** Краудсорсинг как эффективный метод повышения конкурентоспособности организации // Материалы VI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» // Электронный ресурс, режим доступа: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014003909> (дата обращения: 30.01.2020)

**D.V. Baranov**

### **FEATURES OF SETTING PARAMETERS OF THE POLITOMICAL RACH MODEL IN CRAWDSORCING PROJECTS TAKING INTO ACCOUNT MULTI-DIMENSIONAL COMPETENCES AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF THIS MODEL**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The article discusses the problems of development the Rasch model as applied to crowdsourcing projects. The features of designating the parameters of this model taking into account multidimensional competencies are indicated. The development directions of this model are outlined.

**Keywords:** virtualorganization, competency assessment, decision support systems, employment testing.

Д.И. Киров, Г.Б. Бронфельд

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С БАЗОЙ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ МОЛИНГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается подход к применению логического вывода в интеллектуальной системе с базой знаний из молинг, созданной с применением технологии прямого наложения знаний (ТПНЗ). ТПНЗ обеспечивается моделью знаний – молингами, представляющими предложения текстов. Решение задач интеллектуальной системой проводится пользователем на основе диалого-ассоциативного поиска по базе знаний с промежуточными результатами, полученными при логическом выводе.

**Ключевые слова.** Машина вывода, логический вывод, знания, текст, молинга, интеллектуальная система.

### Введение

Ключевым элементом интеллектуальной системы (ИС) является машина вывода, реализующая определенный алгоритм или же алгоритмы логического вывода (ЛВ), в значительной мере определяющая их эффективность. Имеется множество разновидностей и подходов, в т.ч. для ИС, построенных на разных принципах и разного назначения [1-3]. Рассмотрим некоторые особенности ЛВ в ИС, основанных на базах знаний (БЗ), построенных по технологии «прямого наложения знаний» (ТПНЗ) [4 - 7].

Знания содержатся в неких источниках: книгах, документах, описаниях, стандартах, статьях и т.п. Все эти источники будем называть текстами в соответствии с общепринятым подходом в лингвистике [6,8-10]. Специалистов при решении текущих проблем, как творческих, так и совершенно рутинных, интересуют тексты, связанные общим тематическим направлением, близким к их деятельности, и имеющие некоторые внутренние связи между собой. Такие множества называются свертками [6-8].

Для создания ИС на основе ТПНЗ используется специальный способ моделирования знаний с помощью молинг [4-7], поскольку известные иные способы, такие как продукционные модели, логические модели, семантические сети, фреймы [1] и многие другие, сложны в применении для поставленной задачи. В них два ключевых недостатка – практическая невозможность для большинства известных моделей использовать их в рамках ТПНЗ [1, 2, 10], а второй, сложность получения после ЛВ ответа в виде достаточно развернутого связного текста. Конечно, во многих практических реализациях ИС это уже научились делать, например, с помощью специальных методов лингвистической обработки, или даже лингвистических процессоров. Тем не менее, это серьезные дополнительные сложности, привносящие свои проблемы при практической реализации [11-17].

### Основы применения алгоритмов логического вывода в ИС с ТПНЗ

Составляющие части ИС включают программные средства, реализующие машину вывода, интеллектуальный интерфейс, БЗ и сервисные и вспомогательные программы. БЗ включает в

себя словари терминов, отношений и др. (и их эквивалентов), собственно знания в виде модели, расчетные модели, визуальные и графические образы.

Структура описываемой ИС в общем виде представлена на рис 1.

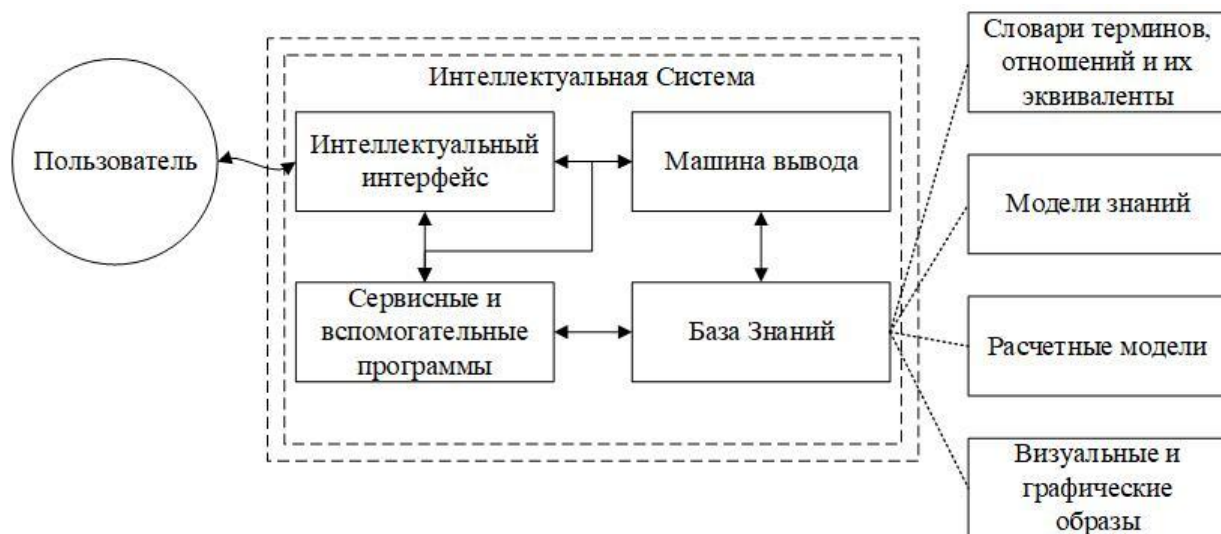


Рисунок 1. Структура ИС

В число основных режимов работы (рис. 2) системы входят: отдельный режим ввода знаний и рабочие режимы – режим ввода знаний, режим работы с диалогом, режим ЛВ, режим вывода исходных текстов и режим когезии.

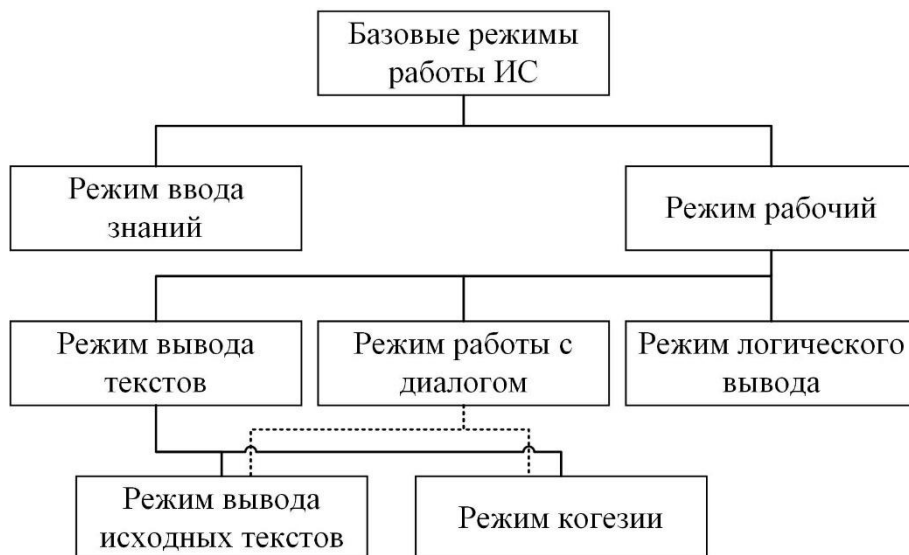


Рисунок 2. Режимы работы ИС

Режим ввода знаний задействуется еще до начала поиска решений для наполнения или пополнения БЗ. Режим вывода текстов используется как для реконструкции из моделей секций источника (вывод исходных текстов, фрагментов или полностью), так и для вывода окружения определенных моделей для уточнения контекста, локально связанного с ними (режим когезии).

Режим ЛВ позволяет искать взаимосвязи в тексте между отдельными моделями знаний – молингами.

Режим ЛВ реализуется отдельной программой - машиной вывода, с участием в ее работе блока БЗ и блока взаимодействия с пользователем. Машина вывода основана на достаточно известных принципах [1-3, 5-7], только результаты работы с БЗ с новыми моделями знаний получаются несколько необычными.

Здесь роль ЛВ иная, чем в [1-3,11-17]. В этих примерах большей частью ответы получаются автоматически (кроме обычных экспертных систем), в данной ИС все они носят вспомогательный характер для реализации диалого-ассоциативного поиска. При нем во взаимодействии с ИС пользователь сам выбирает, какие из ответов, полученных в процессе ЛВ, ему подходят и сам периодически меняет режим работы. В процессе работы пользователь может включать режим когезии [10] или вывода исходных текстов.

Одной из основных особенностей данной реализации является то, что применяемые модели знаний – молинги – имеют определенную структуру [4-7], где ядро  $Z$  – это простое предложение со своим уровнем достоверности – фактором уверенности (ФУ). Именно простое предложение с точки зрения лингвистики [9] является «основным носителем мысли» в тексте. В совокупности с кодовой последовательностью словарей  $K$  такое представление имеет вид закодированных маленьких семантических сетей специального вида [4-7], что обеспечивает применимость к БЗ из молинг давно отработанные методы анализа семантических сетей, если в этом возникнет необходимость.

Следует также отметить, что в таких ИС на каждом этапе диалого-ассоциативного вывода рассматривается поиск разных вариантов цепочек вывода между двумя заданными пользователем терминами. В процессе вывода количество используемых в поиске молинг ограничено шестью итерациями («шагами» вывода) в соответствии с правилом Ю.Н. Караулова [18] «правилом шести шагов» - «цепочка, связывающая любые два слова из словаря не только существует, но и для произвольно выбранных слов она никогда в сумме не превышает шести шагов до второго слова». Но этих цепочек может быть много и цепочки могут обладать разным уровнем достоверности на основе ФУ.

Для ИС на базе ТПНЗ используется подход на основе пересматриваемой аргументации, описанный в [3] и основанный на пяти составляющих:

- 1) логический язык, лежащий в основе;
- 2) определение аргументов;
- 3) определение конфликта между аргументами;
- 4) определение поражения аргументов-неудачников;
- 5) определение оценки аргументов, которая может использоваться для определения пересматриваемого логического следствия.

В нашей ситуации связь между некоторыми утверждениями (молингами)  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{j1}$  находится на основе правила из классической математической логики *modus ponens*, - «если известно, что истинно утверждение  $\Phi_{i1}$  и истинно правило вида «ЕСЛИ  $\Phi_{i1}$ , ТО  $\Phi_{j1}$ », тогда утверждение  $\Phi_{j1}$  также истинно». Или, как иначе представлено в (1),

$$\frac{\Phi_{i1}, \Phi_{j1}}{\Phi_{j1}} \rightarrow T . \quad (1)$$

И так по цепочке последовательно находится связь между заданными пользователем терминами.

На практике это работает следующим образом - машина вывода циклична. В каждом цикле просматриваются молинги, чтобы выявить те, где термины совпадают с терминами из блока рабочей памяти. После выбора молинги новые термины из нее заносятся в блок рабочей части диалога для дальнейшего вывода, и цикл повторяется. В ходе одного цикла к цепочке ЛВ добавляется только одна молинга. Если несколько молинг соответствуют набору терминов в блоке рабочей памяти, то происходит ветвление, порождая новые варианты текущей цепочки ЛВ. Если ни одна из найденных молинг не является новой для цепи (еще не использовалась в ней), и цель поиска еще не достигнута, то данная цепь считается тупиковой и отбрасывается.

Результат вывода получается совершенно искусственно, но с точки зрения лингвистики такой текст все равно является связным и имеет некий смысл. В некотором роде, здесь реализуется алгоритм поиска ближайших соседей [19] – по «косвенным» признакам находятся «близкие» (по смыслу) соседи, а наличие определенных «начальной точки» и «цели» обеспечивают характер направленности поисковому запросу.

На рис. 3 показан пример вывода в условной модели реального текста.

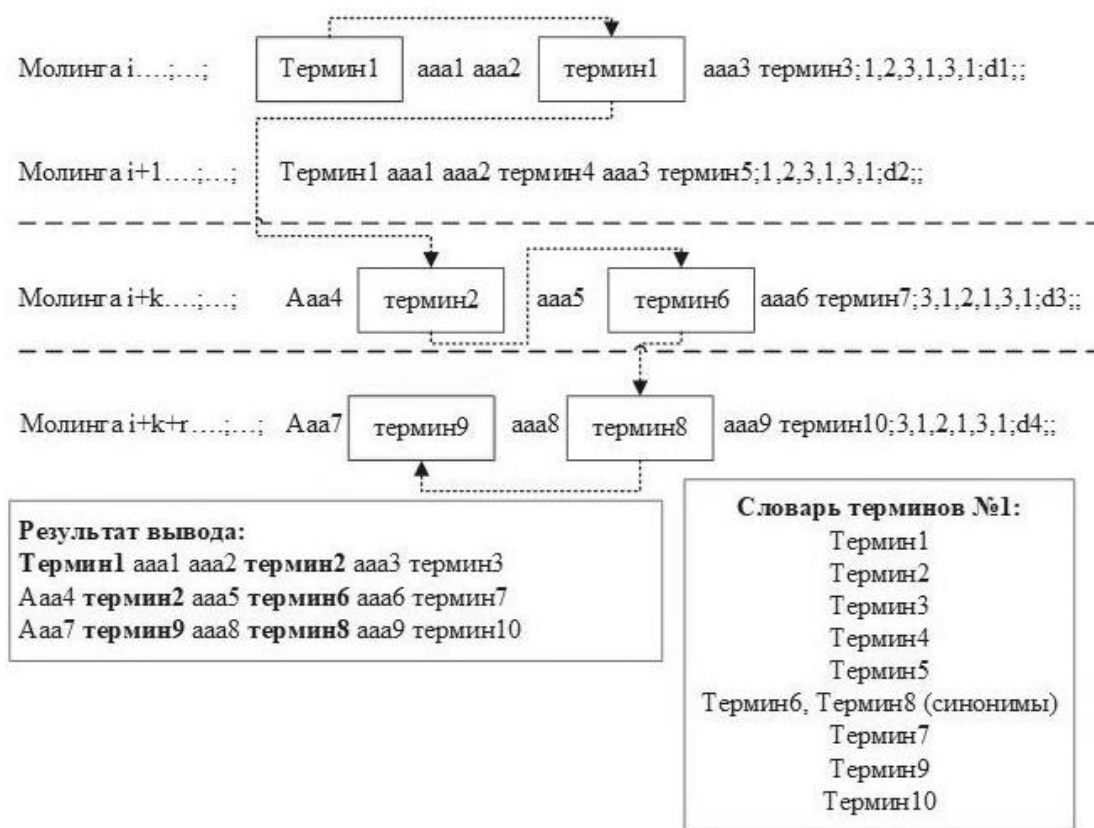


Рисунок 3. Пример процесс ЛВ

В такой реализации ЛВ возникает быстрое наращивание количества вариантов связей между ядрами молинг через различные термины и, соответственно, резко увеличивается количество вариантов сочетаний молинг при задании даже простых запросов. В противовес этому процессу поставлен традиционный алгоритм эвристического поиска с оценочной функцией [2], ограничивающей число перебираемых вариантов. Для сортировки результатов используется оценка ФУ цепочек ЛВ. Первыми будут выдаваться по ФУ ядра молинг, где находятся оба запрашиваемых термина, потом два соседних ядра молинг, потом из трех и т.д. Лавинообразное нарастание объема результатов вывода обычно происходит на трех и более шагах.

С практической точки зрения, при диалого-ассоциативном поиске пользователю нужны только первые варианты, чтобы поскорее выйти на конечный результат. В тоже время при более полном ознакомлении с изучаемой проблемой, в том числе через уточнения запросов пользователь все равно выйдет на нужную ему «глубину» взаимосвязей.

Пользователь, просматривая содержимое в полученной последовательности ядер молинг (фактически – группы последовательностей простых предложений, семантически связанных между собой [6,7,10]), сам решает, удовлетворяет его этот результат или нет, выбирает и фиксирует его в памяти программы, и может продолжить поиск с новых стартовых позиций.

Если полученный ответ его полностью не устраивает, пользователь имеет возможность или повторно запустить режим ЛВ с новыми вариантами запроса, или по выбранному им ядру молинга запустить режим когезии (вывод по локальной связанности текста относительно конкретного предложения в исходном тексте, соответствующей абзацу исходного текста) [10] или когерентности (вывод по глобальной связанности текста через одинаковые термины (заголовки), относительного конкретного упомянутого и выбранного исходного текста из нескольких идентификаторов) [10] для уточнения контекста и смысла вложенного в про- моделированное предложение.

Одна и та же молинга может содержаться в нескольких местах источника, или даже в разных источниках, что еще сильнее расширяет охват проводимого анализа накопленных в текстах знаний.

Общая схема диалого-ассоциативного поиска, основного режима работы ИС, описанного ранее, представлена на рис. 4.

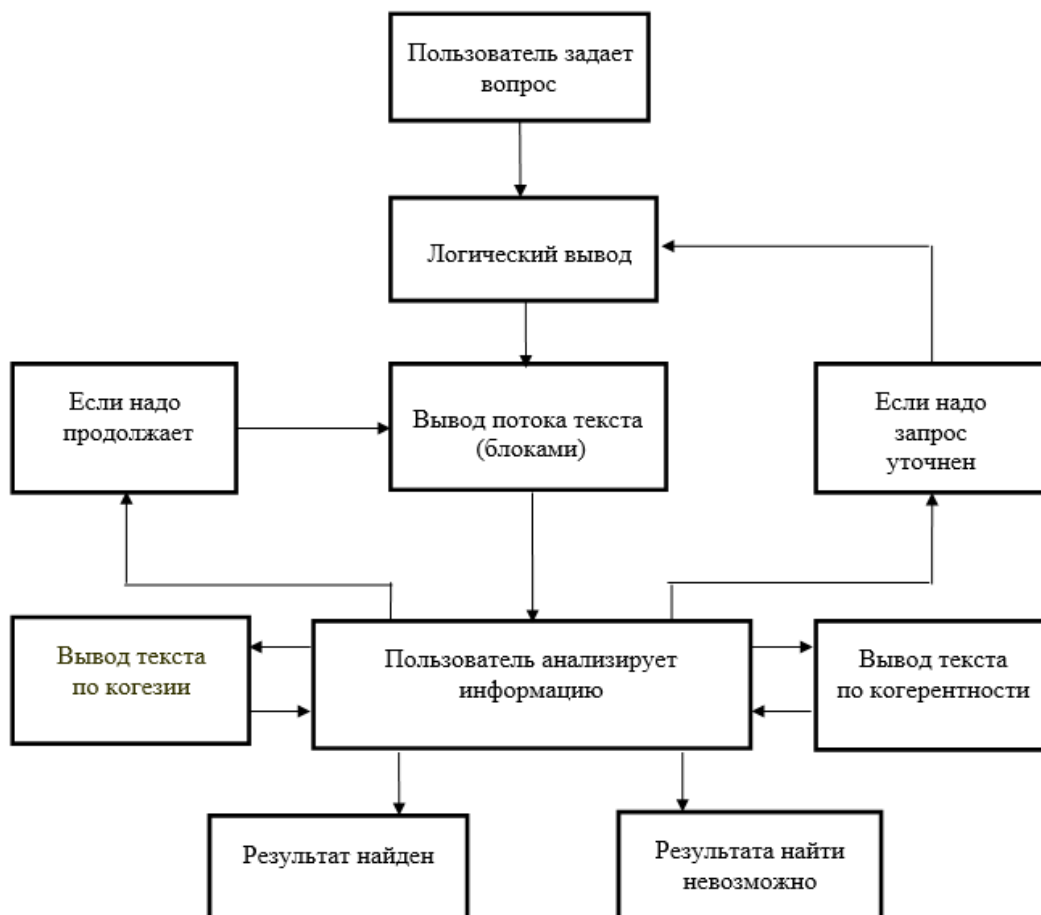


Рисунок 4. Схема диалого-ассоциативного поиска

Сам стиль диалога «пользователь – компьютер» носит характер дискурса, причем в разговорном стиле, который позволяет быстро выходить на нужное пользователю решение, получать качественные ответы на поставленные вопросы даже на БЗ большого объема. Глубокое погружение в тематику области, в которой пользователь работает, долгое изучение профильной литературы, в данном случае также совершенно не обязательно.

Отметим некоторые особенности разговорного стиля, которые проявляются в данном подходе [8]:

- «выполняет функцию прямого общения», в данном случае человека с компьютером;
- «характеризуется ... свободой в выражении мыслей, то есть его доминантой ... является минимум заботы о форме выражения (важно ЧТО, а не КАК)»;
- «нормы ... носят узуальный характер (отвечающий принятому в данном коллективе употреблению слов, фразеологических оборотов, грамматических конструкций и т.п.), кодификация норм ... действует только в пределах общелитературных норм, но даже в этих случаях наименее жестко».

Применение разговорного стиля позволяет повысить эффективность нахождения решения в процессе диалога – человек (пользователь) – компьютер.

### **Заключение**

Рассмотренный подход к применению в машине вывода ЛВ в абдуктивном варианте[3] на БЗ из молинг, полученной с помощью ТПНЗ, позволяет на практике резко ускорить принятие решений пользователями. Также он предоставляет возможность работать в более широкой предметной области, без обращения дополнительно к иным источникам знаний и информации, а также к другим специалистам, ставя оптимизацию работы машины вывода и применяемых в ней алгоритмов в ряд важнейших задач. Диалого-ассоциативный подход к процессу поиска решений также позволяет поднять уровень комфорта взаимодействия с ИС и эффективность поиска ответов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-20720.*

### **Библиографический список**

1. **Гаврилова, Т.А.** Инженерия знаний. Модели и методы / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев. – СПб.: Лань, 2016. – 324 с.
2. **Люгер, Дж.Ф.** Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Дж.Ф. Люгер. – М.: Изд.дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
3. **Вагин, В.Н.** Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская, М.В. Фомина. – М.:Физматлит, 2004. - 704 с.
4. **Бронфельд, Г.Б.** Прямое наложение знаний на основе моделей специального вида // Системы управления и информационные технологии, №4.1(46), 2011, с.124-128
5. Пат. № 2440610 Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой/ Бронфельд, Г.Б.; № 2010125501/08; заявка 1.06.2010; опубл. 20.01.12. Бюл.№2.
6. **Бронфельд, Г.Б.** Основы искусственного интеллекта / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2014. - 253 с.



7. **Бронфельд, Г.Б.** Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности» / Г.Б. Бронфельд. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 236 с.
8. Стилистический энциклопедический словарь русского языка / Под ред. Кожиной М.Н. – М.:Флинта:Наука, 2006. – 696 с.
9. **Лукин, В.А.** Художественный текст: Основы лингвистической теории. Аналитический минимум / В.А, Лукин. – М.: Издательство «Ось-89», 2009. – 560 с.
10. **Диброва, Е.И.** Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц: в 2 частях / Е.И. Диброва, Л.Л. Касаткин, Н.А. Николина, И.И.Щеболева. - М.:Изд.центр «Академия», 2008.
11. **Алипова Н.А.** Формирование структуры предметной области с помощью иерархической кластеризации / Н.А. Алипова, В.Г.Баранов, В.Р. Милов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 11. С. 48-53.
12. **Шенк, Р.** Обработка концептуальной информации / Р. Шенк. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
13. **Совпель, И.В.** Автоматическое распознавание причинно-следственных отношений в текстовых документах // Искусственный интеллект. – 2005. - №4, с.646-650.
14. **Todhunter J. , Sovpel I., Pastanohau D.** US Patent No 8,583,422 System and method for automatic semantic labeling of natural language texts (12.11.2013)
15. **Хай, Р.** Эпоха когнитивных систем: Принцип построения и работы IBM Watson / IBM, 2013, 15 с. - URL: <http://www.olap.ru/home.asp?artId=2507>
16. **Милов, В.Р.** Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой области / В.Р. Милов, Б.А. Суслов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2009. № 12. С. 16-20.
17. **Баранов, В.Г.** Способы аналитической обработки информации для системы поддержки принятия решений / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, Б.А. Суслов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 2. С. 12-15.
18. **Караулов, Ю.Н.** Общая и русская идеография / Ю.Н. Караулов. – М.: «Наука», 1976. – 356 с.
19. **Andoni, A.** Data-Dependent Hashing via Nonlinear Spectral Gaps/ A. Andoni, A. Naor, A. Nikolov, I. Razenshteyn, E. Waingarten // Proceedings of Symposium on Theory of Computing (STOC) 2018. Pp. 787-800.

**D.I. KIROV, G.B. BRONFELD**

## **APPLICATION OF LOGICAL INFERENCE ALGORITHMS IN AN INTELLIGENT SYSTEM WITH A KNOWLEDGE BASE OF MOLINGAS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to research of applications of logical inference in intelligent systems based with knowledge base of molingas.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists of analysis of thought process of humans and its reflection in texts and of logical inference processes dictated by certain algorithms, and of their interaction with each other.

**Findings:** When using the new model of knowledge – molinga – even relatively simple, well researched algorithms can prove surprisingly very effective in practice, especially when coupled with dialog-associative search man-machine interaction methodology. Use of molingas also allows for significant simplification of output synthesizer in intelligent systems, as the direct output of logical inference on the knowledge base of molingas is often indistinguishable from text in natural language.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for further development of solutions to knowledge saturation in respect to its eternal storage and processing.

**Originality/value:** Implementations of logical inference algorithms in accord with dialog-associative methodology in intelligent systems with knowledge bases of molingas have shown good results in solving test cases of general problem resolution and document analysis.

**Keywords:** Inference engine, inference, knowledge, text, molinga, intelligent system.

М.А. Бабкина, А.С. Дыденкова, А.В. Жулин, М.А. Кириллов, Д.И. Киров,  
А.А. Поликарпова, А.С. Прихунов, А.В. Прихунова, Т.А. Рубцова, Г.Б. Бронфельд

## СОЗДАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ МОЛИНГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается процесс создания базы знаний (БЗ) из молинг для интеллектуальной системы (ИС) на основе технологии прямого наложения знаний (ТПНЗ). При этом рассматриваются различные критерии, которым должна соответствовать создаваемая БЗ ИС и конечные качественные показатели, получаемые в процессе применения ТПНЗ.

**Ключевые слова:** критерии, текст, знания, молинга, технология прямого наложения знаний.

### Введение

В современных условиях «информационного взрыва» и сатурации («перенасыщения знаниями») одним из основных направлений решения существующих проблем является использование интеллектуальных систем (ИС) с применением в том или ином объеме методов направления «искусственный интеллект» (ИИ). К этим направлениям, проявившимся в течение последних десятилетий, можно отнести экспертные системы (ЭС)[1,2], системы управления знаниями (СУЗ)[2], семантический Web [3,4], онтологические системы[2,5], более современные ИС WolframAlrha [6] и мощнейшая ИС Watson компании IBM [7,8]. К числу современных ИС можно отнести когнитивные системы на базе моделей знаний – SAO-структур [9,10], а также проект по созданию и развитию технологии компонентного проектирования ИС OS-TIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems) [11].

С 2002 г. начало развиваться направление создания ИС на основе технологии прямого наложения знаний (ТПНЗ) в варианте интеллектуальная электронная книга — элинга (при индивидуальном использовании с массовым производством) [12-15], аналитические системы управления знаниями (АСУЗ)[13-15], создаваемые самостоятельно конкретными предприятиями и организациями, и для общего использования массовым потребителем в виде библиотек аналитического накопления знаний (БАНЗ) [14]. Они основаны на применении баз знаний (БЗ), представленных особым видом моделирования знаний моделями специального вида – молингами [8,12-15]. Одной из самых серьезных проблем при создании различных ИС является процесс создания БЗ. Для различных ИС эти подходы и проблемы различны [16].

### Анализ некоторых проблем создании БЗ ИС

При создании БЗ ИС, в первую очередь, рассматриваются конечные качественные показатели создаваемых БЗ ИС. Они определяются целым рядом критериев. При этом надо иметь в виду, что БЗ ИС имеют достаточно большой объем, и эти работы могут требовать значительной трудоемкости. Рассмотрим кратко эти критерии, всего их девять [17].

*Социальные критерии* - характеризуют социальные последствия использования БЗ в составе ИС. Для оценки таких последствий пока не найдено универсальных шкал и методов их измерения (даже понятийных), поэтому для каждого типа БЗ используются свои специфические социальные критерии, отражающие особенности и характерные черты проблемной области и окружающей среды ИС.

*Функциональные критерии* - характеризуют БЗ с точки зрения качества выполнения ею своей основной и дополнительных функций.

*Эргономические критерии* - характеризуют степень удобства общения пользователей с техническими и программными средствами БЗ, необходимый уровень обученности обслуживающего персонала и уровень специальной подготовки конечных пользователей.

*Прагматические критерии* - характеризуют так называемую действенность БЗ, то есть степень удовлетворения своего предназначения, и выражаются такими сравнительными категориями как «полное», «частичное», «условное».

*Технические критерии* - характеризуют уровень технического совершенства БЗ и ее компонентов и оцениваются с помощью лингвистических шкал типа «высокий – низкий» или таких категорий как «мировой уровень», «отечественный уровень».

*Эксплуатационные критерии* - характеризуют БЗ и ее компоненты с точки зрения удобства проведения различных организационно-технических мероприятий. Их оценка основывается на качественных шкалах типа: «удобно – неудобно», «доступно – недоступно» и других подобного характера.

*Технологические критерии* - характеризуют уровень технологий, использованных при проектировании БЗ и ее компонентов, а так же уровень технологичности разработки создаваемой БЗ. Они оцениваются с помощью лингвистических шкал типа «высокий – низкий» или таких категорий как «мировой уровень», «отечественный уровень».

*Экономические критерии* - выражаются в стоимостных показателях проекта по созданию БЗ и ее составных частей. Однако не всегда представляется возможным оценить эффект внедрения БЗ по критерию «выгоды – затраты», а зачастую такая оценка и нецелесообразна.

*Критерии надежности и безопасности* - характеризуют БЗ с точки зрения надежности используемого комплекса технических средств, своевременности представления информации пользователям, ее полноты и достоверности, сохранения конфиденциальности, защищенности от несанкционированного доступа и опасных программно-технических воздействий. В последние десятилетия значение этих критериев резко усилилось.

*Молинги* [8,12-15] имеют в своем ядре простые предложения, написанные по правилам грамматики естественного языка. Из лингвистики известно, что именно предложение обладает весьма существенной особенностью кратко формировать и выражать мысль [18]. В состав молинги входят также множество идентификаторов, с помощью которых молинга выделяется из всего множества молинг, условие применимости ядра молинги, кодовая последовательность номеров словарей, фиксирующих положение в ядре молинги - терминов, отношений, качественных и количественных признаков, лингвистических и логических связей, а также уровни достоверности молинг и постуловия, которые актуализируются в случае, если ядро молинги реализовалось.

Такой способ моделирования знаний фактически аналогичен представлению каждого предложения текста в виде маленькой семантической сети.

Одной из самых серьезных проблем при создании элинг/АСУЗ/БАНЗ [8,12-15] является создание БЗ достаточного большого объема, что приводит к значительной трудоемкости. С целью ускорения и упрощения этого процесса необходимо создавать и использовать программные средства для автоматического создания элинг – полуавтоматический редактор знаний (РЗ).

При создании БЗ этих разновидностей интеллектуальных систем активно используются специализированные тексты уже, как правило, опубликованные и прошедшие обработку экспертами и редакторами.

Полуавтоматический РЗ анализирует текст и представляет его в виде полуфабриката моделей знаний – набором молинг. Эксперт-редактор, который занимается заполнением БЗ элинги/АСУЗ/БАНЗ, - полученный полуфабрикат - набор молинг редактирует и заносит окончательно в БЗ. При этом он убирает из предложений излишнюю эмоциональную окраску и они упрощаются с сохранением основных риторических отношений и семантической основы. При ручном анализе полуфабриката дополнительно выявляются синонимы (не выявленные автоматически) и заносятся в словари, если они там не присутствуют. Очень важным моментом является выявление молинг, которые полностью дублируют уже имеющиеся в БЗ с учетом синонимов. Полностью совпадающие сразу – это подсказывает РЗ, а вот степень семантического совпадения смысла может выявить только эксперт-редактор. Попутно уточняются уровни достоверности молинг и задаются необходимые постусловия.

Одной из задач РЗ является формирование словарей и автоматическое создание кодовых последовательностей, описывающих последовательность слов в предложении – ядре молинги. Затем при работе элинги/АСУЗ/БАНЗ эта кодовая последовательность будет использоваться при логическом выводе. Формируемая автоматически последовательность идентификаторов, описывающих молингу, позволяет при работе элинги/АСУЗ/БАНЗ выводить из объединенной БЗ элинги/АСУЗ/БАНЗ исходный текстовый источник (или его части) в виде текста, близкого к исходному.

С точки зрения социальных и функциональных критериев [17] рассматриваемый подход [8,12-15] позволяет создавать БЗ по сравнению с другими технологиями создания БЗ для других моделей знаний – близкие к идеальным. С точки зрения эргономических критериев ситуация получается неплохая, но возможности ЭС [1,2] с их БЗ более выгодны и могут подстраиваться к потребителю с точки зрения эргономики с большей эффективностью. Когнитивные системы Watson могут давать ответы потребителю практически мгновенно [7]. В этом они превосходят все другие ИС, но проигрывают элинге/АСУЗ/БАНЗ по многим другим критериям.

По прагматическим критериям, а именно по степени удовлетворения своего предназначения, БЗ для элинги/АСУЗ/БАНЗ близки к идеальным, тем более что через постусловия, включаемые в молинги элинги/АСУЗ/БАНЗ, способны решать практически любые расчетные задачи и подключаться к любым моделирующим комплексам, необходимым для потребителя. В то же время когнитивные системы Watson не могут реагировать адекватно на появляющиеся новые источники знаний, поскольку старые источники знаний просто большинством через статистические модели будут «топить» новые редкие в начале работы результаты. Это характерно и для Википедии.

По техническому уровню БЗ для элинг/АСУЗ/БАНЗ находятся на среднем уровне, наибольшего совершенства пока достигает когнитивная система Watson [7].

По эксплуатационным критериям БЗ для элинг/АСУЗ/БАНЗ относятся к числу наилучших, поскольку позволяют быстро корректировать, дополнять, исправлять все текущие модели знаний – молинги, практически не оказывая отрицательного влияния на другие части БЗ. К числу наихудших относятся БЗ для ЭС, поскольку они требуют дополнительного времени для отладки. Поэтому ЭС редко имеют БЗ, превышающие 10 тысяч производственных правил, в то время как другие ИС имеют объемы их в сотни и тысячи раз больше. БЗ для элинг/АСУЗ/БАНЗ здесь также обладают очень большим потенциалом. Кроме того, по сравнению с когнитивной системой Watson [7] или ИС Wolfram Alpha [6] для элинг/АСУЗ/БАНЗ очень невысоки требования к используемой вычислительной технике. С использованием ТПНЗ и сравнительно намного меньшим объемом БЗ по сравнению с другими ИС – выигрыш еще больше.

О технологических критериях [17]. Для создания элинг/АСУЗ/БАНЗ фактически используются самые новые, хотя и не самые сложные технологии создания ИС. Например, технологиям создания ЭС уже более 40 лет [1-2] семантического Web [4] 20 лет, на основе SAO-структур [9,10] 20 лет. Технологию ТПНЗ не способны пока использовать ни одна из создаваемых и эксплуатируемых ИС, модель знаний – молинги, которые обеспечивают этот режим, также пока никто не поддерживает.

Сравнение по экономическим критериям не такое простое. Затраты, и достаточно значительные, надо нести при начальном создании всех ИС. ИС Wolfram Alpha [6] создана одна на весь мир. Когнитивная система Watson крайне дорогостоящая и недоступная для воспроизводства. Технология создания элинг/АСУЗ/БАНЗ поэтапно раскрывается и доступна всем в мире. При массовом производстве элинг, которые будут стоить немногим дороже самих машинных носителей информации (МНИ), они могут решать отдельные проблемы малых и средних предприятий. Крупные предприятия практически бесплатно могут создавать АСУЗ для себя [13,14]. По стоимости приобретения элинги ее использование будет одним из самых дешевых среди всех видов ИС. Покупается она один раз в год, и больше ничего не потребуется. А вот для ИС Wolfram Alpha, когнитивной системы Watson, семантического Web потребуется постоянный доступ в интернет, что будет дороже. Локальные ЭС и ИС на базе SAO-структур также обойдутся намного дороже.

Критерии надежности и безопасности тоже очень важные показатели. Элинга очень дешева, ее БЗ всегда доступна – сожгли один МНИ, тут же пошли и купили новый с более совершенной БЗ. Поскольку нет необходимости в доступе в интернет, то нет никакой опасности современных киберугроз. Для АСУЗ/БАНЗ легко делятся БЗ на разные части, что позволяет легко их копировать для обеспечения сохранности и выстраивать иерархию доступа для обеспечения коммерческой тайны и секретности с любыми уровнями требований. Пользователь не может нарушить работу БЗ элинг в процессе эксплуатации. Для АСУЗ/БАНЗ помехозащищенность БЗ чуть хуже, но есть возможность за счет резервирования обеспечить любые требования по надежности.

На данном этапе работ была разработана экспериментальная БЗ для элинги/АСУЗ с определенным набором задач на основе нескольких документов. В этой работе при создании БЗ активное участие приняли магистранты М.А. Бабкина, А.С. Дыденкова, А.В. Жулин, М.А. Кириллов, А.А. Поликарпова, А.С. Прихунов, А.В. Прихунова, Т.А. Рубцова. В результате удалось получить интегрированную БЗ, достаточную для поставленного узкого набора задач. Это дало возможность практически разработать надстройку над элингой, что позволило реализовать те конкретные особенности решения задач, которые в каждой АСУЗ/БАНЗ будут свои и никакое программное средство (и элинга тут не исключение) не может все предусмотреть на все случаи жизни по эффективности и удобству работы для потребителя.

### **Заключение**

Подводя итог работы, можно сделать вывод, что технология создания БЗ для перспективных ИС на основе ТПНЗ с моделями знаний в виде молинг в вариантах - элинги/АСУЗ/БАНЗ с использованием полуавтоматического РЗ демонстрирует свою жизнеспособность и возможность создания качественных БЗ, отвечающих современным высоким требованиям потребителей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-08-06034.*

## Библиографический список

1. **Джарратано, Дж.** Экспертные системы: принципы разработки и программирование/ Дж. Джарратано, Г. Райли. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.
2. **Гаврилова, Т.А.** Инженерия знаний. Модели и методы: учебник/ Т.А.Гаврилова, Д.В.Кудрявцев, Д.И.Муромцев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 324 с.
3. **Хорошевский, В.Ф.** Пространства знаний в сети Интернет и Semantic Web, часть 1// Искусственный интеллект и принятие решений, № 1, 2008, с.80-97
4. URL: <http://www.w3.org/>
5. **Nirenburg, S.** Ontological Semantics / S. Nirenburg, V. Raskin. – Cambridge, MA: The MIT press, 2004. – 420 p.
6. Система вычисления знаний Wolfram Alpha, 2009 URL: <http://businessinweb.com/blog/internet/756.html>
7. **Хай, Р.** Эпоха когнитивных систем: Принцип построения и работы IBM Watson / IBM, 2013, 15 с. <http://www.olap.ru/home.asp?artId=2507>
8. **Бронфельд, Г.Б.** Инженерные основы моделей знаний : учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2016. – 139 с.
9. **Совпель, И.В.** Система автоматического извлечения знаний из текста и ее приложения // Искусственный интеллект, № 3, 2004, Минск. С.668-677.
10. IHS Goldfire. Accelerating Decisions. Powering Innovation. White Paper// IHS Inc., 2013. 7 p. URL: [https://ihsmarkit.com/pdf/IHS-Goldfire-Platform-Whitepaper\\_140823110915517432.pdf](https://ihsmarkit.com/pdf/IHS-Goldfire-Platform-Whitepaper_140823110915517432.pdf)
11. **Голенков, В.В.** Открытый проект, направленный на создание технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем /В.В. Голенков, Н.А. Гулякина// Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2013): материалы III междунар. науч.-техн.конф. – Минск: БГУИР, 2013 – с.55-78
12. Пат. на пол. модель, № 104348 Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой – носителем знаний / Бронфельд, Г.Б. заявка 06.07.2010; опубл. 10.05.11, Бюл. №13
13. **Бронфельд, Г.Б.** Основы искусственного интеллекта : учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014. – 253 с.
14. **Бронфельд Г.Б.** Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности». - Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Puplicshng, 2014. – 236 с.
15. **Бронфельд, Г.Б.,** Прототип интеллектуальной электронной книги с использованием технологии прямого наложения знаний / Г.Б. Бронфельд, Д.И.Киров, В.В. Кондратьев //Программные продукты и системы, №3 , 2019. - С.403-410.
16. **Мейтус, В. Ю.** Проблемы разработки интеллектуальных систем// 21st Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2011). 12-16, September 2011. Sevastopol. Pp. 43-46
17. **Балан, В.П.** Введение в системное проектирование интеллектуальных баз знаний / В.П. Балан, А.В. Душкин, В.И.Новосельцев, В.И. Сумин; под ред. В.И. Новосельцева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 107 с.
18. **Диброва, Е.И.** Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц: в 2 частях / Е.И. Диброва, Л.Л.Касаткин, Н.А. Николина, И.И.Щеболева. – М.:Изд.центр «Академия», 2008.

**M. A. Babkina, A. S. Dydenkova, A.V. Zhulin, M. A. Kirillov, D. I. Kirov,  
A. A. Polikarpova, A. S. Prikhunov, A.V. Prikhunova, T. A. Rubtsova, G. B. Bronfeld**

## **THE DEVELOPMENT OF A KNOWLEDGE BASE ON THE BASIS OF MOLINGAS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The process of creating a knowledge base from molingas for an intelligent system based on the technology of direct imposition of knowledge is considered here. At the same time, we consider various criteria that must be met by the created knowledge base of the intelligent system.

**Design/methodology/approach:** The approach to creating a knowledge base is based on the use of knowledge models of a special type - molingas and the technology of direct imposition of knowledge.

**Findings:** The technology of creating a knowledge base for intelligent systems based on the technology of direct imposition of knowledge with knowledge models in the form of molingas in variants of elingas/analytical knowledge management system(AKMS)/a libraries of analytical accumulation of knowledge (LAAK) using a semi-automatic knowledge editor demonstrates its viability and the ability to create high-quality knowledge bases.

**Research limitations/implications:** We consider only the construction of knowledge bases based on knowledge models of a special type - molingas.

**Originality/value:** The technology of creating knowledge bases for advanced information systems-elingas/AKMS/LAAK - demonstrates its viability and the ability to create high-quality knowledge bases that meet the high requirements of modern consumers.

**Keywords:** criteria, text, knowledge, molinga. technology of direct imposition of knowledge



А.С. Макаров, Г.Б. Бронфельд

## ЗАКОН ЦИПФА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗНАНИЯМ НА ОСНОВЕ МОЛИНГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Закон Ципфа находит своё применение в различных науках: в биологии, в экономике, в социологии. Стала не исключением и область анализа текстов. Для анализа текстов можно использовать частотный анализ словосочетаний. Он в свою очередь может говорить об особенностях текстов. Если существует существенное отклонение от закона Ципфа, то можно говорить о неоднородности и неорганичности текста. В статье рассматривается проверка закона Ципфа для представления знаний в виде молинг.

**Ключевые слова:** закон Ципфа, молинг, частотный анализ словосочетаний, анализ текстов, модель знаний.

### Введение

В настоящее время цифровизации подвергаются всё больше аспектов нашей жизни. Используются различные информационные системы и подходы для оценки большого количества текстов и их содержания. На данный момент существуют разные способы представления информации и моделей знаний и их анализа, которые, в свою очередь, нужны для создания продвинутых интеллектуальных систем (ИС).

При изучении текстов и ряда других предметных областей используются различные методы, в частности, на основе применения закона Ципфа [1-5]. У него сложилась странная судьба: он применялся для лингвистики [2,5], для миграции населения [1], для оценки городских проблем [4], для оценки информационных потоков [5] и т.д. Он относится к одному из самых загадочных феноменов в библиометрии и количественной лингвистике. Статистик Г. Хердан выразился так: «математики верят в [закон Ципфа], потому что они думают, что лингвисты установили, что это лингвистический закон, и лингвисты верят в него, потому что они, со своей стороны, думают, что математики установили, что это математический закон» [6,7].

Однако есть еще ИС, в частности, элинги и аналитические системы управления знаниями (АСУЗ) [7,8], которые имеют базу знаний (БЗ), содержащие модели знаний из молинг, ядра которых содержат предложения текстов в прямом или модифицированном виде. Поэтому интересно дать хотя бы первые оценки сравнительных результатов как закон Ципфа работает для текстов, а как для текстовой части БЗ их молинг в ИС.

### Основы теории

Закон Ципфа — эмпирическая закономерность распределения частоты слов естественного языка: если все слова языка упорядочить по убыванию частоты их использования, то частота  $n$ -го слова в таком списке окажется приблизительно обратно пропорциональной его по-

рядковому номеру  $n$  [1-5]. Например, второе по используемости слово встречается примерно в два раза реже, чем первое, третье — в три раза реже, чем первое, и так далее.

Есть различные трактовки закона Ципфа для разных задач и со своими видами формул.

Например, этот закон работает в отношении распределения городской системы: город с самым большим населением в любой стране в два раза больше, чем следующий по размеру город, и так далее. Если расположить все города некоторой страны в списке в порядке убывания численности населения, то каждому городу можно приписать некоторый ранг, то есть номер, который он получает в данном списке. При этом численность населения и ранг подчиняются простой закономерности, выражаемой формулой [4]:

$$P_n = P_1/n, \quad (1)$$

где  $P_n$  — население города  $n$ -го ранга;  $P_1$  — население главного города страны (1-го ранга).

Сам автор - американский лингвист и филолог Д.К. Ципф [1] рассмотрел влияние расстояния на миграцию между городами. Учёный пытался объяснить такие миграции принципом наименьших усилий или наименьшего сопротивления. Этот принцип заключается в том, что люди при достижении результата всегда выбирают действия, которые потребуют от них наименьших усилий. В соответствии с теорией Ципфа величина миграционного потока из одного города в другой зависит от расстояния между городами, поскольку потраченные денежные средства, приложенные усилия и испытанные трудности увеличиваются с расстоянием. Далее этот «*принцип наименьших усилий*» он развил в [2].

При разработке элинг/АСУЗ [7,8] на основе технологии прямого наложения знаний (ТПНЗ) создают БЗ, содержащую модели знаний из молинг, в ядрах которых присутствуют предложения из текстов в исходном или обработанном виде.

Модель знаний для элинги/АСУЗ, молинга имеет вид [7,8]:

$$D; P; Z; K; F; N, \quad (2)$$

где  $D$  - множество идентификаторов, с помощью которых данная молинга выделяется из всего множества молинг;

$P$  - есть условие применимости ядра молинги;

$Z$  - ядро молинги, включающее, как правило, простое предложение из текста;

$K$  - кодовая последовательность номеров словарей, фиксирующих положение в ядре слов/словосочетаний - терминов, отношений, качественных признаков и т.д.

$F$  - указываются уровни достоверности молинг.

$N$  - постуловия молинги, актуализируются в случае, если ядро молинги реализовалось. Постуловия молинги описывают действия и процедуры, которые необходимо выполнить после реализации ядра молинги.

Для анализа используется представление закона Ципфа в виде [1-5].

$$f*r = \text{const}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота неких слов в тексте;  $r$  – порядок выстраивания слов по понижающейся частоте так, чтобы наиболее частое слово имеет ранг 1, следующее по частоте – ранг 2, и так далее.

Будем рассматривать закон Ципфа для иных синтаксических единиц – словосочетаний, предложений, текстов [9].

## Результаты исследования

Была разработана программа, предназначенная для обработки входных данных, представленных в виде текстового файла \*.txt формата.

Входная информация содержится в текстовом файле. В файлах могут содержаться текстовые файлы или предварительно обработанная БЗ молинг (в ней содержатся только ядра молинг в формате\*.txt). Программа автоматически отбирает заданные словосочетания для введенных текстовых файлов и анализирует частоты словосочетаний. В результате пользователь получает графики частот словосочетаний.

На графике (рис.1) представлен анализ частоты словосочетаний в текстовых файлах. На рис.2 частоты словосочетаний для БЗ молинг (в обработанном виде). В результате работы программы пользователь получает графики частот словосочетаний в текстах (рис. 3) и в текстовой части БЗ молинг (рис.4).

В результате исследования были выявлены следующие результаты:

- 1) при увеличении объема текста и количества документов график частот приближается к графику обратной пропорциональности (3) [1-5];
- 2) по частотному анализу текстовой части бз молинг можно судить о правильности составления молинг;
- 3) из анализа данных графиков можно сделать вывод, что частота словосочетаний и частота словосочетаний молинг подчиняются закону Ципфа [1-5].
- 4) было проверено уравнение для закона Ципфа вида (3), для словосочетаний из текстов для  $const = 0,0396$ , для текстовой части БЗ молинг  $const = 0,00627$ .

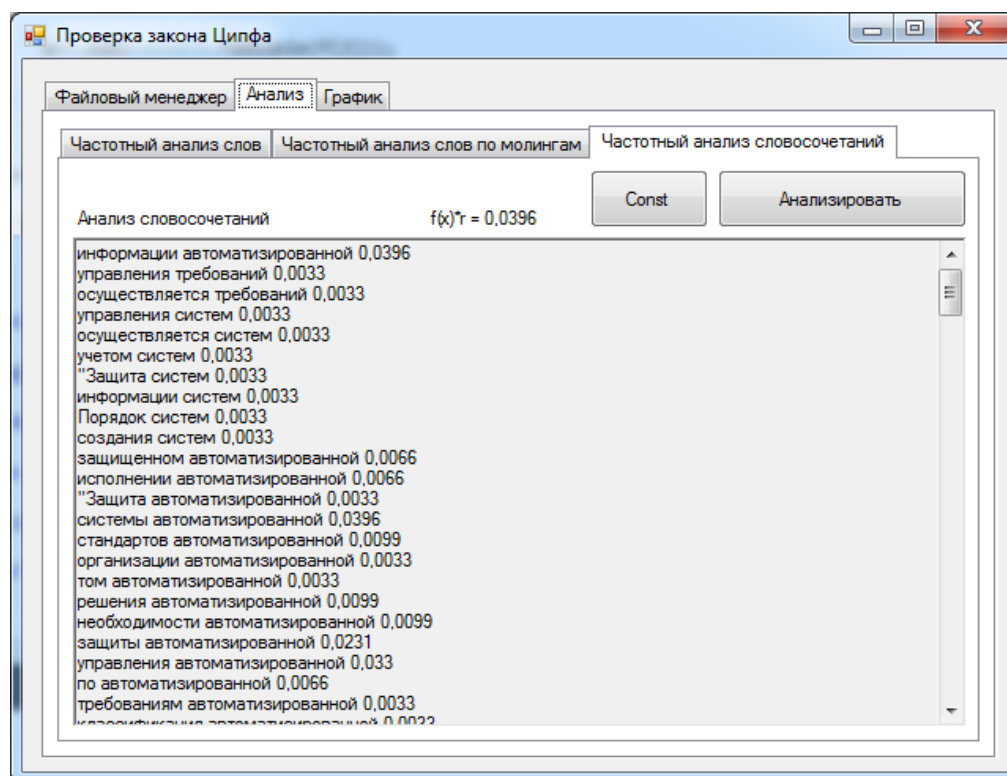


Рисунок 1. Частоты словосочетаний из текста

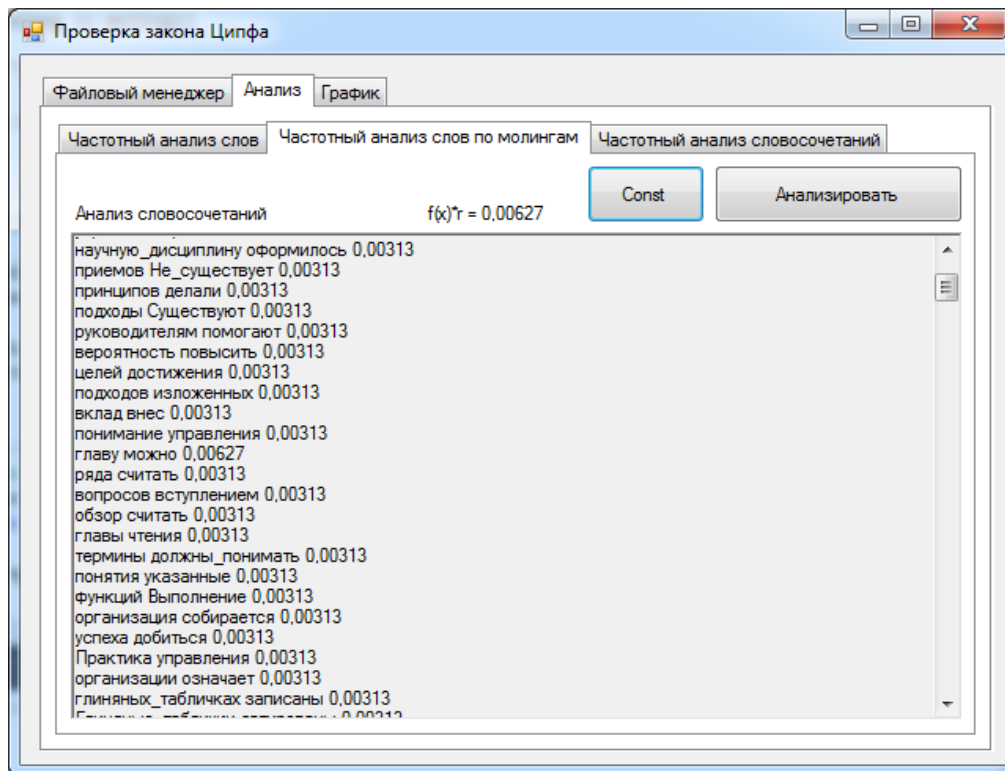


Рисунок 2. Частоты словосочетаний из текстовой части БЗ молинг

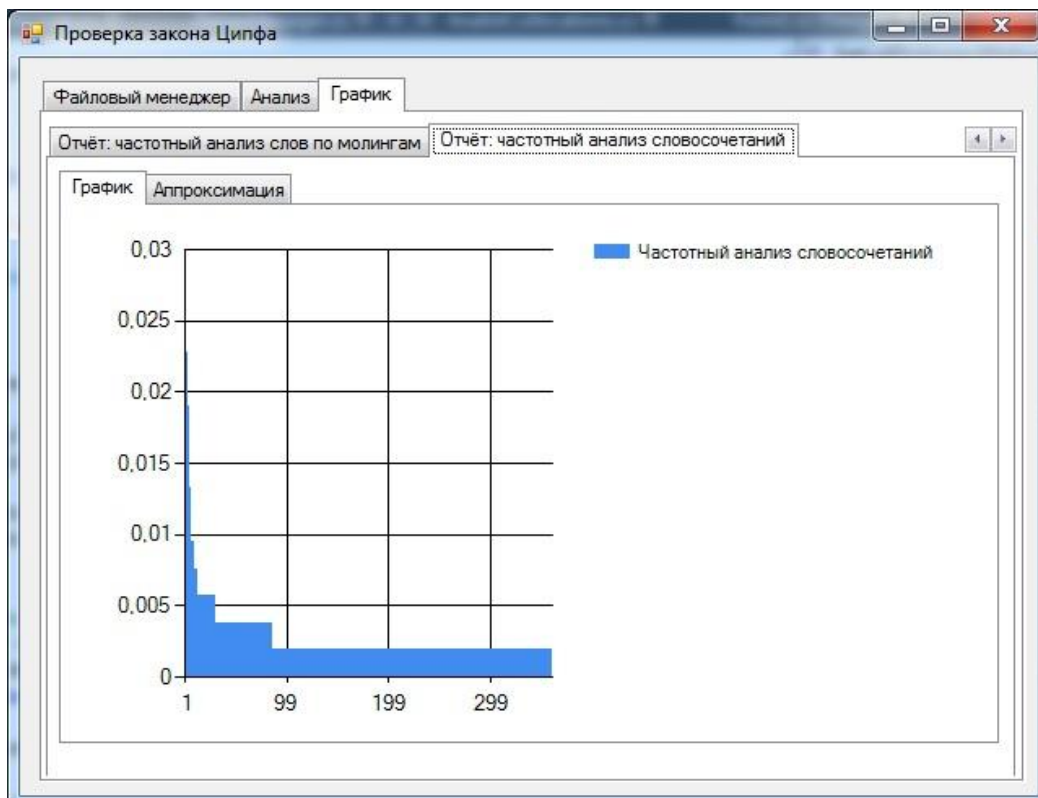


Рисунок 3. График изменения частоты словосочетаний для текста

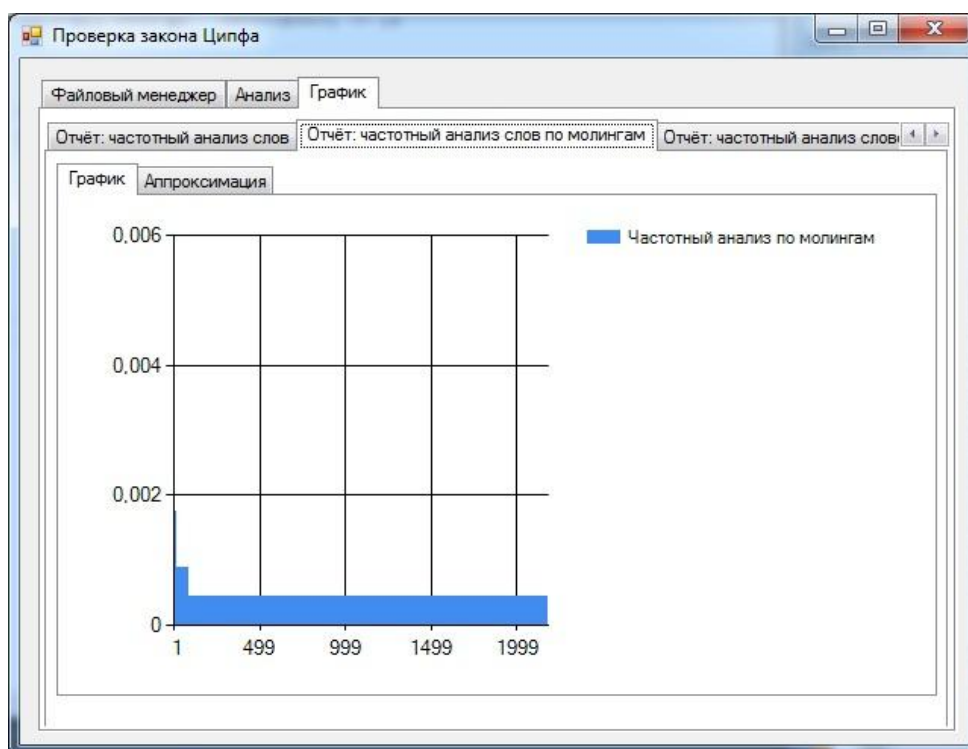


Рисунок 4. График изменения частоты словосочетаний для текстовой части БЗ молинг

### Заключение

Разработана программа для проверки закона Ципфа для БЗ молинг и текста. В результате исследования было выявлено, что текстовые документы и база знаний молинг подчиняются закону Ципфа.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

### Библиографический список

1. **Zipf, G. K.** The (P1P2 / D) hypothesis: on the intercity movement of persons // American Sociological Review. 1946. № 11. P. 677–686.
2. **Zipf, G.K.** Human behavior and the principle of least effort. - Addison-Wesley Press, Cambridge, MA.1949. – 573 p.
3. **Wyllys, R. E.** Empirical and Theoretical Bases of Zipf's Law //Library Trends, Summer, 1981. Pp. 53-64
4. **О'Салливан, А.** Экономика города / А. О'Салливан – М.: Инфра-М, 2002. – 706 с.
5. **Ландэ, Д. В.** Основы интеграции информационных потоков // Информационные потоки.- 2006. – 240 с.
6. **Herdan, G.** The Advanced Theory of Language as Choice and Chance. - Berlin: Springer-Verlag, 1966. - 472 p.
7. **Бронфельд, Г.Б.** Основы искусственного интеллекта :учеб. пособие /Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014. – 253 с.
8. **Бронфельд, Г.Б.** Инженерные основы моделей знаний: учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. - Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2016. - 139 с.

9. **Диброва, Е.И.** Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц: в 2 частях / Е.И. Диброва, Л.Л.Касаткин, Н.А. Николина, И.И.Щеболева. – М.:Изд.центр «Академия», 2008.

**A.S. Makarov, G.B. Bronfeld**

## **ZIPF'S LAW APPLICABLE TO MOLINGA-BASED KNOWLEDGE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The article is devoted to checking the implementation of the Zipf's law for texts and knowledge base from molingas, their analysis and comparison.

**Design/methodology/approach:** the methodology of the approach is based on the study of the long-observed frequency distribution of words in texts and representation by various mathematical laws. Now for the first time this is verified for the molingas knowledge base.

**Findings:** The program calculates the frequency of phrases in the texts and knowledge base from molingas and shows them on the diagram.

**Research limitations/implications:** The program architecture is flexible enough to provide engineers with a convenient way to create new features in order to extend system functionality.

**Originality/value:** The originality of the results lies in the inclusion of the text part of the knowledge base from molingas in the object of research and the importance of the obtained conclusions for the created intelligent systems..

**Key words:** Zipf's law, molinga, frequency analysis of phrases, text analysis, knowledge models.

Е.Н. Самарин, Г.Б. Бронфельд, Д.И. Киров

## СЕМАНТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЕДИНИЦЫ И МОЛИНГИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается проблема семантических информационных единиц (СИЕ) в текстах, их разновидностей и роли СИЕ для понимания смысла текстов. Демонстрируется связь СИЕ с ядрами моделей знаний – молинг для интеллектуальных систем, полученных по технологии прямого наложения знаний. Приведено описание семантических информационных единиц. Они являются дополнением к идеям Л. Флориди по созданию семантической теории информации. Описаны особенности семантических информационных единиц. Показана вложенность семантических информационных единиц и их качественные отличия.

**Ключевые слова:** информационные единицы, семантические информационные единицы, текст, знания, молинга.

### Введение

В современном обществе циркулирует множество информационных потоков разного рода, существуют естественные источники информации, накоплены гигантские объемы знаний от оперативно возникающих до хранящихся тысячи лет. Все это нередко находится в сложной взаимосвязи, что создает объективные проблемы функционирования как различных организаций/предприятий, так и жизни отдельных людей.

Проблемы использования информационных технологий в этой ситуации уже неоднократно рассматривались с разных точек зрения [1-10].

### Семантические информационные единицы и молинги

*Информационное пространство*, окружающее людей, может быть естественным и искусственным [1]. Естественное информационное пространство отражает внешний мир и служит источником информации и знаний для человека. Оно существует независимо от человека и содержит описания окружающего мира. Искусственное информационное пространство создается человеком на основе знаний, теорий, моделей, систем и опыта. Оно формируется на основе информации, которой располагает человек и поэтому является результатом информатизации общества.

*Информационное поле* вложено в информационное пространство. Пространство является пассивным отображением окружающего мира. Поле содержит некие количественные и качественные характеристики пространства [1,2]. При этом следует подчеркнуть, что информационных полей может быть много и каждое может быть в ограниченной части информационного пространства. *Информационная среда*, в свою очередь, вложена в информационное пространство и информационное поле и может рассматриваться как их подмножество. Для

информационной среды характерным является наличие объекта окружения, информационное взаимодействие с которым определяет границы информационной среды.

Для многих объектов информационного поля существует характеристика – *семантическое окружение информационного поля* [1-3]. Семантическое окружение необходимо для однозначной интерпретации объекта информационного поля и его информационной определенности, в частности, *информационных единиц* (ИЕ). Информационное окружение ИЕ проявляется при ее непосредственном использовании. Например, информационным окружением ИЕ «слово» в предложении или во фразе будут все связанные с этим словом символы и другие слова, а также такие информационные характеристики как позиция слова и вид его написания. Семантическое информационное окружение является информационной моделью семантического поля понятий.

Модель семантического информационного окружения дает возможность разрабатывать алгоритмы поиска области истинности [1-3]. Модель информационного окружения позволяет формировать представлять информационные конструкции любой сложности в виде совокупности связанных ИЕ [1-3, 7-10]. Совокупности связанных ИЕ дают возможность оценки морфологической и смысловой сложности языковых конструкций. При этом существуют разные ИЕ.

В свое время Р.Хартли и К.Шеннон [11, 12] безуспешно пытались описать семантику сообщений с помощью математической логики. В конце концов, К. Шеннон пришел к выводу о том, что «семантические проблемы информации не релевантны проблемам математической теории связи». Известный философ и математик Л. Флориди пошел дальше [4]. Он рассматривает информацию не только как инструмент снятия неопределенности, что делает К.Шеннон. Л. Флориди разделяет и развивает точку зрения Н. Винера о том, что главное в информации это содержательность и знания, и рассматривает это на основе семантики. Главным критерием наличия семантики (содержательности) в информации Л. Флориди определяет истинность информации с позиций эпистемологии [4].

В отличие от Р.Хартли и К.Шеннона, пытавшихся применить для описания информации простые модели математической логики, Л. Флориди применяет более сложные математические модели с использованием теории множеств и логики первого порядка [2,4]. Но он рассматривает информацию как однородную сущность без выделения в ней информационных и семантических единиц. Л. Флориди говорит о смысловом содержании информации как обязательном факторе теории информации. Однако он не учитывает того, что смысловое содержание информационного сообщения зависит от ИЕ и отношений между ними [2].

Л. Флориди [4] делает важную попытку ввести «*общее определение информации*» (The General Definition of Information - GDI). Для этого он выдвигает следующее положение:  $\sigma$  является экземпляром информации, понимаемым как смысловое содержание, если и только если: (GDI)  $\sigma$  состоит из одного или нескольких данных, (GDI.2) данные в  $\sigma$  хорошо сформированы, (GDI.3) хорошо сформированные данные в  $\sigma$  являются значимым [4].

При этом Л. Флориди отмечает полисемию и многозначность информации. Он говорит о том, что значение смысла информация зависит от окружения и контекста, но не вводит разделения информационных сообщений на отдельные элементы.

Рассмотрим разделение информационных сообщений на составляющие компоненты, используя понятия ИЕ и *семантических ИЕ* (СИЕ) в соответствии с [2]. Это все неплохо стыкуется с существующим подходом в лингвистике [13]. Затем покажем соответствие этого под-



хода для развиваемого направления создания интеллектуальных систем (ИС) на основе технологии прямого наложения знаний (ТПНЗ) с использованием моделей знаний в виде молинтг [8-10].

Исходным положением является то, что смысловое содержание информации можно представить в виде некоей системы элементов [2,3], между которыми существуют отношения. Смысл информационного сообщения определяют значения элементов и конкретные отношения между ними. Совокупность ИЕ обладает всеми системными свойствами. И системный анализ таких информационных систем обнаруживает их функционирование как открытой системы.

С точки зрения семантики такие элементы являются СИЕ, то есть это единицы, рассматриваемые в аспекте семантической содержательности. Выделяют следующие СИЕ [2,3]: символ, слово, предложение, фраза.

*Символ* — ИЕ, обладающая неделимостью по структурному признаку[2]. Символ - это атомарный объект, на которые может быть поделен фрагмент текста. Как самостоятельный объект символ – формальное обозначение, которое выступает либо как представитель другого предмета, явления, действия, либо отражает самого себя. Символ не имеет смыслового значения, а является носителем информации. Хотя с точки зрения лингвистики бывает и иначе [13,14]. Для этого в ИС на базе ТПНЗ (а это элингги/аналитические системы управления знаниями (АСУЗ)/библиотеки аналитического накопления знаний (БАНЗ) [8-10]) предусмотрено применение словарей интерпретации, которые вводят дополнительные вербальные обозначения и необходимые пояснения для однозначной трактовки как отдельных символов и слов, так и фраз (при необходимости) [10].

*Слово* – ИЕ, обладающая неделимостью по смысловому признаку [2]. В тексте слово – предельная смысловая составляющая сообщения (предложение), способная непосредственно соотноситься с предметом отражения и указывать на него, вследствие этого слово приобретает определенные смысловые свойства. Слово - минимальная единица информации, имеющая смысловое значение. Однако слово характеризуется *сигнификативным смысловым значением* и возможностью изменения, что влечет изменение смысла в определенных пределах. Поэтому смысл слова как независимого информационного объекта и смысл слова в предложении могут различаться. Слово – сигнификативно неделимая информационная единица. Для однозначного решения этой проблемы в элингах/АСУЗ/БАНЗ применяется словарь интерпретаций.

*Предложение* – ИЕ, обладающая неделимостью по смысловой совокупности связанных слов и выражающая законченную мысль [2]. Предложение представляет собой предикативное словосочетание, поэтому имеет *предикативное смысловое значение*. Предложение – предикативно неделимая ИЕ. В отличие от слова для ряда предложений представляется возможность проверки их на истинность. Это возможно за счет использования свойства предикации. Предикация – отношение содержания сообщения к действительности, осуществляемая в предложении (в отличие от словосочетания) [2,3,13].

Именно такие свойства предложения дали основания проф. Д.Маккею в 1950 г. представить в качестве ИЕ предложение из текстов и назвал их «*логоном*». И, соответственно, количество информации теперь можно подсчитывать в логонах [15].

*Фраза (фразеологическая единица)* – ИЕ, обладающая неделимостью по связанности предложений и выражающая законченную мысль [2]. Фраза – ИЕ сообщения, обладающая

максимальной смысловой содержательностью. Для фразы и предложения смысловое содержание дополняется контекстом [2,3]. Это дало основания для языка KML [7] использовать в качестве ядра модели знаний часть текста, начиная от одного до нескольких, связанных между собой, предложений.

Предложение в составе фразы может обладать свойством *антецедентности* (ассоциативности), то есть соотноситься по смыслу с предыдущим (другим) предложением. Последнее приводит к появлению в предложении ассоциативных связей с другими предложениями или мыслимыми объектами. Это дополнительно наполняет данную ИЕ ассоциативным смысловым содержанием. Подобное отмечается и в лингвистике [16].

Обобщением ИЕ является *знак*. Это многозначное понятие, поскольку знаком можно обозначать символ или закодировать слово, предложение, фразу, ситуацию. Понятие знака является одним из ключевых и в лингвистике и семиотике [13,14,16].

Одно из замечательных свойств СИЕ – изменение смысла от взаимного расположения ИЕ. Выражая различные значения, СИЕ организуют ядро категории *предикатных отношений*. Семантическая сущность ИЕ связана с наличием признаков *релятивности*, *референциальности* и *ситуативности*. Например, изменение написания СИЕ (курсив) означает *референцию*, то есть ссылку на повторение этой единицы или на ее подробной разъяснение. В отличие от «безликих символов» Шеннона, для ИЕ существует понятие позиции, которое определяет их положение и отношение друг к другу. Это препозиция, интерпозиция и постпозиция. Позиция ИЕ влияет на смысл сообщения и соотносит некоторые ИЕ с определенной позицией в предложении [3,4].

Каждая СИЕ находится в определенном «окружении»: предложение, фраза [2]. В смысловом аспекте СИЕ обладают рядом свойств, среди которых наиболее значимы: *полисемия*, *антонимия*, *синонимия*, *омонимия*. Полисемия СИЕ – единица обладает рядом смысловых значений, реализуемых единицей в условиях реального информационного окружения. Антонимия СИЕ – существуют другая единица с противоположным смыслом (оппозиционная единица). Синонимия СИЕ – существуют другая единица с таким же смыслом. Омонимия СИЕ – существуют другая единица с таким же обозначением, но другим смыслом [2,3].

Потребность в получении новых знаний была неотъемлемым элементом развития человечества на протяжении всего периода эволюции. Рассмотрим подход для элинг/АСУЗ/БАНЗ.

Промоделируем знания новым способом, поскольку известные, такие как продукционные модели, логические модели, семантические сети, фреймы и другие, сложны в применении для поставленной задачи. Известно из лингвистики, что «простое предложение ... было и остается основной единицей синтаксиса текста...», «наиболее существенной чертой предложения является его способность формировать и выражать мысль» [8-10,13]. Метод описания знаний моделью, названной *молингой*, заключается в следующем. Каждое простое предложение текста (сложные делятся на простые) представляется кортежем с составлением словарей терминов (включая синонимы), отношений, качественных и количественных признаков и т.д. Из предложений убирается эмоциональная окраска, они упрощаются с сохранением основных риторических отношений. При необходимости производят эквивалентные замещения выражений. Текстов в сверхтексте может быть много с  $i = 1, 2, \dots, n$ . Одинаковость в семантическом смысле предложений и получение одинаковых молинг определяет эксперта-редактора, который вводит молинги в БЗ ИС. Одинаковые молинги могут попадаться, как в

одном тексте, так и в разных. За счет идентификаторов при выдаче ответа может даже восстанавливаться (по желанию пользователя) близкий к исходному текст [8-10].

### Заключение

Подход на основе СИЕ соответствует подходам, используемым в лингвистике и соответствует практике создания ИС, в частности, на основе KML. Методика с СИЕ является дополнительным обоснованием для создания перспективных ИС на основе ТПНЗ с моделями знаний в виде молинг в вариантах - элинги/АСУЗ/БАНЗ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №10-08-06049.*

### Библиографический список

1. **Ожерельева, Т.А.** Об отношении понятий информационное пространство, информационное поле, информационная среда и семантическое окружение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 10 – С. 21-24
2. **Tsvetkov, V. Ya.** Semantic Information Units as L.Florodi's Ideas Developmen// European Researcher, 2012, Vol.(25), № 7 . pp. 1036-1041.
3. **Цветков, В.Я.** Окружение информационных единиц / В.Я.Цветков, Е.Е.Чехарин // Вестник МГТУ МИРЭА, 2014. № 2(3). – С.36-42.
4. **Floridi, L.** The Philosophy of Information. – Oxford University Press, 2011. – 405 p.
5. Информационные технологии в бизнесе/под ред. **М.Желены.** СПб: Питер, 2002. 1120 с.
6. **Гаврилова, Т.А.** Инженерия знаний. Модели и методы / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. - 324 с.
7. **Ворожцов, А.В.** Индустрия знаний // Информационные технологии и вычислительные системы, 2003, № 4. - С. 145-148.
8. **Бронфельд, Г.Б.** Основы искусственного интеллекта. / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014 . - 253 с.
9. **Бронфельд, Г.Б.** Инженерные основы моделей знаний : учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2016. – 139 с.
10. **Бронфельд, Г.Б.** Принципиальный подход к «практически вечному» сохранению знаний на основе технологии прямого наложения знаний / Г.Б. Бронфельд, Д.И. Киров // Труды VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019», Н.Новгород, ИПФ РАН, 2019, с. 54-57.
11. **Hartley, R.V.L.** "Transmission of Information," Bell System Technical Journal, July 1928 P. 533–541.
12. **Shannon, C.E.** A Mathematical Theory of Communication", Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379–423 & 623–656, July & October, 1948.
13. **Диброва, Е.И.** Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц: в 2 частях / Е.И. Диброва, Л.Л.Касаткин, Н.А. Николина, И.И.Щеболева. – М.:Изд.центр «Академия», 2008.

14. **Соломоник, А.Б.** Язык как знаковая система / А.Б. Соломоник. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. – 224 с.

15. **MacKay, D. M.** The nomenclature of information theory. In: Proceedings of the information theory symposium. Reprinted as Appendix of MacKay, D. M. Information, mechanism and meaning. - MIT Press, 1969. - 196 p.

16. **Лукин, В.А.** Художественный текст: Основы лингвистической теории. Аналитический минимум / В.А. Лукин. – М.: Изд-во «Ось-89», 2009. - 560 с.

**E.N Samarin, G.B.Bronfeld, D.I. Kirov**

## **SEMANTIC INFORMATION UNITS AND MOLINGS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The problem of semantic information units in texts, their varieties and the role of semantic information units for understanding the meaning of texts is considered.

**Design/methodology/approach:** The description of semantic information units is given. The features of semantic information units are specified. The nesting of semantic information units is shown. The connection of semantic information units with the cores of knowledge models molings for intelligent systems obtained by technology of direct imposition of knowledge is demonstrated.

**Findings:** The use of semantic information units and their relationships on a semantic basis allows us to justify the use of knowledge models in the form of molinga, to introduce a mode technology of direct imposition of knowledge is demonstrated to create intelligent systems in the variant of elinga and close to them. They also provide grounds for an additional explanation for the successful acquisition of a coherent text in logical inference from the knowledge base of molings in elinga and similar varieties of intelligent systems.

**Research limitations/implications:** The review must be conducted within a specific language environment. Approaches in different languages and cultures may differ slightly

**Originality/value:** For the first time, we demonstrate the relationship of semantic information units with the cores of knowledge models molinga for intelligent systems obtained using technology of direct imposition of knowledge.

**Keywords:** information units, semantic information units, text, knowledge, molinga.

А.Г. Бурова, Ю.С. Егоров, А.А. Алпеева

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе проводится исследование методов обработки естественного языка с применением облачных сервисов. Рассматриваются этапы создания нейронной сети, необходимой для разметки текста нужным образом, подготовки данных для обучения и преобразования псевдо-разметки в SSML-формат.

**Ключевые слова:** обработка естественного языка, синтез речи, нейронная сеть, облачный сервис.

В настоящее время аудиокниги стали частью повседневной жизни человека. Для того чтобы создать аудиокнигу нужен диктор, и несколько часов его работы. Кроме того, человеческие голоса имеют акценты, речевые дефекты и много других аспектов, которые могут не нравиться слушателю. Помимо этого, чаще всего аудиокниги озвучиваются одним человеком; в таком случае, реплики женщин, поданные мужским голосом, звучат, как правило, неестественно.

Решением описанных проблем может быть озвучивание текстов книг искусственно обученными голосами. На данный момент существует множество естественных голосов на разных языках, обученных на сетях WaveNet, которые сложно отличить от голоса грамотного оратора. Основная глобальная задача – осуществить автоматическое преобразование текста в речь с разными голосами (в диалогах, повествовании), с разной эмоциональной окраской, с наличием осмысленных пауз в тексте, с увеличением и уменьшением громкости в нужные моменты времени и с другими особенностями, которые делают аудиокнигу более «живой» и интересной для слушателя.

Задача синтеза текста в речь будет решена с помощью облачного сервиса Google Text-to-Speech. Основную сложность составляет создание нейронной сети, которая будет размечать текст нужным образом, осуществлять подготовку данных для обучения и преобразования псевдо-разметки в SSML-формат.

Несколько аспектов, которые необходимо определять в исходном тексте для преобразования в аудио:

- Разные голоса как в рамках одного, так и разных гендеров.

В случае разговора двух, трех и более людей, для того чтобы слушателю было удобнее различать героев. В данном варианте сложной задачей является определение пола говорящего героя, так как в некоторых языках, например в английском, нет рода слов, и без контекста предложения кажутся обезличенными.

- Разные акценты.

В случае присутствия в книге героев разной национальности.

- Паузы в тексте.

Делает речь более естественной, приближенной к человеческой речи в реальной жизни.

- Громкость речи.

Аналогично скорости речи в разные моменты громкость речи может быть выше или ниже.

- Скорость речи.

В моменты спора, объяснений и во многих других случаях люди говорят быстрее. В моменты спокойствия и дружеских бесед – медленнее. Также скорость речи может быть особенностью конкретного героя.

- Высота тона.

- Эмоциональная окраска голоса

Высота и эмоциональная окраска тона голоса достаточно сильно влияют на восприятие текста слушателем, поэтому можно определять окраску куска текста и придавать ему некоторую эмоциональность в голосе говорящего.

- Несколько голосов одновременно (спор, толпа).

При озвучивании книг одним человеком невозможно без специальных средств озвучить толпу, говорение нескольких людей одновременно.

Описанная задача может быть решена использованием нейронной сети и облачных сервисов. Для обеспечения обработки естественного языка с применением облачных сервисов необходимо пройти через следующие этапы:

- Сбор достаточного количества текстовых данных для датасета.

- Обработка текста:

- Разметка датасета.

- Применение Word Embedding к входным и выходным данным.

- Определение структуры нейронной сети и её обучение.

- Интерпретация выходных данных с нейронной сети в язык разметки SSML

- Использование сервиса Text-to-Speech для синтеза текста и создание аудио-файла.

В поставленной задаче структура текста, знаки препинания являются важными аспектами текста, поэтому удаления шума, знаков препинания не должно происходить. Кроме того, на выходе нейронной сети должен быть текст, аналогичный входному, соответственно лемматизация и токенизация также не должны проводиться.

Для того чтобы нейронная сеть могла «понять», где находится речь героя, ей необходимо «видеть» такие знаки препинания, как тире или кавычки. Поэтому предложения внутри и вне кавычек должны кодироваться отдельно, а кавычки и тире – также отдельно.

Одним из способов представления текста в числовом формате является word embedding.

Word embedding – это заученное представление для текста, где слова, имеющие одинаковое значение, имеют похожее представление. Именно этот подход к представлению слов и документов может считаться одним из ключевых достижений глубокого изучения сложных проблем обработки естественного языка.

Вложения слов на самом деле представляют собой класс методов, в которых отдельные слова представлены в виде векторов с действительными значениями в заранее определенном векторном пространстве. Каждое слово сопоставляется с одним вектором, и значения вектора изучаются способом, который напоминает нейронную сеть, и, следовательно, техника часто сводится в область глубокого обучения.

Ключом к подходу является идея использования плотного распределенного представления для каждого слова. Одним из способов word embedding является word2vec. Word2vec – технология, разработанная компанией Google для нахождения семантических связей между словами. Word2Vec включает в себя набор алгоритмов для расчета векторных представлений слов, предполагая, что слова, используемые в похожих контекстах, означают похожие вещи, то есть семантически близки [1].

Технология Word2Vec использует два разных метода:

- CBOW – предсказание слова на основании близлежащих слов.
- Skip-gram – предсказание близлежащих слов на основании одного слова.

При расчете используются искусственные нейронные сети. Во время обучения алгоритм формирует оптимальный вектор для каждого слова с помощью CBOW или skip-gram [2]. Схема формирования вектора представлена на рис. 1.

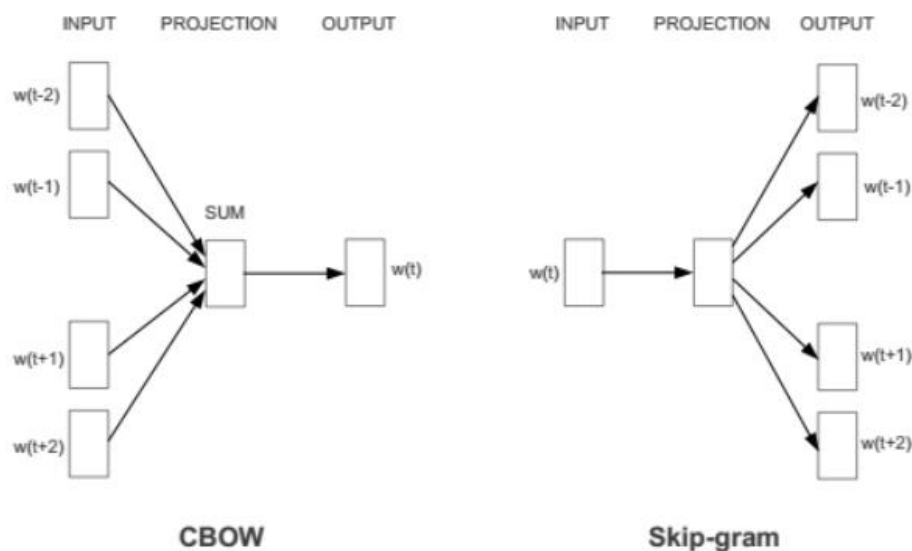


Рисунок 1. Формирование вектора

На рис.1  $w(t)$  – исходное слово,  $w(t-2)$ ,  $w(t-1)$  и т.д. – близлежащие слова.

Метод представления слов в виде векторов используется для кластеризации слов и выявления их семантической близости, то есть разделяет несвязанные слова и соединяет связанные, что помогает в задачах кластеризации и классификации текстов.

Алгоритм работы word2vec:

- читается корпус, и рассчитывается встречаемость каждого слова в корпусе.
- массив слов сортируется по частоте, затем удаляются редкие слова.
- строится дерево Хаффмана (для кодирования словаря – это значительно снижает вычислительную и временную сложность алгоритма).
- из корпуса читается т.н. субпредложение (базовый элемент корпуса – предложение, абзац, статья) и проводится субсэмплирование (процесс изъятия наиболее частотных слов) из анализа.
- по субпредложению проходим окном (максимальная дистанция между текущим и предсказываемым словом в предложении).
- применяется нейросеть прямого распространения с функцией активации иерархической софтмакс и/или негативное сэмплирование [3].

Исходный текст преобразуется алгоритмом в векторы, которые подаются на нейронную сеть. На выходе истинным значением будут также векторы, которые получены из того же текста, который получен после разметки. Затем полученный текст подается на функцию, которая преобразует псевдо-разметку в SSML. SSML или Speech Synthesis Markup Language – язык разметки текста для синтезирования его в аудио речь, он содержит в себе теги, которые описывают то, как должен произноситься текст [5].

Используемые теги:

<speak> – корневой элемент для синтезирования текста в речь,

<say-as> – элемент, указывающий информацию о типе текстовой конструкции.

В поставленной задаче на входе и на выходе нейронной сети должен быть один и тот же текст с некоторыми различиями. Исходя из этого утверждения, можно сделать вывод, что сети с классификацией и регрессией не подходят, в данном случае наиболее подходящая сеть – автоэнкодер со сверточными слоями (рис. 2).

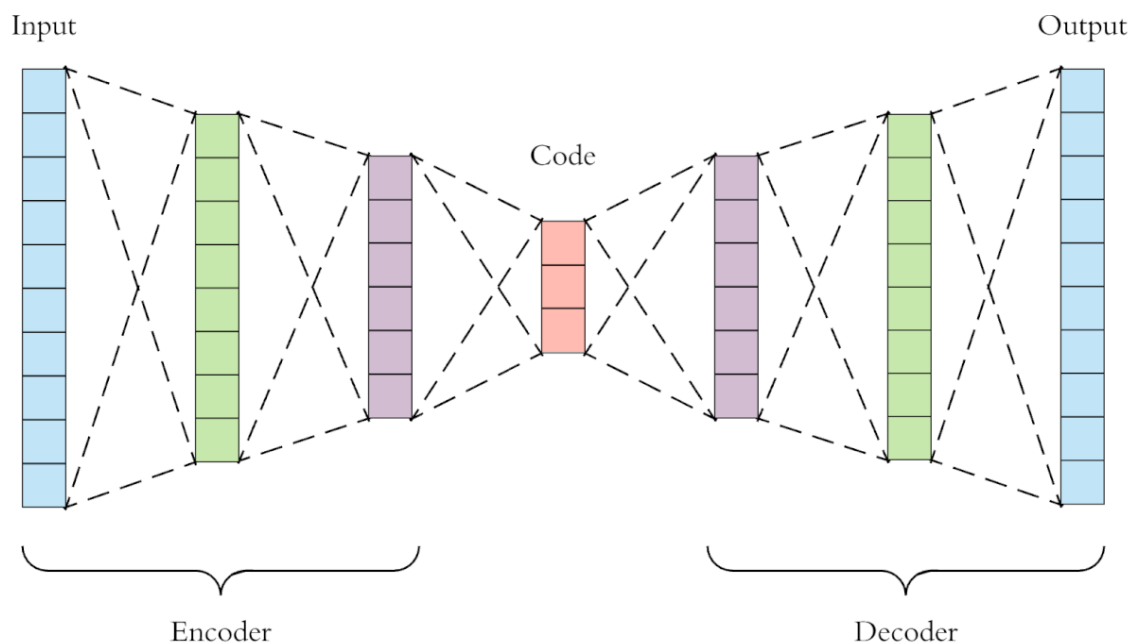


Рисунок 2. Автоэнкодер

Autoencoder (автокодер, автоэнкодер, АЕ) – нейронная сеть, которая копирует входные данные на выход. По архитектуре похож на персептрон. Автоэнкодеры сжимают входные данные для представления их в latent-space (скрытое пространство), а затем восстанавливают из этого представления output (выходные данные). Цель – получить на выходном слое отклик, наиболее близкий к входному. Рис. 2 отражает суть работы автоэнкодера.

Отличительная особенность автоэнкодеров – количество нейронов на входе и на выходе совпадает. Автокодер состоит из двух частей:

- Энкодер: отвечает за сжатие входа в latent-space. Представлен функцией кодирования  $h = f(x)$ ;

- Декодер: предназначен для восстановления ввода из latent-space. Представлен функцией декодирования  $h = f(x)$ .

Google Cloud Text-to-Speech преобразует текст в человеческую речь в более чем 180 голосах на более чем 30 языках. Он применяет новаторские исследования в области синтеза речи (WaveNet) и мощных нейронных сетей для передачи высококачественного звука. WaveNet имеет встроенный API для пользователей.

Google Cloud Text-to-Speech API также предлагает группу голосов, генерируемых с использованием модели WaveNet, той же технологии, которая используется для создания речи для Google Assistant, Google Search и Translate. Эта технология представляет новый способ создания синтетической речи.



WaveNet генерирует речь, которая звучит более естественно, чем другие системы преобразования текста в речь. Он синтезирует речь с более похожими на человека акцентами склонениями на слоги, фонемы и слова. В отличие от большинства других систем преобразования текста в речь модель WaveNet создает необработанные звуковые сигналы с нуля. Модель использует нейронную сеть, которая была обучена с использованием большого объема речевых образцов. Во время обучения сеть извлекает основную структуру речи, например, какие тоны следуют друг за другом, как выглядит реалистичный речевой сигнал. При вводе текста обученная модель WaveNet может генерировать соответствующие речевые сигналы с нуля по одной выборке за раз, со скоростью до 24000 выборок в секунду и плавными переходами между отдельными звуками [6].

WaveNet – это нейросетевая архитектура, вдохновлённая недавними достижениями в сфере нейросетевых авторегрессивных генеративных моделей, описывающих сложные распределения, такие как картинки и текст. WaveNet – это модель для генерации аудио, основанная на PixelCNN [2]. Аудио сигналы получаются с помощью генеративной модели, оперирующей напрямую с необработанным цифровым сигналом, описывающим звуковую волну. Совместная вероятность волны  $x = \{x_1, \dots, x_t\}$  описывается как произведение условных вероятностей уравнением:

$$p(x) = \prod_{t=1}^T p(x_t | x_1, \dots, x_{t-1}) \quad (1)$$

Архитектура WaveNet представлена на рис. 3.

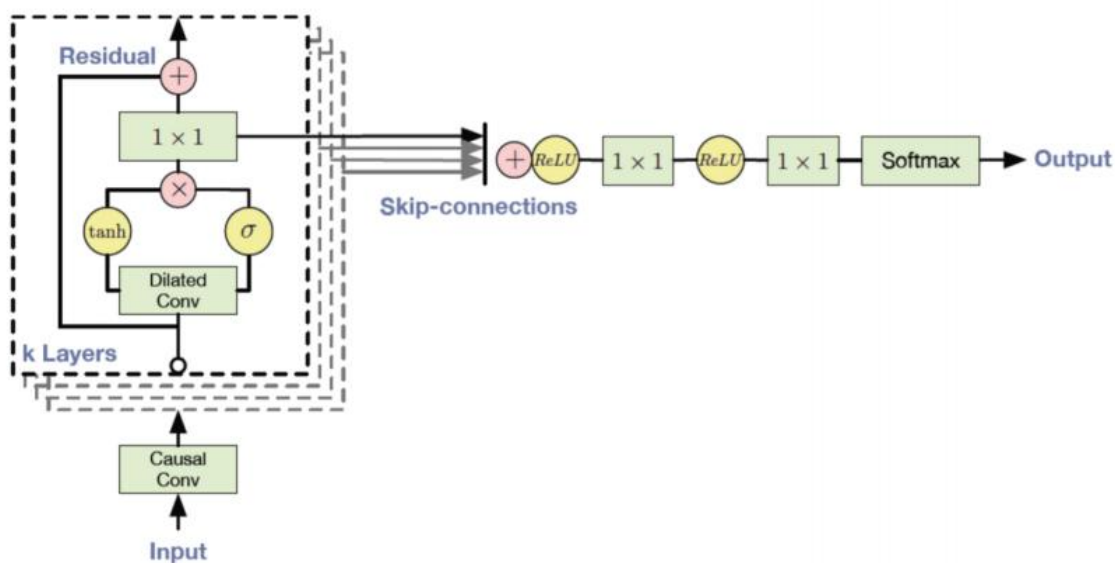
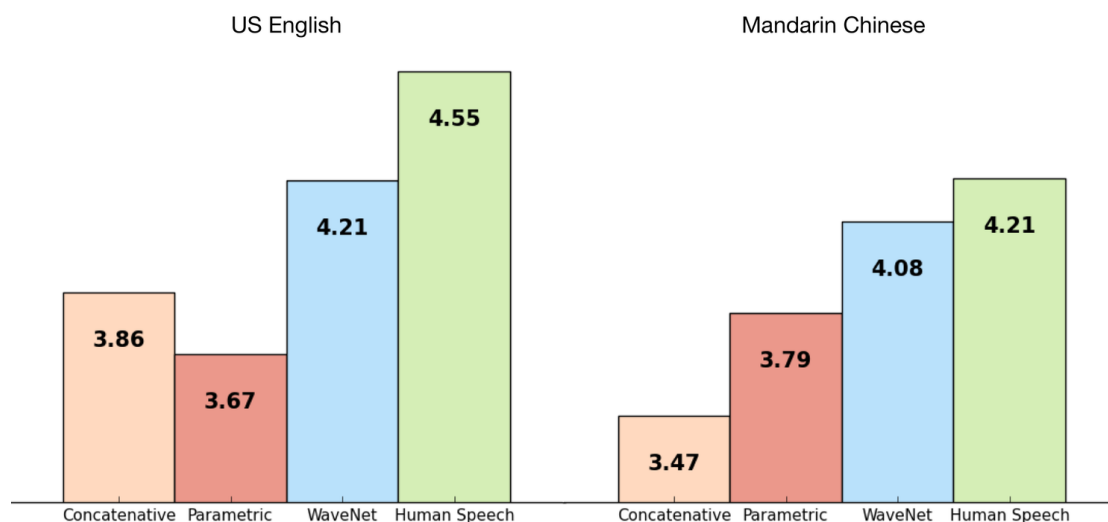


Рисунок 3. Архитектура WaveNet

Skip-соединение в нейронной сети – это соединение, которое пропускает слой и соединяется к следующему доступному слою. В общем случае может быть пропущен более чем один слой. Residual соединение присоединяется к предыдущему слою. В архитектуре используются residual и параметрические skip соединения, чтобы ускорить сходимость и позволить обучение более глубоких моделей.

На рис. 4 представлено сравнение подобию WaveNet с другими моделями синтетического голоса и человеческой речью [4].



**Рисунок 4. Результаты равнения WaveNet с другими моделями синтетического голоса и человеческой речью [4]**

Таким образом, можно заключить, что модель WaveNet применима для решения поставленной задачи с использованием Google Cloud Text-to-Speech API.

#### **Библиографический список**

1. Natural language processing for online applications : text retrieval, extraction, and categorization / Peter Jackson, Isabelle Moulinier. p.cm.(Natural Language Processing, ISSN 1567–8202 ; v.5)
2. **Большакова, Е.И.** Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика: учеб. пособие / Большакова Е.И. [и др.] – М.: МИЭМ, 2011. – 272 с.
3. A Simple Introduction to Natural Language Processing [Электронный ресурс]. – URL: <https://becominghuman.ai/a-simple-introduction-to-natural-language-processing-ea66a1747b32?gi=d470ce500ea8>. Дата обращения: 31.01.2020.
4. Kurbanov? Rauf. Tensorfow WaveNet : local conditioning [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Rauf-Kurbanov/tensorflow-wavenet/tree/local\\_conditioning](https://github.com/Rauf-Kurbanov/tensorflow-wavenet/tree/local_conditioning). Дата обращения: 31.01.2020.
5. Speech Synthesis Markup Language (SSML) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/speech-synthesis11/#S3.2.4> Дата обращения: 31.01.2020.
6. Speech generation with individual characteristics/Rauf Kurbanov - SAINT-PETERSBURG ACADEMIC UNIVERSITY – 35 p.

**A.G. Burova, Y.S. Yegorov, A.A. Alpeeva**

#### **RESEARCH OF METHODS FOR PROCESSING NATURAL LANGUAGE USING CLOUD SERVICES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The study of methods for processing natural language using cloud services. The stages of creating a neural network necessary for marking up the text in the right way, preparing data for training and converting pseudo-markup to SSML format are considered.

**Key words:** natural language processing, speech synthesis, neural network, cloud service.

Л.А. Васильева, Ю.С. Егоров, В.С. Шибанова

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДАКТИЛЬНЫХ ЗНАКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Работа посвящена вопросам применения AR-технологий при распознавании языка жестов для онлайн обучения с целью расширения возможностей коммуникации людей с проблемами слуха и речи с окружающим миром. Приведен пример использования системы в интерактивном режиме при взаимодействии с датчиком захвата движения рук LeapMotion.

**Ключевые слова:** дополненная реальность, распознавание образов, обработка данных, дактильная азбука, система обучения.

Мировые исследования автоматического распознавания жестов включают в себя такие области, как распознавание образов, компьютерное зрение и т.д. Несмотря на сложность визуального анализа, жесты рассматриваются как очень важная функция во многих практических интерактивных приложениях для взаимодействия человек-компьютер. По типу показа все жесты делятся на статические и динамические. При воспроизведении статического жеста не возникает необходимости в непрерывном движении рук, так как положение кисти и пальцев рук неизменно в пространстве по истечении времени. Динамические жесты, в свою очередь, воспроизводятся путем движения какой-либо части человеческого тела, в большинстве случаев кистью руки во времени и пространстве.

Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения в мире 360 млн человек страдают от инвалидизирующей потери слуха, из них 32 млн детей – что составляет более 5% от 7 млрд человек от общего числа населения.

Дактилология – это форма общения, использующая дактильную азбуку, с помощью которой транслируются движения пальцев рук в орфографическую форму. Существуют значительные различия между жестовым языком и пальцевым алфавитом. Жестовые знаки, в первую очередь, представляют собой целые слова, в то время как пальцевым алфавитом передают звуки речи (буква за буквой).

Буквы из дактильного алфавита, называемые дактилемы, воспроизводятся пальцами рук, то есть каждая позиция пальцев обозначает определенную букву, аналогичную буквенному алфавиту; по очертанию значительное число из них отдаленно напоминают буквы печатного шрифта (например, «о», «м», «г», «ш»). Дактильная речь адресована, в большинстве случаев, к глухому собеседнику, который воспринимает зрительно дактилирование и зрительно же устную речь разговаривающего.

На 2020 год в мире используется больше более 40 дактильных алфавитов и систем. Количество знаков в «пальцевом алфавите» аналогично количеству знаков в алфавите самого языка, хотя встречаются случаи, когда количество знаков не равно. Например, в России 30 знаков представляют 33 буквы разговорного языка, а в Китае 30 знаков демонстрируют символы алфавита «пиньинь», которым пользуются до сих пор.

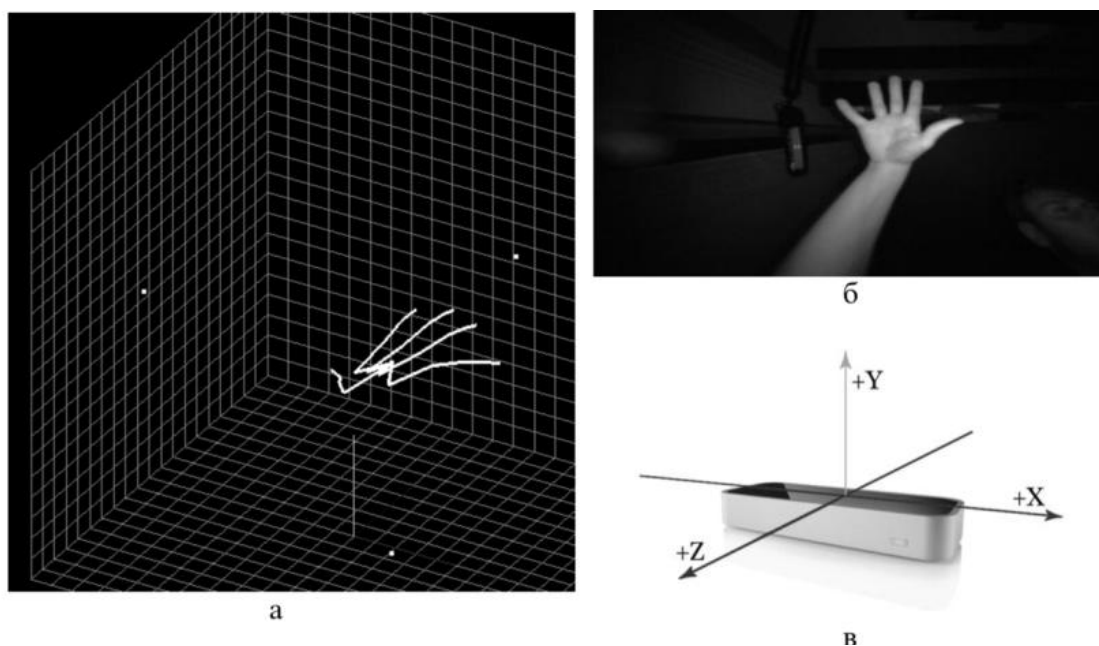
Русский дактильный алфавит представляет собой жестовую систему, в которой каждому жесту соответствует буква русского алфавита (рис. 1). Русский дактильный алфавит используется наряду с полноценным жестовым языком для проговаривания отдельных терминов, для которых отсутствует специальных жест, для демонстрации имен собственных, а также для общения с людьми, не владеющими полноценными жестовыми языками, но освоившими простую алфавитную систему. Также подобная система может использоваться для человеко-машинного взаимодействия, когда другие способы ввода затруднены. Русский дактильный алфавит состоит из 32 жестов. Все жесты показываются одной рукой, для правой - правой, для левой - левой (в зеркальном представлении). В конфигурации жеста участвует только кисть и мелкая моторика пальцев. Жестовая система состоит из 23 статических и 9 динамических жестов.



Рисунок 1. Русская и английская дактильные азбуки [2]

В 2013 году компания OcuSpec начала продажи датчика захвата движения рук LeapMotion. Благодаря разработке появились новые возможности применения дополненной реальности при распознавании языка жестов.

Сенсор захвата движений LeapMotion предназначен для детектирования и трекинга положения рук в пространстве с высокой детализацией, вплоть до координат отдельных фаланг. Сенсор представляет собой портативное устройство размером 80x30x10 мм, включающее две ИК камеры и ИК подсветку (рис. 2). Результатом трекинга является скелетная модель руки в виде пространственных координат всех узлов с погрешностью от 25 до 60 мм, в зависимости от положения руки. Опыт использования показал, что в случае сложной конфигурации руки, включающей перекрытия, возможны незначительные ошибки в трекинге.



**Рисунок 2. Сенсор захвата движений LeapMotion:** *а* - результаты трекинга LeapMotion (скелетная модель), *б* - необработанное изображение СИК-камеры LeapMotion, *в* - внешний вид устройства LeapMotion с направлением осей системы координат

Сенсор LeapMotion создан как устройство для обеспечения человеко-машинного взаимодействия в технологиях виртуальной реальности, однако часто используется и как база распознавания различных жестовых систем.

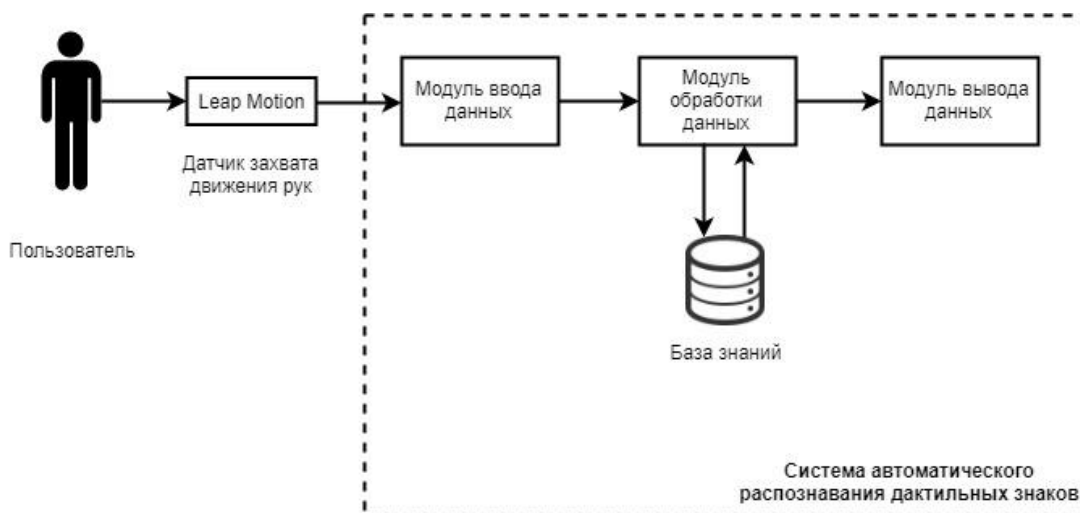
В настоящее время уже существуют программно-технические решения в области распознавания языка жестов, но они направлены на перевод языка жестов, в отличие от предлагаемого решения, которое направлено в первую очередь на обучение и работает на основе AR-технологий. Система будет подсказывать пользователю, что знак показан некорректно, а также оказывать поддержку при обучении.

Существует несколько определений дополненной реальности. Исследователь Рональд Азума в 1997 году определил её как систему, которая совмещает виртуальное и реальное, взаимодействует в реальном времени и работает в трехмерном пространстве [3].

В качестве входных данных для системы автоматического распознавания дактильных знаков используется видеопоток с контроллера и координаты положения кистей. На выходе формируются результаты распознавания, дополненные текстовыми сообщениями, и индивидуальная статистика о количестве успешно распознанных знаков. Основные процессы системы осуществляются на основе базы знаний и таймера, используемого при вводе данных, с участием пользователя.

Видеопоток с контроллера и координаты положения кистей характеризуют состояние пользователя и поступают в блок ввода данных. В результате формируются данные мониторинга контроллера и вектор координат, которые передаются в блок обработки данных. Под управлением базы знаний определяются данные о результатах анализа и сохраняются данные мониторинга контроллера. Эти данные поступают в блок вывода данных, который отображает на экране результат распознавания, дополненный текстовыми сообщениями, и индивидуальную статистику о количестве успешно распознанных знаков.

Архитектура системы автоматического распознавания дактильных знаков приведена на рис. 3.

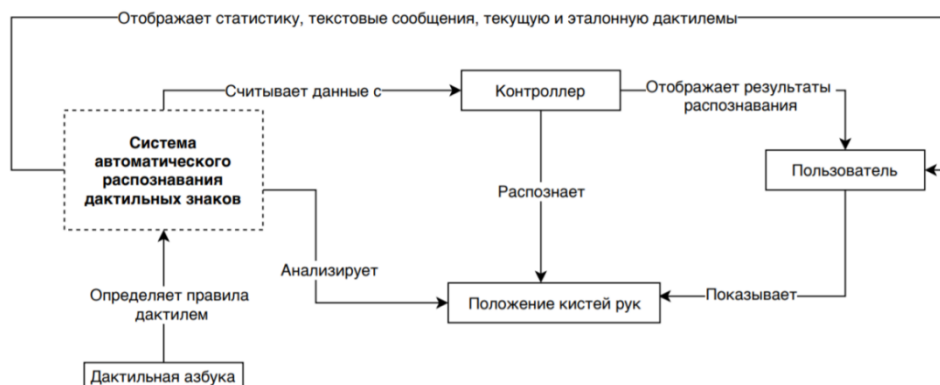


**Рисунок 3. Архитектура системы автоматического распознавания дактильных знаков**

Такая система должна обладать возможностью самообучения. Прототип включает в себя комплекс функциональных и информационных моделей, составляющих базу знаний, наравне с базой правил логического вывода, необходимых для обеспечения возможности поддержки принятия решений при формировании индивидуальных траекторий обучения пользователей. На основе начальных знаний будут формироваться начальные модели, которые можно применить для моделирования дактилем. Траектория обучения – последовательность действий, которые необходимо выполнить пользователю, чтобы корректно показывать дактильные знаки.

Система автоматического распознавания дактильных знаков принимает решения по изменению эталонной дактилемы в базе знаний в случае неверного воспроизведения знака в течение трех раз. Каждый жест характеризуется набором координат, необходимых для дальнейшего сопоставления. Процент отклонения от эталонных координат может изменяться от попытки к попытке, но быть не менее 50% для перехода к следующему знаку.

Под концептуальной моделью понимается модель объекта, представленная в виде информации, описывающей существенные параметры и переменные величины этого объекта, связи между ними, входы и выходы, что позволяет выявить возможные состояния объекта. Разработанная концептуальная модель системы автоматического распознавания дактильных знаков представлена на рис. 4.



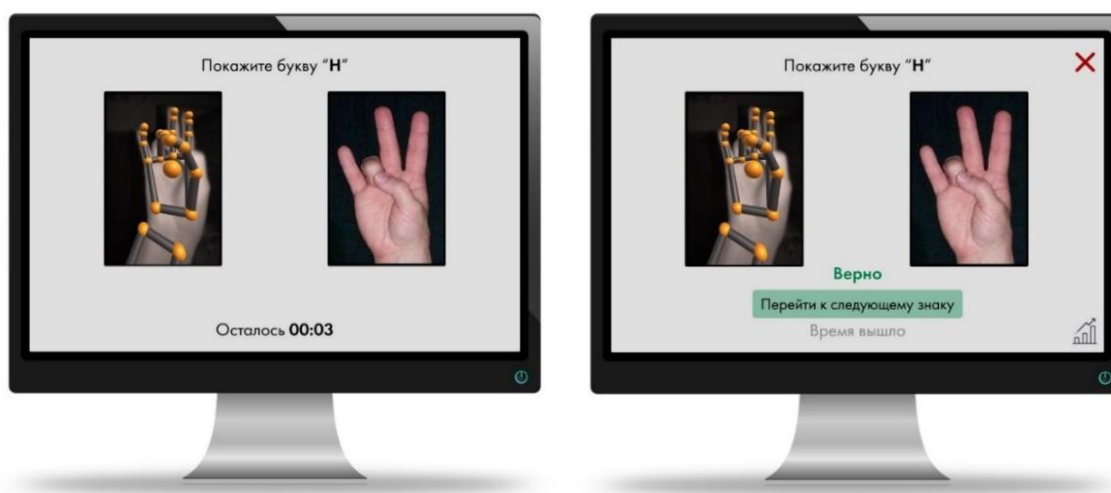
**Рисунок 4. Концептуальная модель системы автоматического распознавания дактильных знаков**

Пользователь в процессе изучения дактильной азбуки показывает положение кистей рук, которые распознаются контроллером. Система автоматического распознавания дактильных знаков анализирует показанные положения кистей рук на основе определенных правил дактилем. Данные, распознанные контроллером как фон для дактиля, и текущая эталонная дактилема, статистика, текстовые сообщения отображаются пользователю.

По мере накопления данных и их анализа произойдет уточнение знаний, соответственно уточнятся и модели, а их применение будет становиться все более адекватно реальности [4].

Разработанный продукт возможно использовать в рамках социальной сферы, в частности, социальной работы. Основные группы потребителей могут составить: специализированные учреждения социальной сферы; здоровые люди, желающие обучиться дактильной азбуке; слабослышащие и глухонемые люди.

На рис. 5 продемонстрирован пример работы системы при воспроизведении верной дактилемы.



**Рисунок 5. Пример работы системы при воспроизведении верной дактилемы**

При использовании верификации (точного определения знака среди множества) и валидации (корректного формирования траектории обучения) будет возможно изучать дактильную азбуку в режиме онлайн с исправлением ошибок на первых этапах и без использования учителя. Разработанные таким образом библиотеки могут содержать дактильные алфавиты различных мировых языков, что позволит решить одну из актуальных проблем, связанных с распознаванием дактильных знаков. Автоматическое распознавание знаков русской дактильной азбуки с использованием технологий дополненной реальности позволит расширить возможности коммуникации глухонемых людей с окружающим миром.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №13954ГУ/2019 от 24.04.2019 г.).

### **Библиографический список**

1. **Дорофеев, Н.С.** Система распознавания дактильных жестов русского языка глухих / Н.С. Дорофеев, В.Л. Розалиев, Ю.А. Орлова, А.Н. Солошенко // Известия ВолгГТУ. 2013. № 14(117). - С. 42-45.

2. **Зайцева, Г. Л.** Жестовая речь. Дактилология: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Г.Л. Зайцева. – М.: Гуманитар. изд. центр ВЛАДОС, 2015 г. – 192 с.
3. **Azuma, R.** A Survey of Augmented Reality Presence: Teleoperators and Virtual Environments, pp. 355-385, August 1997.
4. **Баранов, В.Г.** Способы аналитической обработки для системы поддержки принятия решений / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, Б.А. Суслов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 2. С. 12-15.
5. **Васильева, Л.А.** Разработка интерактивного программного комплекса для обучения дактильной азбуке с применением технологии дополненной реальности / Л.А. Васильева, Ю.С. Егоров, В.В. Мусонов // Материалы XXV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2019). – Н. Новгород: НГТУ, 2019. С. 420-423.
6. **Васильева, Л.А.** Применение технологии дополненной реальности при автоматическом распознавании дактильных знаков / Л.А. Васильева, Ю.С. Егоров, Д.А. Чупров // Материалы V Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». – Тамбов: ТГТУ, 2019. С. 21-25.

**L.A. Vasilyeva, Y.S. Yegorov, V.S. Shibanova**

**DEVELOPMENT OF THE SYSTEM FOR DACTYL SIGNS RECOGNITION  
WITH AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY APPLICATION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The work is devoted to the use of AR-technologies in recognizing sign language for online learning in order to expand the communication opportunities of people with hearing and speech problems with the environment. An example of using the system in online mode using a Leap Motion sensor is given.

**Keywords:** augmented reality; pattern recognition; data processing; dactyl alphabet; education system.



Т.И. Горячева, А.Е. Никишин, И.А. Чеснокова, Т.А. Рубцова, С.С. Нешляев

## АРХИТЕКТУРА ПЕРСПЕКТИВНОГО КОМПЛЕКСА КОГНИТИВНОЙ АВИАЦИОННОЙ РАДИОСВЯЗИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Обсуждаются вопросы построения авиационных комплексов связи на базе программно определяемого радио (*SDR – Software Defined Radio*), концепций когнитивного радио (*CR – Cognitive Radio*), когнитивного ядра (*CC – Cognitive Core*), когнитивной антенны (*CA – Cognitive Antenna*), программно определяемой сети (*SDN – Software Defined Network*), сетевого менеджмента на базе политики (*PBNM – Policy Based Network Management*) с целью поддержки одним комплексом радиосвязи нескольких протоколов обмена при снижении весов, габаритов комплекса, операционных расходов, при повышении масштабируемости, устойчивости к нововведениям, помехоустойчивости, оперативности, робастности системы связи.

**Ключевые слова:** программно определяемое радио, когнитивное радио, когнитивная антенна, программно определяемая сеть, менеджмент сети на базе политики, когнитивный двигатель, двигатель политики.

Новый стратегический бомбардировщик перспективного авиационного комплекса дальней авиации (ПАК ДА) оснащается системой скрытного когнитивного радио, благодаря чему он может вести обмен данными с другими воздушными и наземными станциями практически незаметно для систем обнаружения противника [1].

Технология когнитивного радио позволяет системам связи анализировать весь доступный для обмена данными спектр, выбирать неиспользуемые полосы частот, не занятые преднамеренными помехами, и переключаться на них, применяя для связи оптимальные сигнально-кодовые конструкции (СКК), направленные антенны, оптимальные сетевые протоколы.

Перспективные системы связи тактической и дальней транспортной авиации РФ должны строиться на концепциях:

- радио, определяемого программой (*SDR – Software Defined Radio*);
- когнитивного радио (*CR – Cognitive Radio*);
- когнитивных антенн (*CA – Cognitive Antennas*);
- сети, определяемой программой (*SDN – Software Defined Network*);
- скрытности излучений, малозаметности для радиолокаторов;
- *PBNM (PolicyBasedNetworkManagement)* - сетевого менеджмента на базе политики.

Когнитивная радиостанция функционирует согласно когнитивному циклу, предложенному Митолой [2, 3], *OOPDAL (Observe, Orient, Plan, Decide, Act, learn)* - наблюдай, ориентируйся, планируй, решай, действуй и учись. Эта петля, представленная на рис. 1, образует основу для построения когнитивного радио, его взаимодействия с внешним миром, также для непрерывного принятия решений и обучения. Когнитивная радиостанция (*CR*) должна осознавать свои возможности по улучшению алгоритмов адаптации, лучшему использованию

канала, повышению надёжности, пропускной способности, помехозащищённости и других характеристик, используя для этого:

- протокол многопараметрической адаптации линии по частоте, видам модуляции и кодирования (СКК). Все расчёты по выбору направления и ширины луча антенны, по выбору оптимальных СКК и спектральных полос осуществляет когнитивный двигатель (мозг радиостанции) (рис.2-3, табл. 1);

- протокол менеджмента сетевым уровнем на базе политик (*PBNM*), который управляет программно определяемой сетью (*SDN – Software Defined Network*), позволяя быстро и квалифицированно выбирать оптимальный протокол маршрутизации пакетов по заданному критерию для текущего сетевого сценария. Рекомендации по выбору сетевой политики выдаёт двигатель политики для когнитивного двигателя, который принимает окончательное решение.

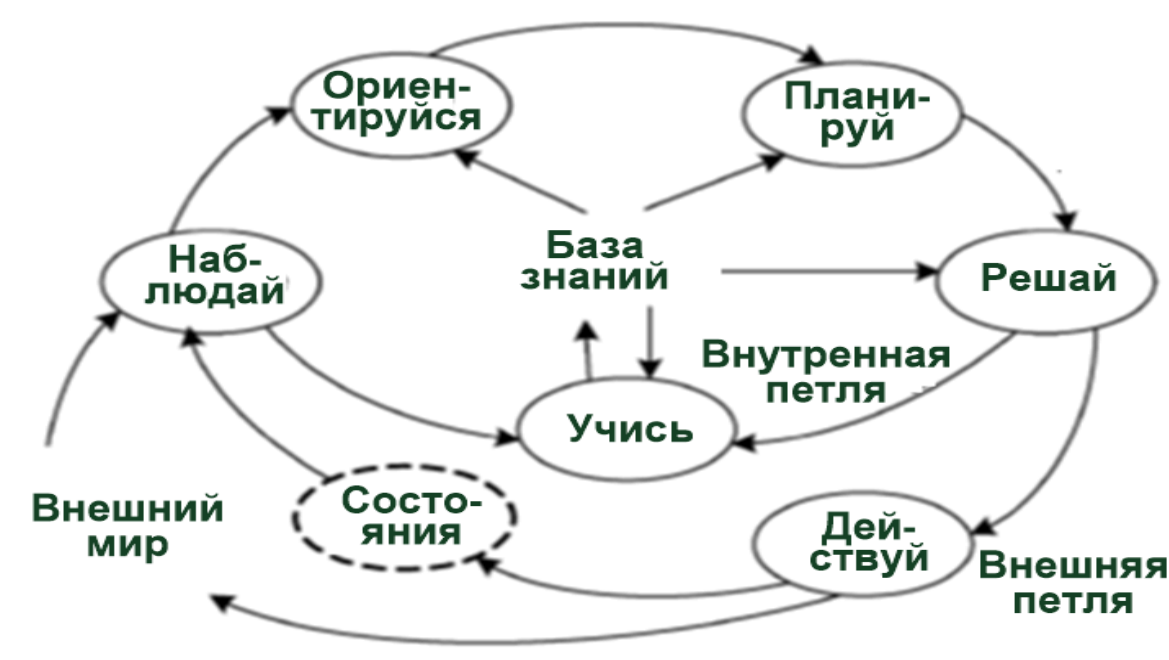


Рисунок 1. Когнитивная петля Митолы(*OOPDAL*)

Упрощенная архитектура когнитивной радиостанции [2-4] приведена на рис.2. Она содержит **когнитивный двигатель** для наблюдения за поведением стека протоколов *OSI/ISO* с целью принятия решений по оптимизации качества работы радиосистемы на основе знаний о текущем состоянии среды и априорных знаний о возможностях такой оптимизации. **Двигатель политики** определяет, может ли аппаратное обеспечение поддерживать эти оптимизации в конкретной ситуации, а также определяет, разрешено ли это регламентом управления на базе сетевой политики. **Когнитивный двигатель (CE – Cognitive Engine)** содержит **когнитивное ядро (CC – Cognitive Core)** и диспетчера задач (рис. 2), также интерфейсы внешние и внутренние. Структура CE приведена в таблице и содержит: базу знаний, ученика, аналитика, оптимизатора с описанием их функций.

## Структура когнитивного ядра

Когнитивное ядро			
База знаний	Ученик	Аналитик	Оптимизатор
База знаний; База сценариев; База данных политик; База данных обучения;	Обучение на базе ситуации (случая); Нечёткая логика; Нейронные сети;	Обоснование решения на базе ситуации (случая); Обоснование на базе политики; Экспертная система;	Генетический алгоритм; Теория игр; Анализ Марковской модели; Алгоритм муравьиного роя; и др.

Более подробная функциональная архитектура когнитивного радио приведена на рис.3. В когнитивный двигатель (CE) от детекторов внешней среды поступает пространственная и спектральная информация, также запросы пользователя на организацию виртуальных каналов связи, индикация принимаемых СКК и их качества [5].

Адаптация по протоколам маршрутизации должна осуществляться на базе политики (PBNM – Policy Based SDN Management) двигателем политики.

**Задачи когнитивного двигателя (CE) состоят в обеспечении:**

- ситуационной осведомлённости о состоянии пространственно-спектрально-временных ресурсов внешнего домена и о запросах и намерениях пользователя;
- межуровневой оптимизации и адаптации решений на всех уровнях с помощью:
  - реконфигурации СКК;
  - формирования луча адаптивной антенны;
  - пространственно - временной обработки сигналов;
  - спектральной обработки сигналов;
  - выдачи результатов вычислений и обработки сигналов на интерфейс с SDR, интерфейс внешнего домена, интерфейс поискового двигателя.

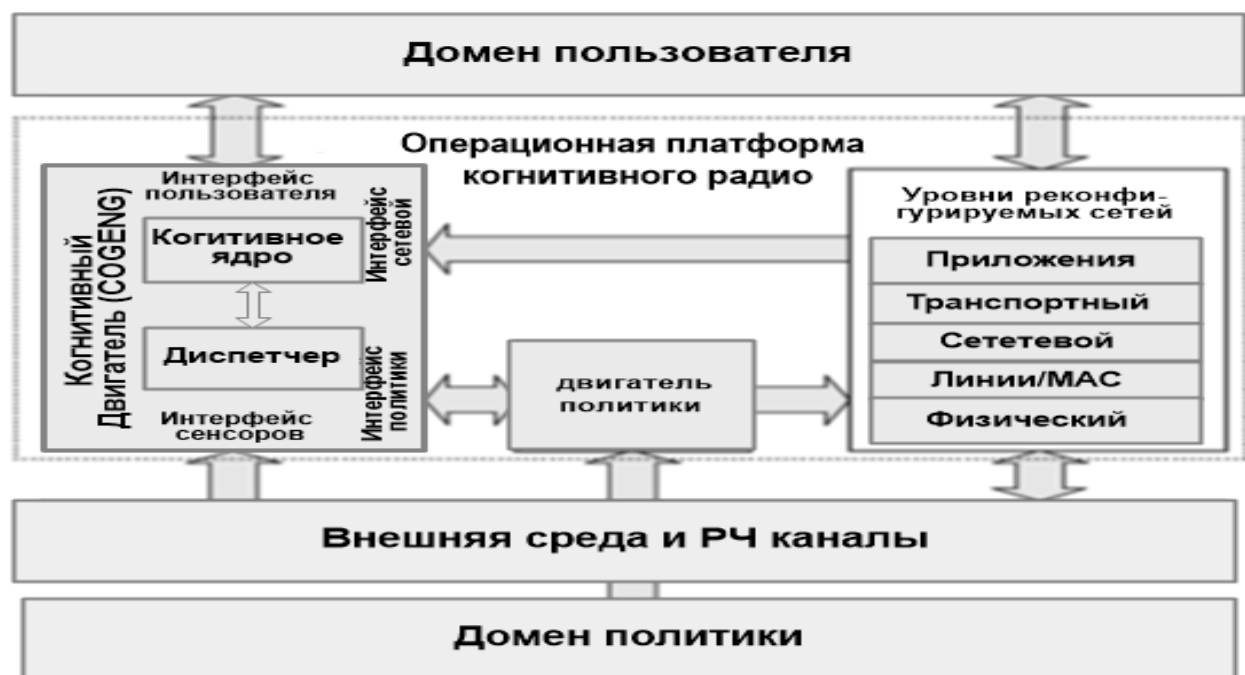


Рисунок 2. Упрощенная архитектура когнитивного радио

## Работа когнитивной антенны (СА)

Функциональные возможности CR существенно расширяются за счёт использования адаптивных направленных когнитивных антенн (СА - CognitiveAntennas) [5]: увеличивается дальность связи (до 1000 раз), пропускная способность, вероятность своевременной доставки пакета, скрытность, помехозащищённость, уменьшается задержка передачи пакета. Диаграммы излучения антенн (направление и ширина луча) адаптируются. СА может распознать не только частоту, уровень мощности источника помех, но и угол прихода помехи (AoA – AngleOfArrival). Проблема заключается в определении правильного направления и ширины луча антенны. Если используется широкий луч, то партнёр по линии связи с меньшей вероятностью выйдет из зоны луча при движении ЛА. Это улучшает пропускную способность. С другой стороны, более узкий луч передатчика уменьшает внутрисистемные помехи, повышает отношение сигнал/шум, помехозащищённость и пространство для поиска параметров.

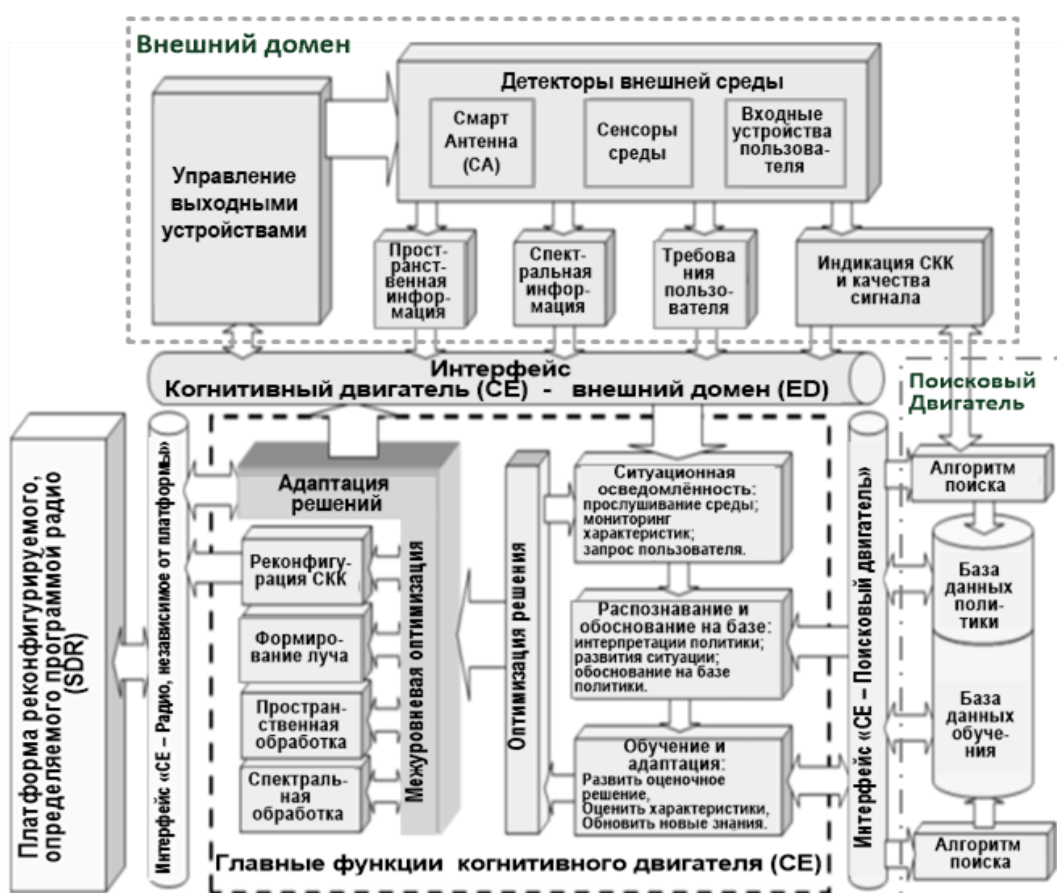


Рисунок 3. Общая функциональная архитектура когнитивного радио

Для эффективного управления антенной необходимо отслеживать 3D координаты (позицию ЛА), 3D вектор скоростей движения (и ускорений), 3D ориентацию положения корпуса ЛА (углы курса, места, наклона) свои и соседей в радиусе прямой радиовидимости (первого шага) и их соседей (второго шага). CR должна оценивать качество каналов связи с соседями с учётом прогноза дальности трассы на момент передачи пакета данных, с учётом коэффициентов усиления направленных антенн. Такими индикаторами качества каналов являются: вероятность ошибки на бит ( $BER - BitErrorRate$ ); отношение «сигнал/шум»

(*SNR – SignaltoNoseRatio*); отношение «сигнал/шум + интерференция» (*SINR*); индикатор уровня принятого сигнала (*RSSI*); задержка распространения ( $d_{FS}$ ) и потери ( $L_{FS}$ ) распространения сигнала в свободном пространстве; доплеровский сдвиг частоты ( $f_d$ ); задержка многолучевости ( $\tau_{3л}$ ); угол прихода каждого луча сигнала и прихода помехи; мощность шума ( $P_N$ ); мощность интерференции ( $P_I$ ); пик-фактор сигнала (*PAPR*); спектральная эффективность радиолинии (бит/с/Гц); время. После получения оценок указанных параметров осуществляется их линейное прогнозирование на шаг вперед, вычисление ошибки прогноза на следующем шаге и вычисление текущей оценки с учётом ошибки прогноза с весовым коэффициентом адаптивной фильтрации линейного прогнозирования многомерного вектора параметров системы в пространстве переменных состояний (*SS – StatesSpace*). Линейное прогнозирование методом *SS* показывает существенно лучшие результаты по сравнению с алгоритмами авторегрессии по критерию минимума среднеквадратической ошибки слежения и минимума вычислительной сложности [6]. Лучшим фильтром для такой линейной системы наблюдения является расширенный фильтр Калмана или стохастической аппроксимации, отслеживающий вектор многих параметров в пространстве переменных состояний по одному скалярному уравнению наблюдения.

Оптимальный набор параметров (решений когнитивного двигателя) для нескольких целевых функций лежит на, так называемом, оптимальном фронте Парето. Этот фронт представляет собой набор доминирующих решений, которые нельзя улучшить ни в одном измерении. Решения на фронте Парето являются оптимальными и сосуществуют из-за компромиссов между несколькими целями, которые ранжируются по важности с помощью разных весовых коэффициентов [7].

### **Работа когнитивного двигателя (CE)**

Когнитивный двигатель (CE) можно обновлять, добавляя новые технологии или алгоритмы вычислений в когнитивное ядро (CC). В процессе выполнения когнитивного цикла диспетчер вызывает связанные компоненты когнитивного ядра в соответствии с различными функциональными требованиями в когнитивном цикле. Например, когда когнитивный цикл получает информацию о прослушивании, диспетчер временно сохраняет информацию в базе данных в когнитивном ядре. Затем диспетчер вызывает аналитика для принятия решения, после чего диспетчер вызывает оптимизатора для оптимизации параметров. Наконец, диспетчер вызывает ученика изучить новые случаи и сформировать новые знания. Это завершает когнитивный цикл (*CL – CognitiveLoop*). Ни один шаг в познавательном цикле (*CL*) не может быть реализован без вызова соответствующей функции в когнитивном ядре (*CC*).

### **Сетевой менеджмент на базе политики (PBNM)**

Опыт эксплуатации и моделирования сетей *MANET (MobileAdHocNetwork)* и *VANET (VehicleAdHocNetwork)* [8] показывает, что невозможно создать один протокол маршрутизации, оптимальный для всех сетевых сценариев и критериев качества. Для каждого сценария и каждого критерия качества услуг должен использоваться свой оптимальный протокол маршрутизации, база которых находится в двигателе политики (*PE – PolicyEngine*), который также называют поисковым (*RE – ResearchEngine*). Адаптация сетевого уровня по протоколу маршрутизации осуществляется с помощью двигателя политики, который реализует алгоритмы сетевого менеджмента на базе политики (*PBNM - PolicyBasedNetworkManagement*) [9].

Разработка и проектирование новых технологических инструментов CR (алгоритмов CE, CC, PE) является актуальной задачей развития российской авионики, требующей безотлагательного решения для создания робастной системы когнитивной связи в сложной помеховой обстановке.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

### Библиографический список

1. Новый российский бомбардировщик получит когнитивное радио/ 13 июля 2015.; <https://nplus1.ru/news/2015/07/13/radio>.
2. **Mitola, J.** Cognitive radio architecture: the engineering foundations of radio XML. New Jersey: Wiley & Sons Inc. Publication, 2006. 488 p.
3. **Dong, X.,** Li Y., Wei S. Q. Design and implementation of a cognitive engine functional architecture // Chin Sci Bull. 2012. Vol. 57. P. 3698-3704.
4. **Jaiswa, A.,** Mohan R. Cognitive Engine: Artificial Intelligence in Wireless Communication // International Journal of Engineering and Management Research. 2012. Vol. 2. Issue-5. P. 1-4.
5. **Feng, O.,** Jerry H., Henry S., Robert N. Robust cognitive networks interfacing with cognitive antennas // MILCOM 2010 Conference Paper. December 2010. P. 1689–1694.
6. Ma X., Liao J., Djouadi S. M., Cao Q. LIPS: Link Prediction as a Service for data aggregation applications // Ad Hoc Networks. 2014. Vol. 19. P. 43–58.
7. **Newman, T. R.,** Barker B.A., Wyglinski A.M., Agah A., Evans J. B., and Minden G.J. Cognitive Engine Implementation for Wireless Multicarrier Transceivers // Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, Sept. 30, 2006, P. 1-25.
8. **Islam, M. S.,** Riaz M.A., Tarique M. Performance Analysis of the Routing Protocols for Video Streaming over Mobile Ad Hoc Networks // International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC). May 2012. Vol. 4. № 3. P. 133-150.
9. **Perich, F.** Policy-Based Network Management for NeXt Generation Spectrum Access Control // Proceedings of IEEE. DySPAN. April 2007. P. 496-506.

**T.I. Goryacheva, A.E. Nikishin, I.A. Chesnokova, T.A. Rubtsova, S.S. Neshliaev**

### ARCHITECTURE OF PROMISING COMPLEXES OF COGNITIVE AVIATION RADIO COMMUNICATIONS

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva

The issues of building aviation communication systems based on software-defined radio (SDR), concepts of: cognitive radio (CR), cognitive core (CC), cognitive antenna (CA) software-defined network (SDN), policy-based network management (PBNM) are discussed in order to support by one radio communication complex of several exchange protocols while reducing weights, complex dimensions, operating costs, while increasing scalability, resistance to innovations, resistance to interference, efficiency, robustness of the communication system.

**Keywords:** software-defined radio, cognitive radio, cognitive antenna, software-defined network, policy-based network management, cognitive engine, cognitive core, policy engine.

Н.Г. Дмитриева

## ПЛАНИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИТ-УСЛУГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается построение имитационной модели процесса поддержки ИТ-услуг для планирования ресурсов, обеспечивающих требуемый уровень сервиса.

**Ключевые слова:** поддержка ИТ-услуг, ИТ-служба, уровень сервиса, система массового обслуживания, *AnyLogic*.

Эффективность работы любого предприятия во многом определяется рациональной организацией бизнес-процессов, во многом зависящих от их информационного обеспечения.

Процессный подход к организации деятельности ИТ-службы предприятия предполагает следование модели «клиент-поставщик» в отношениях с «бизнесом». ИТ-служба рассматривается как поставщик набора ИТ-услуг (сервисов), перечень и параметры которых задает «бизнес», исходя из своих потребностей и доступных ресурсов. При этом возникает задача точной оценки затрат ИТ-ресурсов при заданных параметрах сервиса и необходимость оперативно оптимизировать организационную структуру ИТ-службы.

При планировании ИТ-ресурсов необходимо добиваться компромисса между обеспечением необходимого качества предоставления ИТ-услуг и затратами.

Для моделирования бизнес-процессов оказания ИТ-услуг можно использовать раздел теории вероятностей – системы массового обслуживания (СМО), позволяющий исследовать и оценивать параметры и эффективность процессов обслуживания [1,2]. При этом ставится задача обеспечить связь между количественными характеристиками СМО и качественными характеристиками процесса обслуживания [3]. Имитационное моделирование СМО, выполненное с применением современных инструментальных средств, может с успехом использоваться при планировании деятельности ИТ-службы.

Рамочной моделью для организации процессов управления, выполняемых ИТ-службой предприятия, отражающей процессный подход, является библиотека инфраструктуры информационных технологий *ITIL(ITInfrastructureLibrary)*, Согласно *ITIL*, процессы управления делятся на две группы: процессы поддержки ИТ-услуг и процессы их предоставления [4]. Эти группы характеризуют оперативные, ежедневные обязанности и функции по поддержанию ИТ-услуг, и тактические, определяющие требуемое качества ИТ-услуг.

Работа ИТ-службы, как точки контакта с пользователями, заключается в приеме и обработке обращений пользователей в службу поддержки. Обращения возникают в связи с инцидентами, проблемами и запросами на изменения.

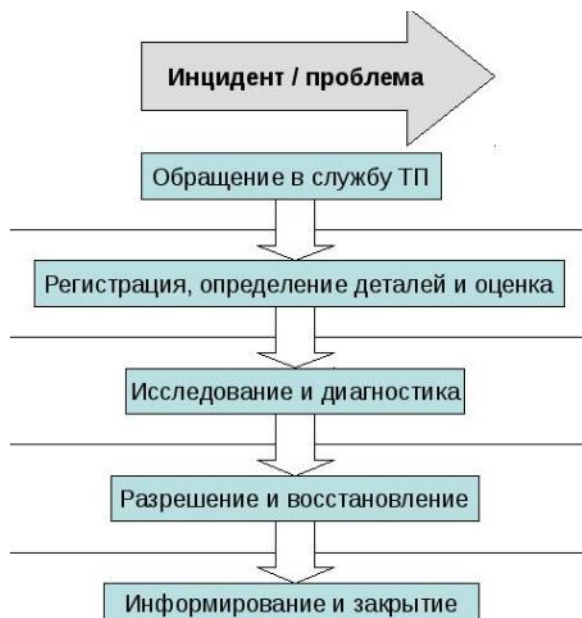
Основные функции управления инцидентами: регистрация, решение и отслеживание инцидентов, а так же их анализ и объяснение с целью возможного предотвращения.

При обслуживании инцидентов определяющим является управление уровнем услуг в соответствии с требованиями заказчика, сформулированными в соглашении об уровне услуг (*SLA*). Метриками качества процесса управления инцидентами являются длительность ин-

тервала времени разрешения инцидента, число возникающих инцидентов, время непрерывного использования услуги и др.

Соблюдение сроков разрешения инцидентов в соответствии с согласованным уровнем качества предоставления услуги является основной задачей деятельности по поддержке ИТ-услуг.

На рис. 1 приведена схема работы службы технической поддержки по разрешению инцидентов.



**Рисунок 1. Схема работы службы технической поддержки**

Все поступающие обращения оформляются оператором в заявки, которые затем классифицируются на предмет обращения и оценки степени влияния. Оператор образует первую линию поддержки оказания ИТ-услуг. Для этого он использует базу знаний накопленного опыта по разрешению инцидентов и проблем. При невозможности выполнения заявки оператором происходит эскалация. Она подразумевает передачу инцидента в группу поддержки с более высокой квалификацией и компетенцией по функциональному направлению или информирование руководителей более высокого уровня о возникновении инцидента.

Использование моделей СМО для определения и оценки натуральных показателей процессов поддержки ИТ-услуг с учетом предметной деятельности предполагают наличие информации о:

- времени появления заявки на обслуживание;
- времени окончания обслуживания;
- законах распределения входного потока обращений в ИТ-службу и потока обслуживания инцидентов;
- правилах и алгоритмах разрешения инцидентов

Выводы о характере распределений случайных потоков заявок и обслуживаний делаются на основании идентификации законов распределения этих потоков и численных значений по результатам анализа работы службы поддержки.

Структура моделируемой службы технической поддержки состоит из операторов первой линии и специалистов второй линии, специализирующихся на обслуживании различных ин-



фраструктурных платформ. Формализация процесса поддержки сервиса  $S$  включает определение состава его параметров и показателей:

$$S = \langle P_1, P_2 \rangle,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - описания входного информационного потока и качества обслуживания.

$$P_1 = \langle k, M, \lambda \rangle,$$

где  $k = 1, K$  - число типов обслуживаемых компьютерных платформ;  $M = \{m_1, \dots, m_k\}$  - количество обслуживаемых компьютеров для каждой платформы;  $\lambda$  - интенсивность входного потока заявок.

$$P_2 = \langle \mu, N_{исп}, T_{инц}, T_{зад}, T_{обс}, SL \rangle,$$

где  $\mu$  - интенсивность потока обслуживания;  $N_{исп} = \{n_1, \dots, n_k\}$  - множество исполнителей, занятых обслуживанием  $k$  компьютерных платформ;  $T_{инц}$  - среднее время между инцидентами - показатель надежности одной единицы технических средств (*MTBSI*);  $T_{зад}$  - среднее время регистрации и классификации запроса в службе начальной поддержки, требуемое для обеспечения заданного уровня обслуживания;  $T_{обс}$  - среднее время выполнения запроса  $m$ -го типа, требуемое для обеспечения заданного уровня обслуживания;  $SL$  - уровень обслуживания, (доля заявок, обслуживаемых в течении заданного времени  $T_{зад}$ ).

Уровень обслуживания технического средства определяется как доля времени восстановления до работоспособности от времени наработки до отказа.

Для моделирования процесса поддержки ИТ-услуг используется СМО, состоящая из двух фаз, очереди, нескольких каналов обслуживания, входного потока заявок и выходного потока. Заявки представляют обращения в службу поддержки, которые должны обрабатываться в течение определенного времени. Каналы обслуживания, занимаемые заявками, представляют обслуживающий персонал. Выходной поток образуют обработанные заявки - обращения.

Вследствие случайного характера процессов, в системе могут возникать ситуации, приводящие к появлению очередей, увеличению времени обработки и снижению уровня качества обслуживания. Для поддержания требуемого уровня обслуживания необходим резерв ресурсов, позволяющий минимизировать этот эффект.

Целью имитационного моделирования процесса поддержки ИТ-услуг является определение среднего количества технических работников, требующееся для обеспечения заданного уровня услуги ( $SL$ ).

Планирование необходимого количества ресурсов для процессов обслуживания, имеющих стохастическую природу, определяется зависимостью между следующими характеристиками СМО:

- интенсивностью входящего потока заявок  $\lambda$  (среднее число заявок, поступающих в единицу времени);
  - интенсивностью обслуживания  $\mu$  (величина обратная среднему времени обслуживания заявки);
  - числом серверов (специалистов)  $n$  - является искомым параметром;
  - временем пребывания заявки в СМО -  $T_{смo} = T_{ожид} + T_{обс}$ ,
- где  $T_{ожид}$  - время ожидания в очереди,  $T_{обс}$  - время обслуживания;
- уровнем обслуживания  $SL$  (долей заявок, для которых  $T_{смo}$  не превышает  $T_{зад}$ ).

Модель разрабатывалась в системе имитационного моделирования *AnyLogic 6*, представляющей интегрированную среду визуальной разработки модели, имитации и анализа полученных результатов. Моделирование проводилось с использованием дискретно-

событийного подхода. Структура имитационной модели процесса поддержки ИТ-услуг приведена на рис. 2.

Сегменты «Обращения» и «Служба поддержки» представляют динамику процесса. Обращения формируются потребителями сервисов в случае возникновения инцидентов и представляют заявки, поступающие в службу поддержки. Динамика процесса обработки заявок в сегменте «Служба поддержки» обеспечивается функциями приема заявок, их распределения и обработки. Сегмент «Статистика» служит для расчета и визуализации значений результатов имитации в виде наборов данных и гистограмм.

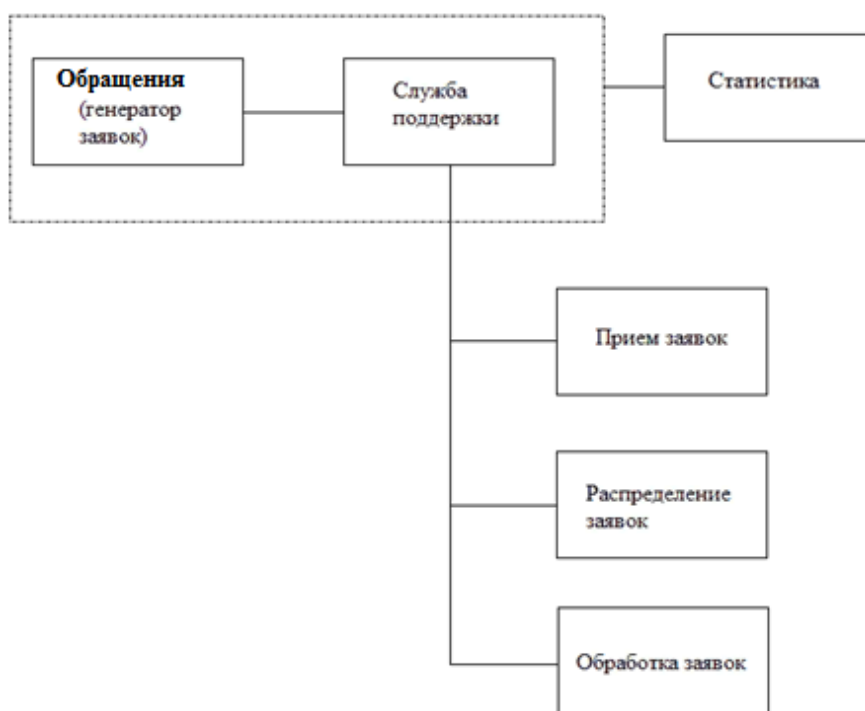


Рисунок 2. Структура имитационной модели

Дискретно-событийная модель в *AnyLogic* задается диаграммой процесса обработки заявок. Диаграмма состоит из низкоуровневых конструкций - объектов библиотеки *EnterpriseLibrary* и связей между ними, задающих последовательность операции обработки заявок. Этими объектами являются: *Service*, *queue*, *resourcePool*, *SelectOutput*, *Sink*.

Для определения параметров заявок: среднего времени обработки запроса и вероятности обработки используется *Java* класс - *Serviced*, расширяющий базовый класс *Entity*.

Среднее время обработки одного запроса определяется как разность времени прихода заявки в систему и времени окончания её обслуживания. Вероятность обработки запросов определяется как отношение числа запросов, выполненных за требуемый интервал времени к общему числу поступивших запросов.

Для получения этих результатов и их визуализации используются объект Данные гистограммы, который формирует выборку значений случайной величины, статистическая информация которой (среднее, минимальное, максимальное значение, среднеквадратичное отклонение) представляется в виде гистограммы.

Интерактивное изменение и измерение количества специалистов  $n$  во время имитации модели, позволяющих обеспечить требуемый уровень обслуживания, решает задачу планирования ресурсов с учетом качественных характеристик ИТ-услуг.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №14-07-06008 и №15-07-20095.*

### Библиографический список

1. **Митрошин, С.Г.** Формирование моделей бизнес - процессов на основе результатов имитационного моделирования // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. материалов Междунар. научно-техн. конф. Пенза: ПДЗ. 2009. С.322-324.

2. **Тихонов, С.В.** Имитационное моделирование бизнес-процессов в системах массового обслуживания: автореферат. Режим доступа: <http://avtoreferat.seluk.ru/at-informatika/5323-1-imitacionnoe-modelirovanie-biznes-processov-sistemah-massovogo-obsluzhivaniya.php> (дата обращения: 20.12.2019)

3. **Митрошин, С.Г.** Многоподходные имитационные модели в производственных процессах информационно-технологических компаний: автореферат. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_005571184/viewer/?page=3](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005571184/viewer/?page=3) (дата обращения: 10.01.2020)

4. **Брукс, П.** Метрики для управления ИТ-услугами: пер. с англ. / Питер Брукс. - М: Альпина Бизнес Букс. 2008. С.283.

**N.G. Dmitrieva**

### RESOURCE PLANNING BASED ON THE QUALITY CHARACTERISTICS OF IT SERVICES

Nizhny Novgorod State Technical University named by R.E. Alekseev

Discusses simulation model for resource planning based on the quality characteristics of IT services.

**Keywords:** IT service support, service level, queuing system, AnyLogic.

М.С. Дубов, Ю.С. Егоров, Н.С. Метельков

## ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОИСКА НУЛЯ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОРТАЛЬНОГО ТИПА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе приводится описание разработанного алгоритма поиска нуля заготовки, расположенной на поле станка с числовым программным управлением портального типа. Алгоритм основан на библиотеке машинного зрения `openCV` и может быть применен для управления станком по средствам отправки команд `gcode` непосредственно исполнительной системе станка.

**Ключевые слова:** анализ изображения, поиск границ, станок, ЧПУ, координатный стол, трансформация перспективы, ноль заготовки, захват изображения.

В настоящее время наблюдается тенденция промышленной автоматизации. Однако много процессов всё еще остаются неавтоматизированными, в частности, большинство портальных станков с числовым программным управлением (далее ЧПУ) до сих пор требуют присутствия человека-оператора для выполнения операций позиционирования инструмента над заготовкой.

Автоматизировать данный процесс можно, установив на инструмент видеокamеры и разработав алгоритм, анализирующий изображение с камер и управляющий команды станку на перемещение инструмента. В сфере анализа изображения уже существуют готовые библиотеки алгоритмов, из которых более всего выделяется `OpenCV`, библиотека распознавания изображения, зарекомендовавшая себя своим наполнением и открытостью кода.

После установки камеры с зоной обзора края заготовки необходимо откалибровать камеру: исправить перспективу изображения с камеры, так как установить камеру перпендикулярно поверхности станка не всегда возможно. Также необходимо задать отношение реальных величин длины к пикселям и задать позицию инструмента на изображении (предполагается, что камера перемещается вместе с инструментом, поэтому эта позиция не меняется). Для нахождения матрицы трансформации перспективы в `OpenCV` существует функция **`findHomography`**, на вход её поступают точки исходной плоскости и точки целевой плоскости. В данном случае целевыми всегда будут 4 угла изображения, исходные 4 точки выбирают вручную, например, положив на поверхность станка прямоугольный лист бумаги и нажав курсором на его углы. Однако если брать именно эти точки без дополнительных преобразований, изображение с исправленной перспективой будет покрывать лишь ту часть исходного кадра, где лежал лист. Для решения этой проблемы перед созданием матрицы трансформации необходимо вписать исходные точки в размеры изображения, сохраняя пропорции образуемой ими фигуры. Вокруг фигуры описывается прямоугольник, получить который можно функцией `OpenCV Bounding Rectangle`. Теперь, если разница ширины кадра и ширины прямоугольника меньше разницы длины кадра и длины прямоугольника, то новый масштаб можно рассчитать по формуле

$$s = w_1/w_2, \quad (1)$$

где  $w_1$  – ширина изображения,  $w_2$  – ширина описанного прямоугольника, иначе по формуле

$$s = h_1/h_2, \quad (2)$$

где  $h_1$  – высота изображения,  $h_2$  – высота описанного прямоугольника.

С полученным масштабом создаётся матрица преобразования и применяется к исходным точкам функцией OpenCV **Transform Points**. Далее точки надо переместить так, чтобы две противоположные точки касались краёв изображения. Если разница ширины кадра и ширины описанного прямоугольника меньше разницы длины кадра и длины прямоугольника, то точки необходимо сдвинуть на следующие значения по  $x$  и  $y$

$$\begin{aligned} x &= -x_2 \\ y &= \left(\frac{h_1}{h_2}\right) - y_2 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_2$  и  $y_2$  – координаты описанного прямоугольника, иначе

$$\begin{aligned} x &= -y_2 \\ y &= \left(\frac{w_1}{w_2}\right) - x_2 \end{aligned} \quad (4)$$

С этими значениями создаётся матрица трансформации и применяется к точкам. Теперь получаем матрицу преобразования перспективы и применяем её к изображению функцией OpenCV **WarpPerspective**, на вход поступает исходное изображение, матрица преобразования, размер выходного изображения, на выходе получаем изображение с исправленной перспективой. Все дальнейшие операции производятся над этим изображением. Далее необходимо вручную отметить на кадре две точки, расстояние между которыми должно быть равно некоторому фиксированному значению в миллиметрах, и найти это же расстояние в пикселях. Разделив одно значение на другое, получим коэффициент, который в дальнейшем используется при отправке станку команд перемещения. Позиция инструмента также задаётся в интерактивном режиме по полученному кадру с уже исправленной перспективой, относительно этой позиции будет выполняться перемещение.

Следующим шагом является определение границ заготовки на изображении. OpenCV предоставляет ряд методов для достижения этой цели:

- **Алгоритм Кэнни** был разработан в 1986 году Джоном Кэнни и до сих пор является одним из лучших детекторов границ, который показывает хорошие результаты в абсолютном большинстве случаев. При разработке алгоритма Кэнни стремился снабдить его хорошим обнаружением, правильным определением положения границы и единственным откликом на одну границу. На вход алгоритма поступает изображение, желательно предварительно размытое для фильтрации шумов, и преобразованное в оттенки серого для ускорения работы, первый и второй порог для гистерезиса, размер апертуры для оператора Собеля и флаг, показывающий, нужно ли использовать более точный поиск градиента. На выходе получаем изображение, где границы выделены белым цветом на черном фоне.

- **Детектор углов Харриса** был разработан в 1988 году Крисом Харрисом и Майком Стивенсом как улучшенная версия детектора углов Моравеца. В отличие от последнего этот алгоритм лучше различает границы и углы. На вход алгоритма поступает изображение, размер области «соседей» пикселя, размер апертуры для оператора Собеля и один из методов экстраполяции пикселей (из перечисления). На выходе алгоритма получаем изображение, содержащее белые точки – углы на черном фоне.

- **Обобщенное преобразование Хафа** – алгоритм извлечения элементов из изображения, предложенный Д.Г.Баллардом в 1981. Является модификацией преобразования Хафа, позволяющей использовать его не только для определения простых фигур, но и любых объ-

ектов, описываемых их моделями. OpenCV содержит реализации этого алгоритма для поиска окружностей и линий. Реализация алгоритма для поиска окружностей принимает на вход изображение, обратное отношение разрешения выходного массива к разрешению входного изображения, минимальное допустимое расстояние между центрами соседствующих окружностей, первый специфичный для метода параметр, второй специфичный для метода параметр, минимальный радиус окружности и максимальный радиус окружности. На выходе получаем вектор окружностей в формате «координаты, радиус». Реализация алгоритма для поиска линий принимает на вход изображение, длину перпендикуляра из нулевой координаты к линии (шаг по расстоянию), угол между линией и осью X (шаг по углу), порог, делитель длины перпендикуляра для многомасштабного преобразования Хафа, делитель угла прямой к оси X для многомасштабного преобразования Хафа, минимальный угол прямой к оси X и максимальный угол прямой к оси X. На выходе получаем вектор линий в формате «длина перпендикуляра из нулевых координат к прямой, угол между прямой и осью X».

Для задачи определения границ заготовки самым оптимальным решением является алгоритм Кэнни. Однако перед его применением целесообразно применить к изображению встроенный в OpenCV **билатеральный фильтр**, этот фильтр размывает изображение, устраняя шумы, и при этом оставляя границы резкими. На вход фильтр принимает исходное изображение, диаметр фильтруемых ячеек, допуск по цвету и допуск по расстоянию. Практики полученные данные со станка, работающего в условиях типичного производства, показывают, что избавиться от всех шумов и ложных границ невозможно, поэтому из полученных границ необходимо выделить ту, которая относится к заготовке. Как правило, это самая длинная граница из всех. Для представления границ, полученных алгоритмом Кэнни, в виде массивов точек в OpenCV существует функция **Find Contours**, на вход которой поступает изображение, метод извлечения контуров и метод их аппроксимации. На практике же, в полученной границе заготовки часто присутствуют разрывы 1-2 пикселя, и чтобы получить целый контур, надо утолщить границы, чтобы они гарантировано перекрывали друг друга. Для этого найденные контуры отрисовываются поверх изображения с границами функцией **DrawContours**, на вход которой поступает изображение, на котором надо отрисовывать массив контуров, цвет и толщину контуров. Толщина 10 пикселей позволяет достаточно надежно перекрыть разрывы границ. К получившемуся изображению снова применяется алгоритм Кэнни и извлечение контуров, затем вычисляется длина каждого контура, и самый длинный контур считается искомым. Далее необходимо найти точку этого контура, ближайшую к нулю координат стола. Допустим, что координаты изображения отсчитываются от его левого верхнего угла, ось x идёт вправо, ось y вниз, точка нуля стола находится в нижнем левом углу. Тогда проще всего найти точку контура, повернув его на 45 градусов по часовой стрелке, и найдя точку с максимальной координатой y. Находится разница между координатами этой точки до поворота и точки положения инструмента. Разница умножается на полученный при калибровке коэффициент. На станок посылается команда перемещения на это расстояние. После перемещения получается новый кадр с камеры, и алгоритм выполняется в цикле до тех пор, пока на очередном полученном кадре координаты инструмента не будут совпадать с координатами точки контура, ближайшей к нулю.

Применение разработанного алгоритма позволяет в автоматическом режиме находить границы заготовки, лежащей на поле станка ЧПУ портального типа, перемещать рабочий инструмент в точку нуля заготовки.

Разработанный алгоритм был успешно опробован в условиях реального производства на станке ЧПУ лазерной резки портального типа 4x2 метра.

Алгоритм позволил определить базовую точку заготовки и угол ее поворота относительно

координатного стола, а интеграция с программным обеспечением станка сделала возможным удобное и простое управление. Написанный программный модуль, реализующий алгоритм, запускается по нажатию кнопки «Поиск нуля», а после завершения работы алгоритма программный модуль выдает подтверждение с данными о позиции заготовки и ее угле поворота относительно осей станка. Информация выводится с целью отладки.

Таким образом, время простоя станка на позиционирование заготовки существенно сократилось. В первую очередь из-за автоматического определения угла поворота заготовки, позволяющего оператору не тратить время на выравнивание заготовки относительно оси станка, и во вторую из-за автоматического определения нуля заготовки, время выставления которого не является существенным, однако и этот показатель сократился.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### **Библиографический список**

1. Устройство числового программного управления NC-201: Руководство по эксплуатации. – СПб., 2005. – 80 с.: ил.
2. **Пестов, С. П.** Проектирование технологических процессов обработки деталей на станках с ЧПУ / С. П. Пестов. - Челябинск, 2002. –66 с.
3. **Бжозовский, Б.М.** Управление станочными комплексами / Б.М. Бжозовский, В.В. Мартынов. – Саратов: Из-во Саратовского гос. ун-та, 2004. – 44 с.
4. **Базров, Б.М.** Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров.– М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

**M.S. Dubov, Y.S. Yegorov, N.S. Metelkov**

### **INTRODUCTION OF MODERN ALGORITHMIC SOLUTIONS FOR PORTAL TYPE NUMERICAL CONTROL MACHINE SEARCHING WORKSHOPZERO**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The paper describes the operation of the zero search algorithm for a workpiece located on the portal typenumerical control machine field. The algorithm is based on the openCV library and can be used to control the machine by sending gcode commands directly to the machine's operating system.

**Keywords:** image analysis, boundary search, machine tool, CNC, coordinate table, perspective transformation, zero workpiece, image capture.

А.С. Дыденкова, Е.В. Сидорова

## ИССЛЕДОВАНИЕ «МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА» ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ШТЕЙНЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В данной статье рассматривается задача Штейнера, которая зачастую решается с помощью алгоритма муравьиных колоний. Для оценки времени построения маршрута рассматриваются различные зависимости показателей системы и выбора стратегии поиска. Делается вывод об эффективности каждой из реализаций и возможности их применения на различных графах с учетом изменяющейся обстановки и характеристик графа.

**Ключевые слова:** задача Штейнера, алгоритм муравьиной колонии, NP-полная задача, эвристический алгоритм.

### Введение

В современном мире происходит бурный рост компьютерных сетей, что приводит к внедрению и использованию сетей в области науки и техники. Данный момент приводит к появлению одной из важных проблем – маршрутизация в сети.

Было предложено использование дополнительных точек (вершин) при сочетании множеств деревьев, чтобы минимизировать суммарную длину ребер графа в кратчайших связывающих деревьях. Задача Штейнера (ST – Steiner Treeproblem) - построение дерева с помощью введения дополнительных точек. Наиболее эффективными при решении данной задачи из-за потенциала быстрого получения набора различных деревьев Штейнера будут методы, основанные на природных механизмах принятия решения.

Среди так называемых «Soft computing techniques» больше всего выделяются алгоритмы муравьиных колоний (Ant Colony Optimization – ACO, Ant Systems, AS), которые моделируют поведение муравьев и их системы в целом. Наибольшая эффективность у муравьиных алгоритмов наблюдается в динамических процессах для распределенных нестационарных систем, например, трафика в телекоммуникационных сетях.

### Общая постановка задачи

Всемирная сеть Интернет развивается сверхбыстро. Вслед за сетью, дополняя ее, появляются различные сетевые приложения. Большинство из них требуют соединения вида «один ко многим», например IP TV, аудио- и видеоконференции, потоковое видео, многопользовательские компьютерные игры, кооперативная работа и т.д. Для всего этого применяется специальная форма широковещания (multicast)[1], при которой копии пакетов доставляются только подмножеству всех возможных адресатов.

Технология multicast – одна из основополагающих в распространении мультимедийного трафика. Смысл заключается в отправке копий потока данных от источника группе получателей через интернет сложным мультиплексным путем. Используя технологию multicast, источник лишь генерирует и отправляет поток данных, маршрутизаторы выполняют его репли-



кацию и пересылку адресатам. В сравнении с однонаправленной передачей (одному адресату), multicast может существенно снизить потребление интернет-ресурсов, а также значительно сократить нагрузку на узел-источник. Помимо компьютерных сетей задача Штейнера часто формулируется и решается в других областях: прокладка силовых кабелей, проектирование СБИС, задачи логистики. Перейдем к формализации задачи Штейнера.

В данной статье рассмотрены связанные неориентированные графы, в которых отсутствуют петли и кратные ребра. Дана сеть в виде ненаправленного графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  - набор узлов или вершин графа, а  $E$  - набор отрезков, соединяющих вершины, это ребра или связи графа. Граф  $G$  является конечным (число вершин графа конечно). Две точки  $v_i, v_j$  у которых есть ребро между ними, называют смежными. Маршрут в графе – это чередующаяся последовательность вершин и ребер, в которой любые два соседних элемента смежные. Длина маршрута – это количество ребер в маршруте (с повторениями). Граф, в котором все вершины связаны между собой, называется связным. Информация, находящаяся в некотором графе, изображается с помощью матриц в алгебраическом виде.

Строение графа показывается с помощью матрицы стоимости. Матрица стоимости – это такая матрица  $W$  порядка  $(N \times N)$ , где  $N$  – это число узлов в графе, а  $w_{ij}$  показывает стоимость использования связи  $(i, j) \in E$ .

Показатель в матрице на пересечении столбцов и строк при  $i = j$  равен нулю, что объясняется отсутствием в графе петель. Вершины графа  $G$  отличаются: вершина-центр  $S \in E$ , вершина – участник  $D \in E$  и нейтральная вершина или вершина Штейнера.

Задача построения оптимальной топологии для графа такого вида сводится к обнаружению такого дерева  $T$  графа  $G$  с корнем в  $S$ , связывающего все члены набора  $D$  так, что маршрут дерева  $T$  получится минимальным.

### **Муравьиный алгоритм для задачи исследования**

Существует множество различных способов, которыми можно решить задачу Штейнера: генетический алгоритм, алгоритм роя, пчелиный алгоритм, муравьиный и другие. Далее рассмотрим адаптацию муравьиного алгоритма к нашей задаче и несколько других модификаций методов муравьиной колонии.

Пусть компьютерная сеть представляет собой окрестность, где находятся муравьи, ресурсами пищи для которых будут являться узлы [2]. Каждый муравей может оставлять свой след из полосы феромонов на линиях связи, соединяющих узлы. Каждая связь в сети имеет два параметра, которые необходимо учитывать при поиске: стоимость связи и количество феромонов на ребре. При инициализации муравьи распределяются по узлам-участникам с повторением. Все муравьи перемещаются от одного узла сети к другому, одновременно запоминая информацию о ребрах между узлами. Пока не будут пройдены все вершины-участники и вершина-центр, муравей будет продолжать следовать маршруту. В первую очередь, муравей проверяет на смежность не пройденные вершины-участники. При нахождении данных вершин агент переходит к поиску вершины с максимальной вероятностью перехода. При встрече вершины с одинаково малой вероятностью, переход осуществляется случайным образом.

Если в процессе поиска не было найдено смежных не пройденных вершин-участников, то начинается поиск смежных не пройденных нейтральных вершин.

Если в поиске также не были найдены и нейтральные вершины, то поиск следующей вершины будет проходить описанным методом только для пройденных вершин. При этом следует проверить отсутствия цикла в вершине. Необходимо исключить ситуации перехода муравья по одному маршруту больше одного раза.

Поиск можно завершить, если:

- 1) пройдены все вершины-участники;
- 2) пройдено конкретное количество итераций.

Вслед за окончанием поиска необходима проверка на условие, по которому окончен поиск: если по второму условию, то поиск бракованный и дальше учитываться не будет.

После прохождения всех этапов среди не бракованных ищется муравей с минимальным маршрутом. Далее все муравьи удаляются, и на ребрах обнуляется значение феромона. Метод может перейти к следующему шагу. Заново создаются муравьи и располагаются по вершинам-участникам. Работа алгоритма будет происходить только при заданном пользователем количестве итераций.

На рисунке представлена блок-схема муравьиного алгоритма при решении данной задачи.

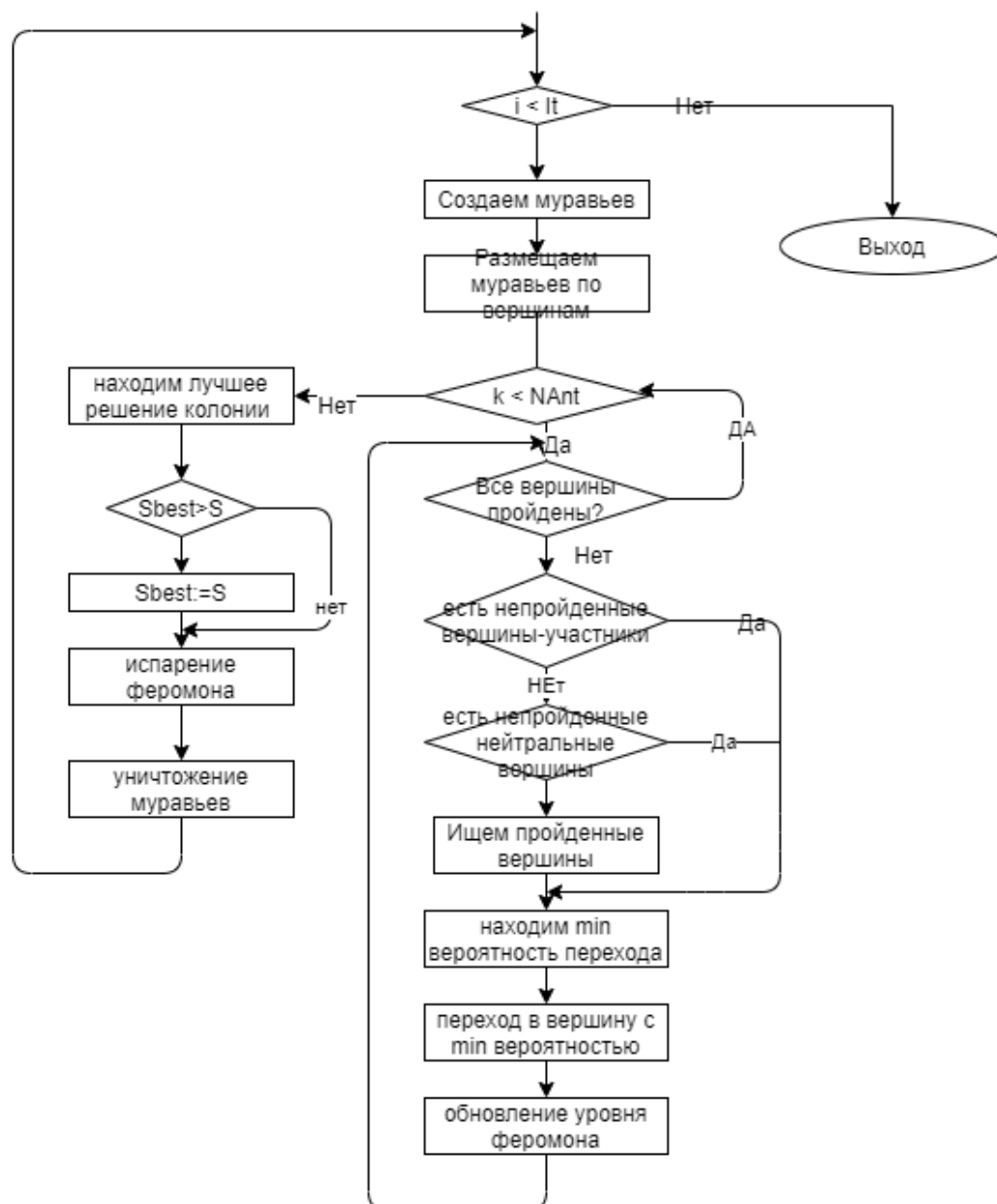


Схема муравьиного алгоритма

## Другие вариации муравьиного алгоритма для решения задачи

Для решения задачи Штейнера применяется муравьиный алгоритм в связке с алгоритмом косяка рыб. Данная версия более подробно описана в статье [3]. Основными параметрами ребер будут: цена, задержка, изменение задержки и пропускная способность, параметрами узлов являются: цена, задержка, изменение задержки и процент потери пакетов. Одним из положительных моментов для скорости сходимости алгоритма косяка рыб является выделение лучших глобальных решений. Был добавлен фактор перенаселенности при выборе пути муравьями, данный фактор отсутствует в стандартном муравьином алгоритме. Ввиду этого фактора на маршрутах, которые прошли муравьи, феромоны никогда не испаряются, соответственно пути не перестраиваются, что допустимо в статичных сетях и позволяет избежать застревания в локальном максимуме.

Также можно использовать метод муравьиной колонии, но только сначала должно строиться минимально покрывающее дерево (для этого в свое время применялись методы, такие как алгоритм Крускала, алгоритм Прима и др.). Такой подход предложил в своей работе А.А. Кажаров [4]. После построения минимально покрывающего дерева в его вершинах размещались муравьи, и далее каждый из них искал путь в смежную вершину в этом дереве. До тех пор пока не будет построено дерево Штейнера, следует повторять итерации. В данной вариации муравьиного алгоритма автором была использована специальная функция для равномерного испарения феромонов, что обеспечивало выход из локального оптимума. Особенностью данного алгоритма является малое время сходимости.

В исследованиях [5] ученых L. Luyet, S. Varone, N. Zufferey был описан алгоритм, полученный в результате усовершенствования жадного конструктивного алгоритма Takahashi and Matsuяama (далее ТМ) для минимального дерева Штейнера на графах: каждый муравей использует эвристику, похожую на эвристику алгоритма ТМ, но муравьи могут обмениваться информацией с помощью систем феромонов. Также отличается выбор следующей вершины отдельным муравьем от правила, описанным в ТМ. Авторы сравнивают ТМ и ANT-STP на множестве тестовых задач в OR-Library [6].

## Заключение

При решении задачи Штейнера эффективность алгоритма сильно зависит от определения весов ребер графа, размера графа, частоты обновлений, структуры графа и задействованных вычислительных ресурсов. Необходимо уделять особое внимание настройке параметров при решении данной задачи. Универсального решения нет, но алгоритмы, работающие на основе муравьиного алгоритма, дают наибольшую эффективность при решении.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. **Guo-Quing, Hu.** Forest build tree algorithms for multiple destinations // The Potential. №3, 1998.-с. 13-16.
2. **Штовба, С.Д.** Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях, 2003. №4. С.70–75
3. **Li, Y.** QoS Multicast Routing Algorithm Based on Crowding Ant ColonyAlgorithm. // Journal of Computers, North America. 2013. № 8. DOI:10.4304/jcp.8.10.2711-2718.

4. **Кажаров, А.А.** Построение минимального дерева Штейнера на основе муравьиных алгоритмов // Труды молодежной конференции «Интеллектуальные системы-2009». М.: Физматлит, 2009. ( Kazharov A.A. Construction of the minimal Steiner tree algorithm based on ant// Trudyi molodezhnoy konferentsii "Intellectualnyie sistemyi-2009". M.: Phismatlit, 2009.)
5. **Luyet, L.,** Varone S., Zufferey N. An Ant Algorithm for the Steiner Tree Problem in Graphs // Applications of Evolutionary Computing. Springer Berlin Heidelberg. 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-71805-5\_5.
6. OR-Library. Collection of test data sets for a variety of Operations Research (OR) problems. <http://www.brunel.ac.uk/~mastjib/jeb/info.html>.

**A.S. Dydenkova, E.V. Sidorova**

**RESEARCH OF THE «ANT ALGORITHM» WHEN SOLVING  
THE STEINER PROBLEM**

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva

This article discusses the Steiner problem, which is often solved using the ant colony algorithm. To estimate the route construction time, various dependencies of the system indicators and the choice of search strategy are considered. The conclusion is made about the effectiveness of each of the implementations and the possibility of their application on different graphs, taking into account the changing situation and characteristics of the graph.

**Keywords:** Steiner problem, ant colony algorithm, NP-complete problem, heuristic algorithm.

Ю.С. Егоров<sup>1</sup>, В.С. Егоров<sup>1</sup>, А.Ю. Кербенева<sup>2</sup>, А.Н. Горохов<sup>2</sup>, А.В. Прихунова<sup>2</sup>

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДИКТИВНОГО ИГРОВОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ИГРОКА

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

<sup>2</sup>ООО «Кибернетика», г. Нижний Новгород

Работа посвящена технической реализации предиктивного игрового искусственного интеллекта, позволяющего использовать данные о текущем и прогнозном психоэмоциональном состоянии игрока для модификации игровых механик таким образом, чтобы повысить вовлеченность человека в игру и индивидуализировать игровой процесс.

**Ключевые слова:** компьютерная игра, искусственный интеллект, программное обеспечение, предиктивная аналитика, поддержка принятия решений.

В настоящее время государственная политика Российской Федерации в области науки и инноваций развивается по пути так называемых сквозных цифровых технологий. Технология «Искусственный интеллект» (ИИ), в свою очередь, является неотъемлемой частью передового рынка «Нейронет» Национальной технологической инициативы (НТИ).

В дорожной карте «Нейронет» НТИ выделяется сегмент «НейроРазвлечения и спорт», в частности подсегмент «Развлечения», в рамках которого, согласно дорожной карте, будет создана масштабная игровая платформа, постоянно взаимодействующая с пользователем и осуществляющая на регулярной основе контроль его функциональных и психоэмоциональных состояний. В рамках создания такой платформы был разработан прототип предиктивного игрового искусственного интеллекта (ПИИИ), учитывающего психоэмоциональное состояние игрока.

Игровой ИИ может принимать осмысленные решения только тогда, когда каким-либо образом воспринимает среду, в которой находится. В простых системах такое восприятие может ограничиваться простой проверкой положения объекта на виртуальной сцене или самого игрока. В более сложных системах требуется определять основные характеристики и свойства виртуального мира, например, возможные для передвижения маршруты.

При этом разработчикам компьютерных игр необходимо придумывать способ выявления и определения основных свойств виртуального мира, важных для игрового ИИ. Разработанный ПИИИ позволяет получать данные о текущем и прогнозном психоэмоциональном состоянии игрока, что позволяет воспринимать не только внутреннюю, но и внешнюю среду, принимать более эффективные решения, а также повысить вовлеченность человека в игру и индивидуализировать игровой процесс.

Прототип ПИИИ выполняет следующие функции:

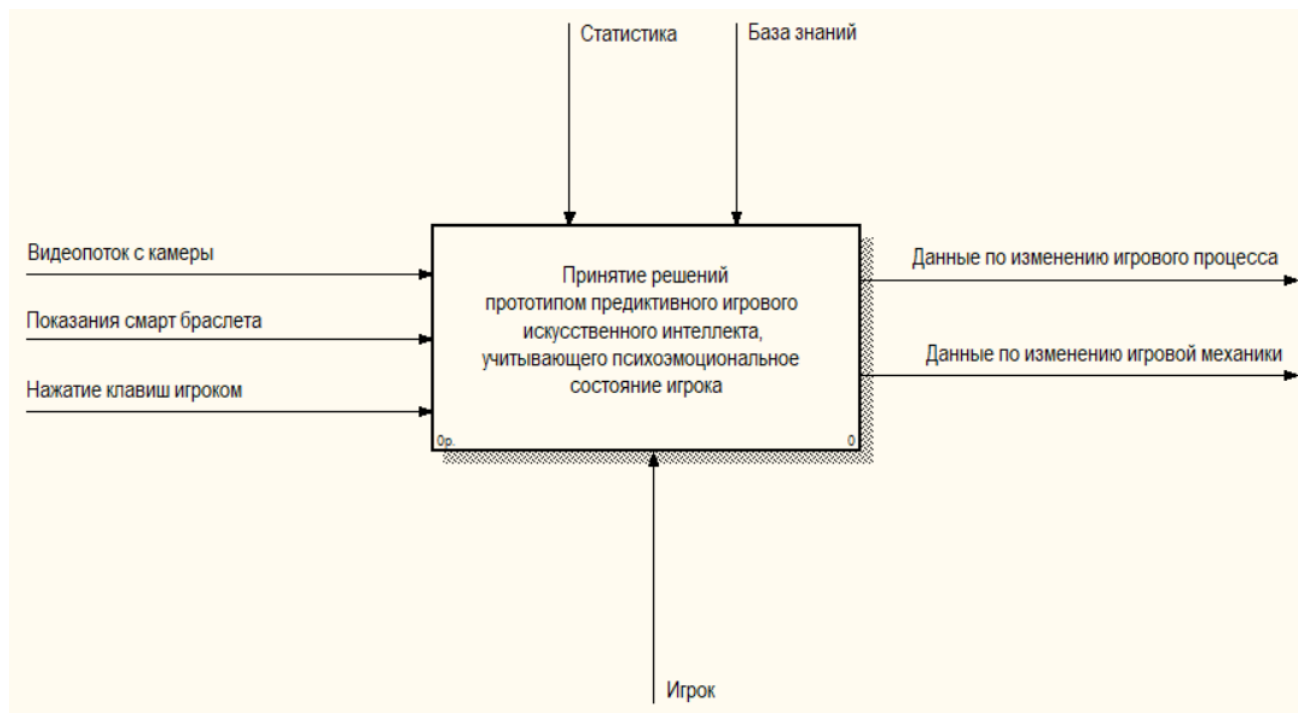
- создание и поддержка игрового процесса;
- получение, обработка и анализ поступающих данных о текущем психоэмоциональном состоянии игрока;
- сбор и накопление индивидуальной статистики;
- мониторинг активных действий игрока;

- поддержка принятия решений ИИ с учетом данных о текущем психоэмоциональном состоянии игрока;
- формирование визуальных образов и текстовых сообщений на основе принятых ИИ решений;
- изменение игровых механик на основе принятых ИИ решений;
- изменение игрового процесса на основе принятых ИИ решений.

В процессе проектирования ПИИИ использовалась методология IDEF0 для описания основных процессов, входных и выходных данных, управляющей информации и основных механизмов.

Используемая методология позволяет формировать функциональную схему исследуемой системы, которая определяет требуемые процессы с точностью, необходимой и достаточной для моделирования деятельности ПИИИ, при этом структурированное представление модели ПИИИ обеспечивается за счет декомпозиции диаграмм в виде их иерархической структуры.

Основные цель и функции проектируемой системы ПИИИ описывает контекстная диаграмма A0 «Принятие решений прототипом предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока». Контекстная диаграмма A0 представлена на рис. 1.



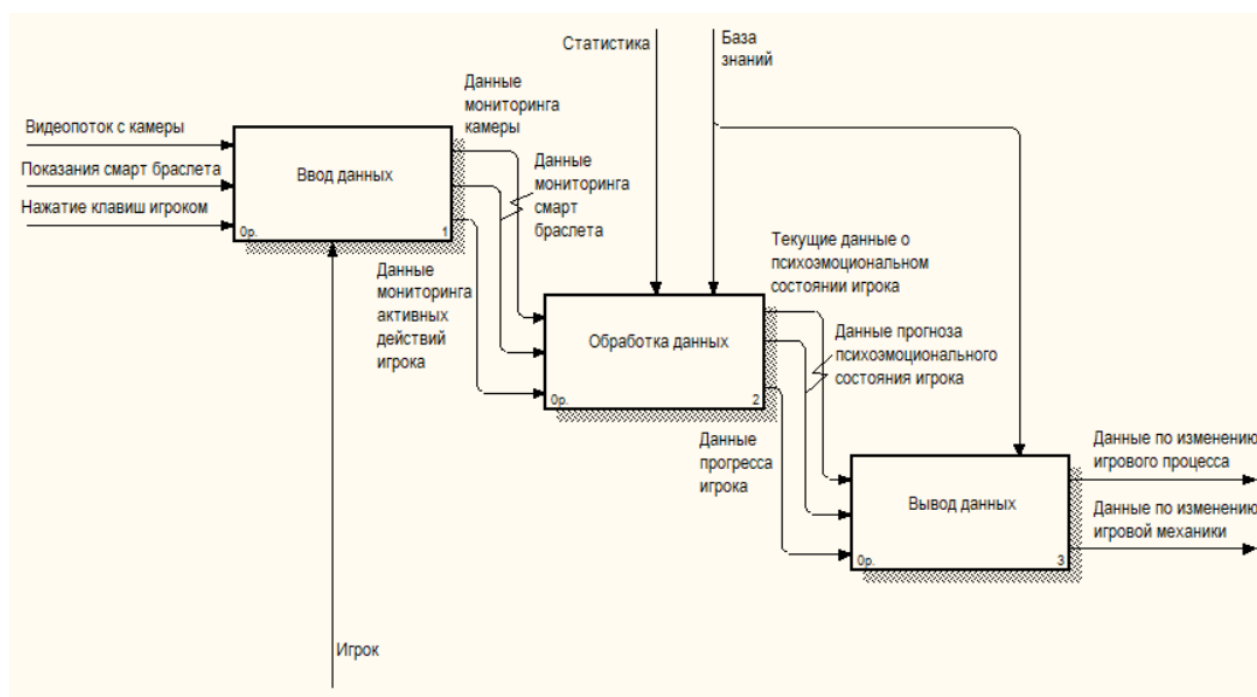
**Рисунок 1. Контекстная диаграмма A0 «Принятие решений прототипом ПИИИ, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока»**

В качестве входных данных для ПИИИ используется видеопоток с камеры, показания смарт-браслета и нажатие клавиш игроком. На выходе формируются данные по изменению игровой механики или игрового процесса. Основные процессы прототипа осуществляются на основе данных статистики, базы знаний и активных действий игрока.

Диаграмма декомпозиции A0, представленная на рис. 2, описывает функционирование прототипа более подробно.

Прототип предиктивного игрового искусственного интеллекта состоит из трех основных модулей: модуль ввода данных, модуль обработки данных и модуль вывода данных.

**Модуль ввода данных** получает на вход видеопоток с камеры, показания смарт-браслета и нажатые клавиши, характеризующие состояние игрока. На выходе модуля формируются данные мониторинга камеры, смарт браслета и активных действий игрока, которые передаются в модуль обработки данных.



**Рисунок 2. Диаграмма декомпозиции А0 «Принятие решений прототипом ПИИИ, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока»**

**Модуль обработки данных** обрабатывает входные данные с целью формирования данных прогресса игрока, данных его текущего психоэмоционального состояния и данных прогноза. Модуль обработки данных также проводит верификацию полученных данных и корректировку моделей в базе знаний.

Под прогрессом игрока понимается доля пройденных им контрольных точек игры. Контрольная точка – это игровая механика, сохраняющая состояние игры в определённых разработчиками местах, и позволяющая в последующем начинать игру с этого места. Контрольные точки проектируются заранее и могут быть также использованы в качестве места, где игрок может отдохнуть, изменить маршрут и т.п.

Задача прогнозирования в модуле обработки данных была решена на основе создания модели прогнозирования, адекватно описывающей исследуемый процесс. Для решения задачи распознавания эмоционального состояния игрока была разработана и обучена сверточная нейронная сеть.

**Модуль вывода данных** использует полученные под управлением статистики и базы знаний сформированные текущие данные, данные прогноза и данные прогресса в игре. Модуль вывода данных формирует необходимые данные по изменению игрового процесса и игровой механики.

ПИИИ принимает решения по изменению игрового процесса и игровой механики в заранее определенных контрольных точках игры. Каждая контрольная точка характеризуется диапазонами значений для каждой характеристики состояния игрока (пульс, систолическое

давление, диастолическое давление, эмоция). Выделяется три основных диапазона значений, описывающих опасное, требуемое и безопасное состояние.

Опасное состояние – это психоэмоциональное состояние игрока, которое разработчик считает недопустимым в данной контрольной точке.

Требуемое состояние – это психоэмоциональное состояние игрока, которое разработчик считает необходимым в данной контрольной точке.

Безопасное состояние – это психоэмоциональное состояние игрока, которое разработчик считает допустимым, но не требуемым в данной контрольной точке.

В контрольных точках состояние игрока определяется как текущее, которое может принадлежать только одному из трех диапазонов значений, характеризующих опасное, требуемое или безопасное состояния. Границы каждого диапазона определяются индивидуально разработчиком в зависимости от игры, конкретного игрока и планируемой контрольной точки игры.

На основе текущего и прогнозного значений формируются векторные показатели состояний игрока. В зависимости от того, какой области соответствует текущее векторное состояние, ПИИИ принимает соответствующие решения по изменению игрового процесса или игровой механики.

Техническая реализация ПИИИ осуществлена для ОС семейства MS Windows и Linux. Разработанное ПО поддерживает русский и английский языки.

В качестве устройства фиксации эмоционального состояния игрока в ПИИИ используется веб-камера, подключенная по USB протоколу к персональному компьютеру. В качестве устройства фиксации физиологического состояния игрока в ПИИИ используется смарт-браслет, подключенный по протоколу Bluetooth 4.0 к персональному компьютеру.

Для проведения испытаний программного обеспечения прототипа предиктивного игрового искусственного интеллекта было разработано специальное приложение. В качестве такого игрового приложения была выбрана компьютерная игра «Тетрис», в которой выпадение каждой последующей игровой фигуры определяется на основе психоэмоционального состояния игрока.

Разработка и техническая реализация ПИИИ обеспечивает возможность создания нового типа продукта, который будет востребован в сегменте «НейроРазвлечения и спорт» и станет ключевой технологией, за счет которой могут быть созданы другие востребованные продукты игровой индустрии и новые сервисы развивающегося рынка Нейронет.

Работа выполнена за счет средств гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 11ГС1НТИС5/43265 от 06.09.2018 г.).

### Библиографический список

1. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс]. Электрон.дан. – 2019. URL: <http://www.nti2035.ru/markets/neuronet> (дата обращения: 31.01.2020).
2. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. –М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.
3. **Егоров, Ю.С.** Подход к созданию предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока / Ю.С. Егоров, А.Д. Сухов, А.Ю. Кербенев // Материалы V Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (ВМПД-2018). – Тамбов: ТГТУ, 2018. С. 94-99.



4. **Егоров, Ю.С.** Прототип предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенев, А.С. Прихунов, Д.А. Чупров // Материалы XVII Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». – М: МГППУ, 2019. С. 161-162.
5. **Егоров, Ю.С.,** Кербенева А.Ю., Бурова А.Г. Разработка модуля обработки и интерактивной визуализации данных об эмоциональном состоянии пользователя / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенев, А.Г. Бурова // Материалы XVIII международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (БТН-2019). – Н. Новгород: НГТУ, 2019. С. 65.
6. **Bourg, D.M.,** Seemann G. AI for Game Developers. – Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2004. – 371 p.
7. **Bourg, D.M.,** SeemaRouse R. Game Design: Theory & Practice // Richard Rouse – Wordware Publishing, 2004. – 698 p.

**Y.S. Yegorov, V.S. Yegorov, A.Y. Kerbeneva, A.N. Gorokhov, A.V.Prikhunova**

**TECHNICAL IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE GAME ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED ON THE GAMERS PSYCHOEMOTIONAL CONDITION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Kibernetika LLC, Russia, Nizhny Novgorod

The paper describes the technical implementation of predictive game artificial intelligence, which allows using data on the current psycho-emotional state of the player to modify game mechanics in such a way as to increase human involvement in the game and individualize the game process.

**Keywords:** computer game, artificial intelligence, software, predictive analytics, decision support.

Ю.С. Егоров<sup>1</sup>, В.В. Алексеев<sup>1</sup>, Д.А. Чупров<sup>2</sup>, А.Ю. Кербенева<sup>2</sup>, А.С. Прихунов<sup>2</sup>

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

<sup>2</sup>ООО «Кибернетика», г. Нижний Новгород

В работе рассмотрены основные методы обнаружения объектов интереса на изображениях. Исследованы алгоритмы предварительной обработки изображений и методы извлечения признаков объектов. Продемонстрированы методы классификации объектов на основе машинного обучения и глубоких нейронных сетей. Приведены примеры использования изученных алгоритмов при решении различного рода задач. Выявлены преимущества и недостатки рассмотренных методов обнаружения, сделаны выводы об условиях их применения.

**Ключевые слова:** обнаружение объектов, обработка изображений, компьютерное зрение, выделение признаков, машинное обучение, глубокие нейронные сети.

### Введение

Одним из перспективных направлений в области искусственного интеллекта является компьютерное зрение. Компьютерное зрение заключается в способности машины извлекать информацию из изображений и последовательности кадров видеопотока – обнаруживать, классифицировать и отслеживать объекты.

Данная технология широко используется в интеллектуальных системах принятия решений, а также в современных автоматизированных системах управления и обработки информации. Задачи обнаружения и распознавания предметов, явлений и сигналов, описывающихся набором признаков, возникают в таких отраслях как робототехника, информационный поиск, мониторинг и анализ визуальных данных.

Компьютерное зрение активно применяется в средствах наблюдения, управления мобильными роботами, медицинской диагностики, системах безопасности, а также при человеко-машинном взаимодействии.

В настоящее время разработано достаточно большое количество методов обработки изображений, которые применяются в зависимости от поставленной задачи. Таким образом, целью данной работы является анализ существующих методов обнаружения объектов на изображениях.

### Принцип обнаружения объектов на изображениях

Первым этапом при анализе изображения является его предобработка, которая может заключаться в применении операторов фильтрации контуров, цветовых фильтров, сегментации и т.п. Далее из обработанного изображения выявляются характерные свойства представленного на нем объекта – признаковое описание – путем различных алгоритмов. Могут применяться гистограммы направленных градиентов (англ. HistogramofOrientedGradients, HOG),

масштабно-инвариантная трансформация признаков (англ. Scale-Invariant Feature Transform, SIFT), локальные бинарные шаблоны (англ. Local Binary Patterns, LBP) и др.

В итоге полученные вектора признаков используются для классификации объектов традиционными методами машинного обучения, такими как метод опорных векторов (англ. support vector machine, SVM) или метод k-средних (англ. k-means).

Помимо описанного принципа обнаружения объектов, наибольшую популярность набирают методы глубокого обучения, которые способны самостоятельно выполнять сквозное обнаружение объектов без предварительной обработки изображения и конкретного определения признаков. К таким методам обычно относятся архитектуры, основанные на сверточных нейронных сетях (англ. Convolution Neural Network, CNN): R-CNN (англ. Region Proposals CNN), SSD (англ. Single Shot MultiBox Detector) и YOLO (англ. You Only Look Once).

### **Алгоритмы предварительной обработки изображений**

Предварительная обработка изображения осуществляется с целью создания необходимых условий, повышающих качество и эффективность обнаружения искомых объектов. Широко применяемым методом обработки является выделение границ объектов. Фильтрация используется для обнаружения точек на изображении, яркость в которых резко меняется. Основная цель применения – уменьшение сложности изображения, сохранив его основную структуру. Можно выделить ряд алгоритмов, решающих задачу фильтрации контуров: оператор Кэнни, оператор Собеля, оператор Прюитта, перекрестный оператор Робертса и другие.

Оператор Собеля – дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. Результатом применения оператора Собеля в каждой точке является вектор градиента яркости или его норма. Оператор Собеля основан на свертке изображения небольшими целочисленными фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Оператор Кэнни – многоступенчатый алгоритм детектирования границ, состоящий из нескольких этапов. Оператор Кэнни использует фильтр удаления шумов. Границы выделяются в тех областях, где градиент приобретает максимальное значение. Далее осуществляется подавление немаксимумов, двойная пороговая фильтрация и, в завершении, трассировка области неоднозначности [1].

Для выделения объекта на изображении, когда он значительно отличается по цвету от фона, используют цветовые фильтры. Алгоритмы поиска объектов по цвету варьируются в зависимости от используемого цветового пространства – HSV, RGB, YCbCr.

Рассмотренные методы позволяют обнаруживать только пиксели, относящиеся к краям и перепадам яркости. Поэтому после обнаружения краев обычно следует процедура компоновки выделенных пикселей в линии и краевые сегменты. Один из таких подходов основан на преобразовании Хафа.

Метод позволяет на основе расположения точек интереса в пространстве параметров объединять их в группы за счет перехода в накопительное пространство Хафа с помощью процедуры голосования. Каждая точка пространства параметров «голосует» за тот или иной геометрический объект по локальному максимуму в накопительном пространстве.

Классический алгоритм преобразования Хафа связан с обнаружением прямых линий на изображении. Однако позднее алгоритм был расширен возможностью идентификации фигур произвольной формы и назван обобщенным преобразованием Хафа, а впоследствии было предложено множество его модификаций. В частности, интерес вызывают задачи, связанные

с обнаружением эллипсов и окружностей, например, для обнаружения плодов деревьев и фруктов.

Другим распространенным алгоритмом поиска объектов является сравнение с эталоном на основе корреляционного анализа. В корреляционных методах по наблюдаемому изображению перемещается эталонное изображение объекта. Для каждого положения эталона вычисляется некоторая оценка (например, евклидово расстояние).

Положением объекта на изображении является положение эталона, при котором достигается максимальная оценка.

Корреляционный анализ, в сравнении с преобразованием Хафа, дает более высокий результат обнаружения, однако и требует большего времени для анализа изображения, так как проводится путем пошагового рассмотрения его областей входного изображения.

Для упрощения представления изображения с целью осуществления более удобного анализа применяются методы сегментации. Сегментация подразумевает разбиение изображения на сегменты – области, похожие по некоторой характеристике (яркости, цвету, текстуре).

Метод сегментации может применяться в области медицины для анализа различных модальностей изображения, таких как компьютерная томография и магнитно-резонансная томография. Основной проблемой сегментации изображений является чрезмерная сегментация, вызванная шумом и неправильным распределением интенсивности на объекте, поэтому иногда рассматриваются методы улучшения сегментации изображений для перекрывающихся и неперекрывающихся объектов [2].

### **Алгоритмы извлечения признаков объекта**

Одним из наиболее известных алгоритмов, используемых при обнаружении объектов, является метод Виолы-Джонса, предложенный изначально для идентификации лиц людей [3]. В основе метода лежат примитивы Хаара, с помощью которых строится признаковое описание объекта. Изображение представляется в интегральной форме и обрабатывается скользящим окном. Применение алгоритма адаптивного усиления (англ. AdaptiveBoosting, AdaBoost) позволяет выбрать наиболее эффективные признаки и усилить слабые бинарные классификаторы, настроенные на каждый отобранный признак. Сильные классификаторы объединяются в каскады для быстрого обнаружения регионов, потенциально содержащих целевой объект.

Еще одним методом выявления признакового описания объекта являются гистограммы направленных градиентов (англ. НОГ), основная идея формирования которых заключается в том, что объект и его форма на изображении могут быть описаны распределением градиентов яркостей или направлений краев. Для вычисления признаков изображение разделяется на ячейки – небольшие связанные области, для которых составляется гистограмма направлений градиентов пикселей, находящихся внутри этой ячейки. В результате вектор признаков представляет собой комбинацию гистограмм ячеек и нормализуется по интенсивности.

Выявленные признаки объекта с помощью гистограмм направленных градиентов могут подаваться на вход таких классификаторов, как метод опорных векторов или AdaBoost. При этом увеличение числа вычисленных признаков ведет к увеличению точности обнаружения, однако гистограммы направлений градиентов несколько проигрывают по точности примитивам Хаара.

Признаковое описание объекта можно также получить методом масштабно-инвариантной трансформации (англ. SIFT). Ключевые точки объектов извлекаются из набора эталонных изображений и сохраняются в базе данных. Объект в новом изображении сравнивается с каждым объектом этой базы данных с помощью евклидова расстояния их векторов признаков. Из всего набора соответствий ключевых точек выбираются только те, которые наилучшим образом согласуются по масштабу, ориентации и местоположению.

Масштабно-инвариантная трансформация признаков часто используется при решении задач биометрии в системах идентификации и аутентификации пользователя, достигая высокой точности распознавания. SIFT признаки также используются в качестве входных данных машин опорных векторов или сверточных нейронных сетей.

### Методы машинного обучения

Методы машинного обучения не работают непосредственно со входными изображениями, они позволяют принимать решение – обнаруживать объекты – на основе полученных признаков с помощью описанных ранее алгоритмов. Характерной чертой таких методов является процесс обучения, то есть настройки параметров алгоритма на основе обучающей выборки. После обучения алгоритм может формировать результаты с высокой точностью достоверности на основании данных, не входящих в состав обучения. В качестве таких методов могут использоваться, как уже отмечалось ранее, машины опорных векторов или алгоритм адаптивного усиления [3].

Метод опорных векторов (англ. SVM) выполняет построение гиперплоскости, которая разделяет данные на два непересекающихся класса. Гиперплоскость – это  $n-1$  мерная подплоскость в  $n$  мерном пространстве признаков. Алгоритм SVM ищет точки на графике, которые расположены непосредственно к разделяющей гиперплоскости ближе всего. Эти точки называются опорными векторами. Затем алгоритм вычисляет расстояние между опорными векторами и разделяющей плоскостью. Основная цель алгоритма – максимизировать это расстояние. Метод опорных векторов активно применяется совместно с векторами признаков, полученных с помощью гистограмм направленных градиентов или масштабно-инвариантной трансформации, достигая хороших результатов идентификации.

Алгоритм AdaBoost заключается в усилении слабых классификаторов путем их объединения в один сильный классификатор, так называемый комитет, с целью повышения эффективности. Каждый комитет классификаторов строится на основе неверно классифицированных объектов предыдущими комитетами. Этот алгоритм традиционно используется в методе Виолы-Джонса при детектировании лиц на изображениях, осуществляя эффективное по качеству и скорости распознавание.

Еще одним алгоритмом, о котором ранее еще не было упомянуто, является метод  $k$ -средних. Это достаточно простой алгоритм кластеризации, который делит заданное множество на  $k$  кластеров. Точки кластеров являются максимально приближенными к их центрам, а сама кластеризация происходит за счет смещения этих же центров. Формирование кластеров происходит путем минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластеров от центров этих кластеров.

Кластеризация движущихся объектов может выполняться с использованием векторов признаков, состоящих из интенсивностей пикселей, величин движения, направлений движения и

положений точек признаков. Данный метод является высокоточным при определении количества движущихся объектов и быстрым при их отслеживании на сцене.

### Методы глубокого обучения

В настоящее время для обработки и описания изображений используются более современные методы – методы глубокого обучения, основанные на сверточных нейронных сетях. Нейронные сети позволяют осуществлять многоклассовую (несколько десятков тысяч классов) идентификацию для пересекающихся и непересекающихся множеств, поиск объектов на цветном изображении, которое может содержать большое количество объектов, размером в несколько миллионов пикселей.

Для решения поставленной задачи можно выделить три основных алгоритма – R-CNN, SSD и YOLO. Сеть региональных предположений R-CNN объединяет подходы CNN и SVM с селекционным поиском [4]. Метод селекционного поиска использует локальные сигналы (такие как текстура, интенсивность, цвет и т.д.) и позволяет выделить около 2000 предположительных областей, в которых может находиться объект интереса, что существенно снижает временные затраты на обработку изображения. CNN используется для выделения признаков из выбранных областей, которые подаются классификатору SVM для определения наличия или отсутствия объекта на каждом выделенном регионе изображения.

Позднее были предложены оптимизированные алгоритмы FastR-CNN и Faster R-CNN, позволяющие существенно ускорить процесс обучения и принятия решения и повысить точность обнаружения. Подход FastR-CNN аналогичен алгоритму R-CNN, однако в CNN подается входное изображение для создания сверточной карты объектов, на которой далее идентифицируются области предположений и деформируются с помощью слоя RoI. Классификация объектов осуществляется за счет слоя Softmax. В методе FasterR-CNN селективный поиск заменяется модулем региональных предположения RPN, который представляет собой отдельную нейронную сеть, прогнозирующую области предположений.

Сети Fast R-CNN и Faster R-CNN позволяют сократить временные затраты и осуществляют высокую точность классификации, так как они не требуют обработки 2000 областей предположений, а системы FasterR-CNN можно также использовать для обнаружения объектов в режиме реального времени.

Алгоритм SSD представляет собой еще один метод обнаружения объектов с использованием глубокой нейронной сети [5]. Подход SSD дискретизирует выходное пространство в набор блоков по различным соотношениям сторон и масштабам для каждого местоположения карты признаков, полученной с помощью сети VGG16. Далее для обнаружения объектов используются вспомогательные сверточные слои. Во время прогнозирования сеть генерирует оценки присутствия каждого класса объектов в каждом блоке и производит корректировки блока для наилучшего соответствия форме объекта. Кроме того, сеть объединяет предсказания из нескольких карт объектов с различным разрешением для естественной обработки объектов различных размеров.

Сеть SSD и ее модификации могут эффективно применяться в задачах обнаружения объектов малого размера на изображениях, полученных с летательных аппаратов. Алгоритм SSD предназначен для обнаружения объектов в режиме реального времени, поэтому он принимает решения быстрее, чем алгоритмы FastR-CNN и FasterR-CNN, однако имеет чуть меньшую точность классификации.

Все рассмотренные алгоритмы основываются на выявлении мест локализации объектов интереса. Сеть YOLO же рассматривает изображение целиком, не выделяя отдельные облас-

ти [6]. Алгоритм YOLO накладывает на исходное изображение сетку, в каждой ячейке которой выделяются ограничивающие рамки. Для каждой рамки выводятся класс вероятности и значения смещения. Ограничительные рамки, имеющие вероятность класса выше порогового значения, выбираются и используются для определения местоположения объекта на изображении.

Алгоритм YOLO на несколько порядков быстрее, чем другие алгоритмы обнаружения. Однако он имеет существенный недостаток – сеть YOLO испытывает трудности при обнаружении объектов достаточно небольшого размера. Это связано с пространственными ограничениями алгоритма, тем самым точность классификации зачастую уступает другим алгоритмам, как R-CNN и SSD.

## Выводы

При решении задачи обнаружения объектов интереса было выявлено, что исходные изображения могут подвергаться различной предварительной обработке для повышения эффективности работы алгоритмов классификации, а также используются для формирования признакового описания расположенных на них объектов.

В результате проведенного анализа были изучены методы, основанные на машинном обучении и глубоких нейронных сетях. Каждый метод обладает своими преимуществами и недостатками, имеет модификации, которые тем или иным образом стараются улучшить рассматриваемый алгоритм. Зачастую все представленные модификации связаны с увеличением точности обнаружения или уменьшением скорости обучения и принятия решения.

В настоящее время наиболее точное решение поставленной задачи достигается с помощью алгоритмов, основанных на CNN. Методы R-CNN, SSD и YOLO могут добиться высокой точности распознавания с минимальными временными затратами в различных типах задач, позволяя осуществлять обнаружение в режиме реального времени. Однако, такие методы требуют большого набора обучающих данных, существенных вычислительных мощностей и могут оказаться ненадежными при поиске объектов малого размера. Поэтому в условиях малых обучающих выборок или необходимости обнаружения объектов небольшого размера целесообразнее применять методы классификации SVM, AdaBoost или k-средних, основанные на машинном обучении.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-08-06034.*

## Библиографический список

1. **Живрин Я. Э.** Методы определения объектов на изображении / Я.Э. Живрин, Н.Б. Алкзир // Молодой ученый. 2018. №7. С. 8-19.
2. **Viola, P., Jones M.J.** Robust Real-time Object Detection // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001.
3. **Рашка, С.** Python и машинное обучение / Себастьян Рашка–М.: ДМКПресс, 2017 – 418 с.
4. **Girshick, R., Donahue J., Darrell T., Malik J.** Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2014.

5. **Liu, W.**, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. SSD: Single Shot MultiBox Detector // European Conference on Computer Vision.2015. Pp.21-37.

6. **Redmon, J.**, Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016.

**Y.S. Yegorov, V.V. Alekseev, D.A. Chuprov, A.Y. Kerbeneva, A.S.Prikhunov**

## **ANALYSIS OF OBJECT DETECTION ALGORITHMS IN IMAGES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Kibernetika LLC, Russia, Nizhny Novgorod

The paper considers the main methods of detection of objects of interest in images. Algorithms of preprocessing of images and methods of extraction of signs of objects are investigated. Methods of object classification based on machine learning and deep neural networks are demonstrated. Examples of the use of the studied algorithms in solving various problems are given. The advantages and disadvantages of the considered detection methods are revealed, conclusions about the conditions of their application are made.

**Keywords:** object detection, image processing, computer vision, feature description, machine learning, deep neural networks.



Ю.С. Егоров<sup>1</sup>, Д.А. Чупров<sup>1</sup>, В.В. Алексеев<sup>2</sup>, А.С. Прихунов<sup>2</sup>, О.В. Ямушева<sup>2</sup>

**ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА  
ДЛЯ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ КОММЕРЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛИЧНОСТИ**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>ООО «Кибернетика», г. Нижний Новгород

Работа посвящена описанию технологии персонализации коммерческих предложений различных категорий товаров с использованием интеллектуального программного агента, обеспечивающего анализ профилей целевой аудитории товара в социальных сетях, создание цифрового образа потенциального потребителя, прогнозирование его поведения и поддержку принятия решений по повышению вовлечения, ROI и конверсии интернет-площадок на основе полученных данных.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, интеллектуальный агент, программное обеспечение, предиктивная аналитика, поддержка принятия решений.

Преодоление технологических барьеров на пути создания инновационных продуктов является ключевой задачей как для российских, так и для зарубежных высокотехнологичных компаний, решение которой определяет конкурентоспособность на перспективных рынках. В связи с этим в рамках национальной технологической инициативы (НТИ) инициирована работа по формулированию перечня технологических барьеров по различным направлениям сквозных технологий и рынкам НТИ. В частности, одним из технологических барьеров является необходимость создания устройств и программных продуктов со встроенными системами анализа и обработки больших данных для решения задач оптимизации процессов во всех сферах жизни человека за счет алгоритмов глубокого обучения (нейросетевые алгоритмы), в том числе для задач промышленности, науки, бизнеса, медицины; для всех шести рыночных сегментов Дорожной карты «Нейронет». Кроме того, создание перспективных технологий интеллектуальной обработки данных для персонализации потребительских товаров за счет охвата больших групп людей, будет способствовать идентификации и регуляции коллективных интересов, коллективному управлению (в том числе созданию систем нейромаркетинга). Адаптация технологий интеллектуальной обработки данных, предиктивной аналитики и машинного обучения под цели цифрового распространения контента с учетом индивидуальных особенностей потребителя в контексте формирования цифрового двойника его личности представляет отдельный научный интерес.

По данным MorganStanley (источник – РБК) за последние два года рынок e-commerce растет во всем мире, в том числе и в России. К 2024 году объем рынка электронной коммерции в России достигнет 3,5 трлн руб. К концу 2023 года, российский рынок электронной коммерции вырастет более чем в два с половиной раза – до 3,491 трлн руб. с 1,3 трлн руб. в прошлом году.

Четыре топовых онлайн-ритейлера в России занимают лишь 27% рынка, тогда как в США – 63% рынка, в Китае – 84%. По мнению MorganStanley, причина – в недостаточном уровне инвестиций.

Согласно исследованию компании «Яндекс», рост e-commerce в России происходит исключительно за счет увеличения числа онлайн-покупателей, а не частоты их покупок.

Согласно данным сервиса Rookee, органический поиск составляет 53,9% трафика у сайтов e-commerce (было проанализировано более 10 тысяч сайтов). На платные рекламные каналы приходится 43,4% трафика.

При этом 20% сайтов, участвующих в выборке, имеют постоянный трафик из социальных сетей, который в среднем составляет 14% от общего трафика. И только 3% приходится на электронную почту.

Средний коэффициент конверсии у сайтов e-commerce составляет 1,85%. Средняя стоимость заказа, по оценке WolfgangDigital, составила 282 евро. Коэффициенты конверсии в Европе (1,51%) выше, чем в США (1,37%), но Великобритания опережает всех (1,78%).

Согласно исследованию Rookee, средний коэффициент конверсии русскоязычных сайтов – около 1,5%. Стоит отметить, что органический трафик показывает достаточно высокий уровень конверсии, уступая лишь контекстной рекламе.

По данным WolfgangDigital, 3% людей, которые положительно оценили пост бренда, купят у него товар или услугу. И, скорее всего, вернуться. Если же пользователь вступает в диалог с брендом, то конверсия достигает уже 9,95%.

Технология комплексной поддержки принятия решений с использованием предиктивного интеллектуального агента для персонализации коммерческих предложений на основе цифрового двойника личности позиционируется как не имеющая аналогов на Российском рынке, близкими аналогами являются person-based системы аналитики (например, KISS Metrics) и программные инструменты для аналитики социальных сетей, позволяющие изменять конверсию, ROI, трафик и вовлечение, например, hootsuite, quintly, audiense, oktopost и т.п.

Конкурентные преимущества:

- наличие функции предиктивной аналитики;
- наличие функции создания цифрового двойника личности;
- наличие функции интеллектуальной поддержки принятия решений менеджера-аналитика по повышению конверсии, ROI, вовлечения.

Сравнение технико-экономических характеристик с мировыми аналогами:

- предлагаемые алгоритмы предиктивной аналитики позволят выделять шаблоны поведения пользователей для предсказания их действий в будущем, в отличие от существующих алгоритмов, которые позволяют лишь отследить все этапы, через которые проходит клиент на пути к покупке (например, GoogleAnalytics);
- создание цифрового образа пользователя (цифрового двойника личности) позволит не только контролировать целевую аудиторию, но также привлекать новых потенциальных потребителей, входящих в «круг друзей», в отличие от существующих инструментов, которые анализируют профили только действующих клиентов или зарегистрировавшихся на площадке;
- наличие функции интеллектуальной поддержки принятия решений позволит выдавать менеджеру аналитику рекомендации, чтобы он мог принимать более эффективные решения, а также позволит автоматизировать его действия по повышению конверсии, ROI, вовлечению пользователей, в отличие от существующих person-based систем аналитики (например, KISSMetrics), которые лишь предоставляют информацию, но делать выводы и принимать решения должен сам аналитик.

Программное обеспечение (ПО) предиктивного интеллектуального агента для персонализации коммерческих предложений на основе цифрового двойника личности должно состоять из следующих моделей:

1. Модуль ввода данных – обеспечивает связь и доступ к социальным сетям.
2. Модуль обработки данных – обеспечивает реализацию функций предиктивного интеллектуального агента, рекомендательной системы и системы комплексной поддержки принятия решений.
3. Модуль вывода данных – обеспечивает интерактивную визуализацию данных.

Основные функции ПО интеллектуального агента для персонализации коммерческих предложений на основе цифрового двойника личности:

- получение, обработка и анализ поступающих данных из социальных сетей целевой аудитории;
- получение, обработка и анализ поступающих данных о сетевой активности целевой аудитории;
- сбор и накопление индивидуальной статистики;
- создание цифрового двойника личности;
- прогнозирование поведения целевой аудитории;
- формирование данных для персонализации коммерческих предложений на основе цифрового двойника личности;
- формирование рекомендаций менеджеру аналитику на основе обработанных данных;
- формирование рекомендаций менеджеру аналитику по привлечению новой целевой аудитории;
- оценка эффективности рекомендаций менеджеру аналитику и самообучение программы;
- интеллектуальная поддержка принятия решений на основе данных мониторинга и прогнозирования;
- автоматизация действий менеджера аналитика по формированию персонализированных коммерческих предложений;
- автоматизация действий менеджера аналитика по повышению ROI, вовлечения, конверсии площадок интернет-дистрибуции.

Практически любая компания, которая занимается продажей готовой продукции, сталкивается с необходимостью определения целевой аудитории и ценностных предложений. При этом ориентация на группу потребителей не сказывается положительно на конверсии, так как при таком подходе не учитываются индивидуальные особенности и предпочтения конкретного человека, а также, как правило, тяжело достоверно оценить степень доверия потребителя конкретной торговой марке, его платежеспособность и его социальную среду. Предлагаемая технология позволит оценить виртуальный профиль каждого потенциального потребителя из целевой аудитории, в том числе выявить ключевые для конкретного производителя характеристики этого потребителя (например, пол, возраст и т.п.), оценить его социальную среду (построить граф контактов с выявлением закономерностей), оценить сетевую активность (например, прошлые покупки на интернет-площадке конкретного производителя, просмотры схожих товаров и т.п.), а также выполнить прогнозирование поведения пользователя с использованием моделей и правил базы знаний (например, на основе меток геолокации определить типовые помещаемые места, на основе хештегов - предпочтения и интересы и т.п.), чтобы в итоге сформировать уникальные индивидуальные предложения (персональные скидки, особые условия обслуживания и т.п.), которые позволят повысить эффективность маркетинга и конверсию конкретной интернет-площадки.

Целевые потребители – предприятия, которые осуществляют распространение своей продукции с использованием сети интернет. Фактически в эту категорию попадают торговые сети рынка e-commerce, а также малые, средние и крупные предприятия по сбыту товаров широкого потребления, интернет-магазины и торговые площадки, ориентированные на распространение цифрового контента.

Рынок B2B – это цифровые площадки на рынке электронной коммерции, заинтересованные в повышении эффективности своих сотрудников, процессов и маркетинговых инструментов. Потенциальными потребителями на рынке B2C включает всех потребителей, начиная с 18-летнего возраста, причем как здоровых, так и с ограниченными возможностями. Это подбор индивидуальных товаров, а также создание и развитие личного бренда за счет использования технологии цифрового двойника.

Научная новизна содержится в следующих результатах работы:

1. Комплекс функциональных и информационных моделей процессов принятия решений, позволяющих создать полное описание процедур формирования рекомендаций пользователю.
2. Архитектура системы поддержки принятия решений, отличающаяся применением адаптивного алгоритма поддержки принятия решений, позволяющего объединить в единое информационное пространство отдельные модули системы, обеспечить адаптацию и эволюцию знаний в процессе функционирования системы.

В работе методы исследования базируются на сочетании методов интеллектуального анализа данных (для создания цифрового двойника личности) и машинного обучения (нейронные сети), теоретических подходов к проектированию информационных систем (для принятия архитектурных решения, разработки функциональных и информационных моделей, алгоритмов обработки данных и управления) и методов прогнозирования (предиктивная аналитика).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс]. Электрон. дан. – 2019. URL: <http://www.nti2035.ru/markets/neuronet> (дата обращения: 31.01.2020).
2. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.
3. **Егоров, Ю.С.** Прототип предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенева, А.С. Прихунов, Д.А. Чупров // Материалы XVII Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». – М: МГППУ, 2019. С. 161-162.
4. **Калинина (Алипова), Н.А.** Структурирование и представление контента в информационно-справочных и аналитических системах / Н.А. Калинина (Алипова), Ю.С. Егоров, В.В. Мусонов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 7. С. 33-38.
5. **Калинина (Алипова), Н.А.** Интеллектуальная система автоматизированного формирования контента / Н.А. Калинина (Алипова), Ю.С. Егоров // Труды девятого международного симпозиума "Интеллектуальные системы" (INTELS'2012). - Владимир: ВГУ, 2012. С. 263-362.

6. **Калинина (Алипова), Н.А.** Интеллектуализация поиска и обработки разнородного контента / Н.А. Калинина (Алипова), Ю.С. Егоров // Материалы XVIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2012). – Н. Новгород: НГТУ, 2012. С. 148.

**Y.S. Yegorov, V.V. Alekseev, D.A. Chuprov, A.S. Prikhunov, O.V. Yamusheva**

**MULTIFACET DECISION-MAKING SUPPORT TECHNOLOGY UTILIZING  
PREDICTIVE INTELLECTUAL AGENT FOR COMMERCIAL  
OFFERS PERSONALIZATION ON THE BASIS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Kibernetika LLC, Russia, Nizhny Novgorod

The work is devoted to the description of personalization technology for commercial offers of various categories of goods using an intelligent agent. The agent provides analysis of digital profiles in social networks and the creation of a digital profile of the consumer. The technology provides prediction of customer behavior and decision support for increasing ROI and site conversion.

**Keywords:** digital twin, intelligent agent, software, predictive analytics, decision support.

Ю.С. Егоров<sup>1</sup>, В.Р. Милов<sup>1</sup>, В.В. Алексеев<sup>1</sup>, Д.А Чупров<sup>2</sup>, А.Ю. Кербенева<sup>2</sup>

**СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ПРЕДИКТИВНОГО ИГРОВОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ИГРОКА**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>ООО «Кибернетика», г. Нижний Новгород

Работа посвящена описанию системы нечеткого логического вывода предиктивного игрового искусственного интеллекта для оценки и верификации эмоционального состояния пользователя на основе его физиологического состояния.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, компьютерная игра, искусственный интеллект, программное обеспечение, поддержка принятия решений.

Искусственный интеллект – технология создания интеллектуальных машин, способных решать интеллектуальные задачи, которые традиционно считаются привилегией человека. В настоящей работе под предиктивным игровым искусственным интеллектом (ПИИИ) понимается прикладной искусственный интеллект, предназначенный для применения в компьютерных играх, а также в интерактивных информационно-обучающих и информационно справочных системах, которые предполагают преподнесение контента пользователю в игровой форме.

ПИИИ обеспечивает возможность использования данных о текущем психоэмоциональном состоянии игрока с целью модификации игрового процесса таким образом, чтобы повысить вовлеченность человека в игру и индивидуализировать игровой процесс. Для получения данных о текущем психоэмоциональном состоянии игрока используются смарт-браслеты и системы распознавания эмоций по видеоизображению с камеры.

Для оценки и верификации эмоционального состояния на основе данных физиологического состояния предлагается использовать технологию систем нечеткого логического вывода. Структура системы нечеткого логического вывода приведена на рис.1.

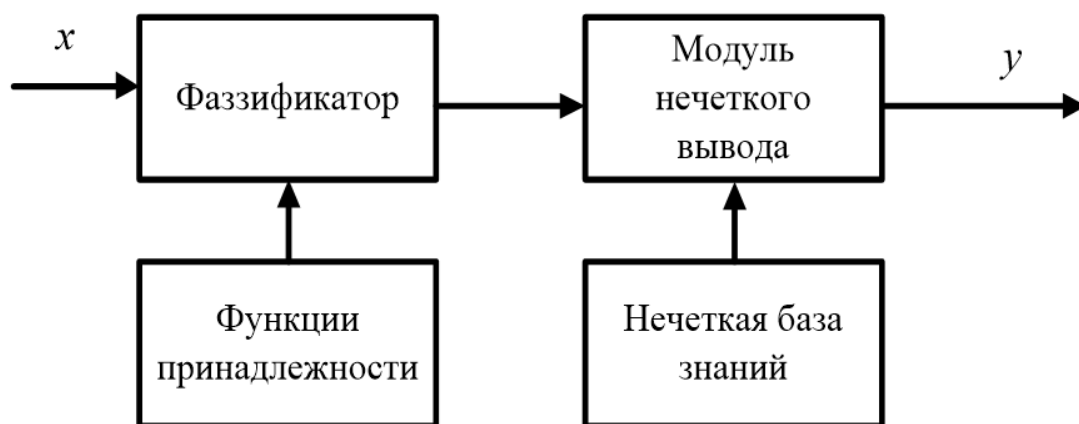


Рисунок 1. Структура системы нечеткого логического вывода

Решение задачи классификации заключается в выполнении отображения вида

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightarrow y \in \{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_m\}, \quad (1)$$

что заключается в отнесении состояния процесса перегрузки, заданного вектором информативных признаков  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , к одному из заданных классов  $\{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_m\}$ . В решаемой задаче вектор признаков характеризует физиологическое состояние и включает  $n = 3$  компоненты:  $x_1$  – пульс,  $x_2$  – систолическое давление,  $x_3$  – диастолическое давление.

На выходе системы нечеткого логического вывода (Рисунок 1), применяемой для решения задачи классификации (1) формируется дискретная переменная  $y$ , принимающая  $m = 7$  значений на множестве эмоциональных состояний (ЭС):

$\tilde{y}_1$  – гнев,

$\tilde{y}_2$  – отвращение,

$\tilde{y}_3$  – страх,

$\tilde{y}_4$  – нейтральное,

$\tilde{y}_5$  – грусть,

$\tilde{y}_6$  – радость,

$\tilde{y}_7$  – удивление.

На основе указанных семи ЭС можно выделить три класса, каждый из которых соответствует множеству ЭС:

$\tilde{c}_1$  – класс отрицательных ЭС, соответствующий  $\{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}_3\}$ ;

$\tilde{c}_2$  – класс нейтральных ЭС, соответствующий  $\{\tilde{y}_4, \tilde{y}_5\}$ ;

$\tilde{c}_3$  – класс положительных ЭС, соответствующий  $\{\tilde{y}_6, \tilde{y}_7\}$ .

Нечеткая база знаний (БЗ) содержит совокупность нечетких правил, определяющих соотношение между признаками функционального состояния и ЭС:

**R<sub>l</sub>: ЕСЛИ  $X_1=A_{1,l}$  И  $X_2=A_{2,l}$  И  $X_3=A_{3,l}$  ТО  $Y = B_l$ .**

Эти нечеткие правила можно записать в компактном виде:

$$\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,l} \rightarrow y = \tilde{y}_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где  $L$  – количество правил.

Если записать нечеткие правила для классов ЭС, то БЗ можно представить в компактном виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left( \bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,j,p} \right) \rightarrow y = \tilde{y}_j. \quad (3)$$

Здесь  $a_{i,j,p}$  – нечеткий терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в правиле (строчке) с номером  $j, p$ , где  $p = \overline{1, k_j}$  – номер правила в  $j$ -й группе,  $k_j$  – количество строчек-конъюнкций, в которых выход  $y$  оценивается значением  $\tilde{y}_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , где  $m$  – количество классов, каждый из которых описывается объединенным (по ИЛИ) нечетким правилом. При необходимости охарактеризовать степень доверия к правилам, им могут быть дополнительно сопоставлены весовые коэффициенты  $w_{j,p} \in [0;1]$ .

Степень выполнения правила  $j, p$  для входного вектора  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  определяется в соответствии с выражением:

$$\mu_{\tilde{y}_j}(\mathbf{x}) = \bigvee_{p=1, k_j} w_{j,p} \bigwedge_{i=1, n} (\mu_{j,p}(x_i)), j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

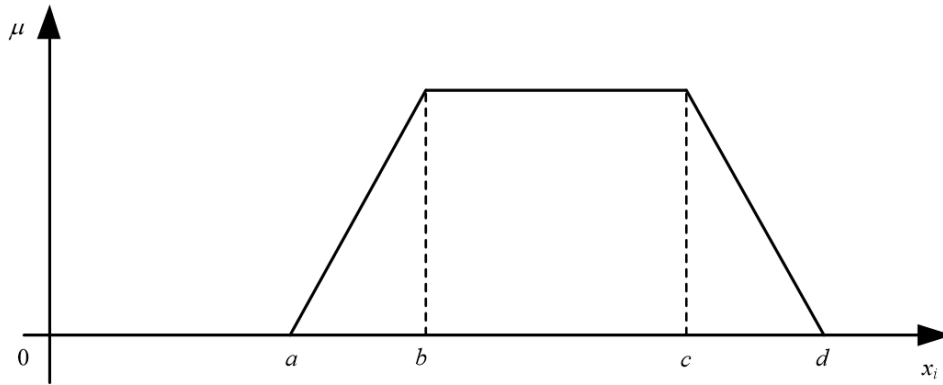
где  $\mu_{j,p}(x_i)$  – степень принадлежности значения  $x_i$  нечеткому терму  $a_{i,j,p}$ ,  $\bigvee$  ( $\bigwedge$ ) –  $s$ -норма ( $t$ -норма), которые реализуются с помощью операций максимума (минимума).

Результатом классификации является решение с максимальной степенью принадлежности в нечетком множестве

$$\hat{y} = \arg \max_{j=1, m} \mu_{\tilde{y}_j}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

Для формализации системы нечеткого логического вывода (рис.1) определяется вид функций принадлежности, в качестве которой предлагается использовать трапециевидную (рис. 2) функцию:

$$\mu_T(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a \leq x < b \\ 1, & \text{если } a \leq x \leq b; \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{если } c < x \leq d \\ 0, & \text{если } x > d \end{cases} \quad (6)$$



**Рисунок 2. Функция принадлежности**

Рассмотрим пример применения решающего правила (5) для начальной базы знаний, представленной в табл. 1 и нескольких векторов входных признаков, показанных на рис.3 различными символами:

+ –  $\mathbf{x} = [110, 150, 105]^T$ , тогда  $\hat{y} = \tilde{y}_3$  и соответственно  $\hat{c} = \tilde{c}_1$ ,

× –  $\mathbf{x} = [75, 130, 75]^T$ , тогда  $\hat{y} = \tilde{y}_4$  и соответственно  $\hat{c} = \tilde{c}_2$ ,

● –  $\mathbf{x} = [80, 135, 85]^T$ , тогда  $\hat{y} = \tilde{y}_6$  и соответственно  $\hat{c} = \tilde{c}_3$ .

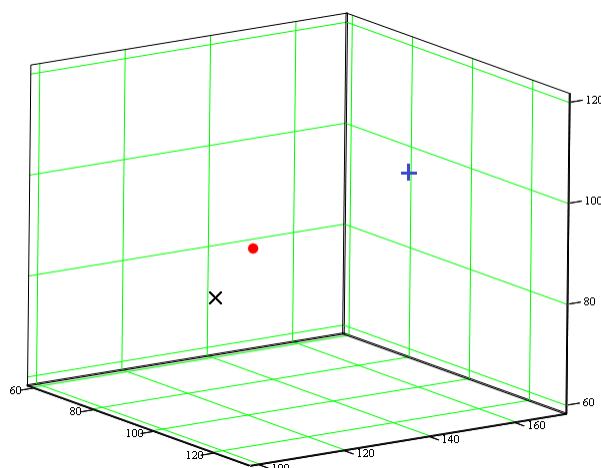
Для повышения достоверности определения эмоционального состояния предложена процедура комплексирования (объединения) оценок, формируемых на основе обработки данных видеокamеры и фитнес-браслета. На первом этапе в каждом из каналов обработки данных формируется векторная предварительная оценка ЭС:

– на основе обработки данных камеры  $\tilde{\mathbf{y}}_B = [\tilde{y}_{B1}, \tilde{y}_{B2}, \dots, \tilde{y}_{B7}]$ ,

– на основе обработки данных смарт браслета  $\tilde{\mathbf{y}}_B = [\tilde{y}_{B1}, \tilde{y}_{B2}, \dots, \tilde{y}_{B7}]$ .

Компоненты этих векторов принимают значения в интервале  $[0; 1]$ .





**Рисунок 3. Отображение результатов классификации**

Учитывая, что возможна конфигурация оборудования без смарт-браслета в качестве основного способа определения эмоционального состояния принимается обработка данных камеры. Процедура верификации заключается в сопоставлении векторов предварительных оценок ЭС  $\tilde{y}_B$  и  $\tilde{y}_B$ , полученных в двух каналах.

Если  $\hat{j}_B = \hat{j}_B$ , где  $\hat{j}_B = \arg \max_{j=1,m} \tilde{y}_{Bj}$  и  $\hat{j}_B = \arg \max_{j=1,m} \tilde{y}_{Bj}$ , то есть оценки в двух каналах совпадают, то решение об ЭС является верифицированным.

Если  $\hat{j}_B \neq \hat{j}_B$ , то решение о верификации принимается на основе сравнения с порогом  $h$  компоненты вектора предварительной оценки ЭС  $\tilde{y}_{B\hat{j}_B}$  (значения ФП) для проверяемого ЭС. Если  $\tilde{y}_{B\hat{j}_B} > h$ , то решение об ЭС считается верифицированным, в противном случае решение об ЭС не верифицировано. Значение порога выбрано равным  $h$  и может быть уточнено на основе обучения по статистическим данным.

Процедура нечеткого логического вывода (рис.1), позволяющая классифицировать ЭС на основе признаков функционального состояния, выполняется на основе совокупности нечетких «ЕСЛИ-ТО» правил, составляющих базу знаний (БЗ).

Для функционирования системы нечеткой классификации на начальном этапе с помощью извлечения знаний эксперта-медика формируется совокупность правил, характеризующих обобщенного субъекта-игрока.

Примеры правил, определяющие модель соответствия эмоций и физиологического состояния, представлены в таблице.

**Соответствие эмоций и физиологического состояния**

Эмоция	Пuls min	Пuls max	Систолическое давление min	Систолическое давление max	Диастолическое давление min	Диастолическое давление max
Гнев	80	110	135	150	85	110
Отвращение	75	100	125	145	75	95
Страх	90	130	130	170	90	120
Нейтральное	65	85	120	140	70	80
Грусть	60	75	100	130	60	85
Радость	70	90	125	145	75	95
Удивление	65	80	120	140	80	90

Пределы пульса, при которых регистрируемые данные можно считать не релевантными:

- нижняя граница – 0-15 ударов в минуту;
- верхняя граница – 200-250 ударов в минуту.

Для учета особенностей организма конкретного игрока на основе статистических данных предложен алгоритм самообучения, обеспечивающий настройку параметров функций принадлежности правил. Статистические данные, представляющие собой обучающую выборку, включают совокупность значений признаков и классифицированного ЭС:  $\mathbf{x}(n), y(n), n = \overline{1, N}$ , где  $\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), x_3(n)]$ ,  $N$  – объем обучающей выборки.

Быстрый эвристический алгоритм оценки параметров трапециевидной функции принадлежности для каждого признака и каждого эмоционального состояния при этом имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{a} &= \min_{n=1, N} x(n), \\ \hat{b} &= x_{\alpha}, \\ \hat{c} &= x_{1-\alpha}, \\ \hat{d} &= \max_{n=1, N} x(n). \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь  $x_{\alpha}$  и  $x_{1-\alpha}$  – квантили уровня  $\alpha$  и  $1-\alpha$ . В качестве начального значения предложено выбрать  $\alpha = 0,1$ . Значение гиперпараметра  $\alpha$  может уточняться из условия максимизации точности верификации эмоционального состояния на основе обработки статистических данных.

Работа выполнена за счет средств гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 11ГС1НТИС5/43265 от 06.09.2018 г.).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

### Библиографический список

1. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. - М.: Радиотехника, 2016. - 216 с.
2. **Funge, J. D.**, Artificial Intelligence for Computer Games: An Introduction. – Natick: A K Peters, 2004. – 160 p. – ISBN 1-56881-208-6.
3. **Yannakakis, G.N.**, Togelius J. Artificial Intelligence and Games. – Berlin: Springer, 2018. – 359 p.
4. **Егоров, Ю.С.** Подход к созданию предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока / Ю.С. Егоров, А.Д. Сухова, А.Ю. Кербенева // Материалы V Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (ВМППД-2018). – Тамбов: ТГТУ, 2018. С. 94-99.
5. **Егоров, Ю.С.** Прототип предиктивного игрового искусственного интеллекта, учитывающего психоэмоциональное состояние игрока / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенева, А.С. Прихунов, Д.А. Чупров // Материалы XVII Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». – М: МГППУ, 2019. С. 161-162.
6. **Егоров, Ю.С.** Разработка предиктивного игрового искусственного интеллекта / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенева, В.В. Алексеев, Д.А. Чупров // Материалы XXV международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2019). – Н. Новгород: НГТУ, 2019. С. 424-428.

7. **Егоров, Ю.С.** Разработка модуля обработки и интерактивной визуализации данных об эмоциональном состоянии пользователя / Ю.С. Егоров, А.Ю. Кербенева, А.Г. Бурова // Материалы XVIII международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (БТН-2019). – Н. Новгород: НГТУ, 2019. С. 65.

**Y.S. Yegorov, V.R. Milov, V.V. Alekseev, D.A. Chuprov, A.Y. Kerbeneva**

**SYSTEM OF FUZZY LOGICAL INFERENCE FOR PREDICTIVE GAME ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED ON THE GAMERS PSYCHOEMOTIONAL CONDITION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Kibernetika LLC, Russia, Nizhny Novgorod

The work is devoted to the description of the system of fuzzy logical inference of predictive game artificial intelligence for the assessment and verification of the user's emotional state on the basis of his physiological state.

**Keywords:** fuzzy logic, computer game, artificial intelligence, software, decision support.

В.И. Есипенко<sup>1</sup>, А.Б. Зуев<sup>1</sup>, А.А. Серов<sup>2</sup>, А.Д. Сюваткин<sup>1</sup>

## СИСТЕМА СВЯЗИ С ДАМ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСА ПОМЕХ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,  
<sup>2</sup> «Т2 Мобайн»

Рассмотрена помехоустойчивость системы связи с ДАМ в условиях действия комплекса помех (аддитивной смеси гауссовского шума и сосредоточенной по спектру помехи).

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, дискретная амплитудная манипуляция (ДАМ), гауссовский шум, сосредоточенная по спектру помеха.

Помехоустойчивость системы связи с ДАМ исследована подробно в условиях действия различных видов отдельных помех (гауссовский шум, сосредоточенные по времени (импульсные) помехи, сосредоточенные по спектру (гармонические) помехи [1].

Стремительный рост числа радиосредств выдвигает в настоящее время ряд очень трудных проблем, а именно: как обеспечить уменьшение взаимных помех между этими радиосредствами, когда они работают одновременно, а их спектры частично накладываются.

В последнее время появилась возможность применить нелинейную обработку принимаемого полезного сигнала на фоне помех с переходом для последующей фильтрации в высшие спектральные области с целью дальнейшего повышения помехоустойчивости данной системы связи.

Известно [2-5], что помехоустойчивость системы связи с ДАМ при воздействии только гауссовского шума не ухудшается при применении нелинейной обработки сигнала с последующей фильтрацией в высших спектральных областях. Однако в литературе отсутствуют сведения о помехоустойчивости данной системы связи при действии комплекса помех не только при применении нелинейной обработки, но и на первой гармонике.

В данной работе рассматривается помехоустойчивость системы связи с ДАМ на первой гармонике в условиях действия комплекса помех при некогерентной обработке. Структурная схема приёмника приведена на рис.1.

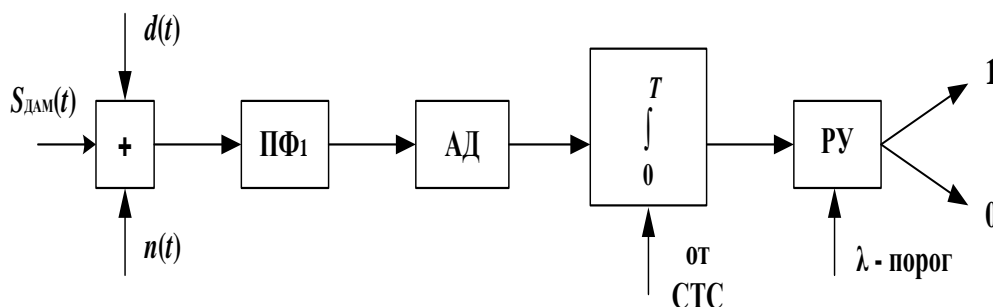


Рисунок 1. Структурная схема демодулятора сигнала с ДАМ

На вход демодулятора поступает аддитивная смесь ДАМ сигнала  $s(t) = s_{\text{ДАМ}}(t)$ , гауссовского шума  $n(t)$  и сосредоточенной по спектру помехи  $d(t)$ . Полосовой фильтр  $ПФ_1$  настроен на несущую частоту  $f_0$  полезного сигнала и имеет полосу пропускания, равную ширине спектра  $\Delta\omega_0$  полезного сигнала. Гауссовский шум  $n(t)$  имеет на выходе  $ПФ_1$  дисперсию  $\sigma^2$ , равное нулю  $m_n = 0$  математическое ожидание и фазу  $\varphi_u(t)$ , имеющую равномерное распределение в интервале  $(0, 2\pi)$ . Амплитудный детектор выделяет результирующие огибающие выходных сигналов  $ПФ_1$ :  $U_0(t)$  - при наличии полезного сигнала,  $U_1(t)$  - при его отсутствии. Интегратор и решающее устройство (РУ) обеспечивают принятие решения о том, что есть сигнал или нет. Система тактовой синхронизации (СТС) обеспечивает разбиение времени приёма на правильные интервалы времени длительностью  $T$ .

Математическая модель сигнала с ДАМ такова [1]:

$$s_{\text{ДАМ}}(t) = \begin{cases} U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & T \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (1)$$

Параметры ДАМ сигнала следующие:

- 1) несущая частота  $f_0 = 10.0 \text{ кГц}$ ,
- 2) длительность посылки  $T = 0,00125 \text{ сек}$ ,
- 3) ширина спектра полезного сигнала  $\Delta\omega_0 = 800 \text{ Гц}$ ,
- 4) амплитуда  $U_m = 2,0 \text{ (В)}$ ,
- 5) начальная фаза – несущественна, поэтому принято, что  $\varphi_0 = 0$ ,
- 6) частота дискретизации  $f_d = 120 \text{ кГц}$ .

Математические модели гауссовского шума и сосредоточенной помехи следующие:

- 1) на выходе  $ПФ_1$  имеем узкополосный гауссовский шум с моделью

$$n(t) = V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_u(t)], \quad (2)$$

где  $V(t)$  - огибающая шума;

- 2) сосредоточенная помеха  $d(t)$  есть синусоида с математической моделью

$$d(t) = D \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_n(t)], \quad (3)$$

где  $\Delta\omega = 300 \text{ Гц}$  - отстройка сосредоточенной помехи по частоте от несущей частоты полезного сигнала.

В данной работе принято:

- 1)  $\varphi_u(t) = \varphi_{u1}$  имеет равномерное распределение,  $\varphi_n(t) = 0, m_A = 0$ ,
- 2) на интервале  $(0, T)$  имеем смесь

$$x_1(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_u(t)] + D \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_n(t)] \quad (4)$$

С учётом сделанных замечаний из (4) имеем следующее:

$$x_1(t) = U_m \cos(\omega_0 t) + V(t) \cos \varphi_{u1} \cos(\omega_0 t) - V(t) \sin \varphi_{u1} \sin(\omega_0 t) + D \cos(\Delta \omega t) \cos(\omega_0 t) - D \sin(\Delta \omega t) \sin(\omega_0 t) = [U_m + A(t) + D \cos(\Delta \omega t)] \cos(\omega_0 t) - [B(t) + D \sin(\Delta \omega t)] \sin(\omega_0 t), \quad (5)$$

где в (5)  $U_m, V(t)$  и  $D$  – соответственно амплитуды полезного сигнала  $s_1(t)$ , гауссовского шума и сосредоточенной помехи соответственно;  $A(t) = V(t) \cos \varphi_{u,1}$  и  $B(t) = V(t) \sin \varphi_{u,1}$  – гауссовские огибающие квадратурных компонент узкополосного шума с параметрами  $m_A = m_B = 0$  и  $\sigma_A^2 = \sigma_B^2 = \sigma_n^2$ .

Огибающая  $U_1(t)$  суммарного процесса  $x_1(t)$  в (8) определяется так:

$$U_1(t) = \sqrt{(U_m + A(t) + D \cdot \cos \Delta \omega t)^2 + (B(t) + D \cdot \sin \Delta \omega t)^2} \quad (6)$$

Оптимальный порог  $\lambda$  для детектирования определен в [1] исходя из того, что он обеспечивает минимальную вероятность ошибки при действии только шумовой помехи:

$$P_{ou} = P_{ou}(\lambda) = p(1) \cdot p(0/1) + p(0) \cdot p(1/0) = \min P_{ou}(\lambda), \quad (7)$$

где  $P_{ou}(\lambda)$  – полная вероятность принятия ошибочного решения;  $p(1)$  – вероятность передачи символа “1”;  $p(0)$  – вероятность передачи символа “0”;  $p(0/1)$  – вероятность ошибочного принятия решения о передаче 0, если передавалась “1”;  $p(1/0)$  – вероятность ошибочного принятия решения о передаче 1, если передавался “0”.

Будем считать, что априорные вероятности передаваемых символов равны:  $p(1) = p(0) = 0.5$ . Тогда, согласно [1],  $\lambda_{opt} = (0,5 \div 0,65)U_m$ . Полную вероятность ошибочного приёма находим для каждого значения  $h$  ( $h^2 = U_m^2 / 2\sigma^2$ ), учитывая, что амплитуда полезного сигнала в рассматриваемом случае является постоянной и равна 2 В.

Найдём численные значения вероятности ошибки  $P_{ou}$  (см. далее выражение (8)) при различных отношениях мощностей сигнала и шума ( $h^2$ ), а также различных значениях амплитуды узкополосной помехи ( $D$ ). Полученные результаты подтвердим функциональным моделированием. При этом вероятности ошибок  $P(0/1)$  и  $P(1/0)$  оцениваются при статистических испытаниях.

При принятых условиях вероятность ошибочного приёма при отсутствии сосредоточенной помехи ( $D = 0$ ) определяется следующим образом при  $h \gg 1$  [1]:

$$P_{ou} = 0,5 \left\{ 0,5 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h}{\sqrt{2}} \right) \right] + e^{-\frac{h^2}{4}} \right\} \quad (8)$$

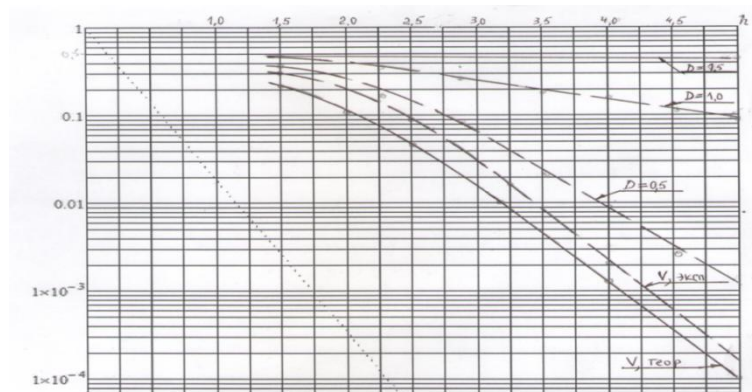
Полученная по формуле (8) вероятность ошибки приведена далее на графике (кривая  $V, теор.$ ).

На рис. 2 кривые помехоустойчивости  $V, эксп$ ;  $D = 0,5$ ;  $D = 1,0$ ;  $D = 1,5$  получены экспериментально с помощью функционального моделирования.

Из рис. 2 видно, что появление в спектре полезного сигнала сосредоточенной по спектру помехи существенно снижает помехоустойчивость системы связи ( $\nu = D/U_m$  – отношение амплитуд полезного сигнала и сосредоточенной по спектру помехи):

- 1) при амплитуде сосредоточенной помехи  $D = 0,5(B)$  ( $\nu = 0,25$ ) помехоустойчивость снижается почти на порядок,
- 2) при амплитуде  $D = 1,0(B)$  ( $\nu = 0,5$ ) – снижается дополнительно на 2 порядка,
- 3) при амплитуде  $D = 1,5(B)$  ( $\nu = 0,75$ ) информация полностью теряется (приёма нет).

Именно это обстоятельство требует разработки эффективных дополнительных методов обработки принимаемой смеси и совокупности действующих помех.



**Рисунок 2. Кривые помехоустойчивости**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### **Библиографический список**

1. **Теплов, Н.Л.** Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н.Л. Теплов. – М.: Связь, 1964. – 359 с.
2. **Есипенко, В.И.** К вопросу воздействия импульсных сигналов на нелинейный безынерционный элемент // Межвуз. сб. научн.тр. ГГУ им Н.И. Лобачевского, 1977, с. 55-62, г. Горький. – с.55-62.
3. **Есипенко, В.И.** Снижение искажающего влияния преобладающих модулирующих помех // Радиотехника. 1977, т. 33, №5. – с.55-62.
4. **Есипенко, В.И.** Демодулятор частотно-манипулированных сигналов с расщеплёнными значениями частот / Авторское свидетельство № 614548 (СССР). Б.И., №25, 1978. – с.212.
5. **Есипенко, В.И.** Оценка помехоустойчивости системы связи с ДЧМ при наличии сосредоточенной помехи в канале связи / В.И. Есипенко, Л.Ю. Богомолова // Труды НГТУ, 2015, №1. – с.11-18.

**V.I. Esipenko, A.B. Zuev, A.A. Serov, A.D. Syuvatkin**

### **COMMUNICATION SYSTEM WITH DAM, UNDER THE CONDITIONS OF THE INTERFERENCE COMPLEX**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Considered noise immunity of the communication system with DAM under the conditions of the interference complex (An additive mixture of Gaussian noise and spectrum-focused noise)

**Keywords:** noise immunity, discrete amplitude shift keying (DAM), gaussian noise, spectrum-focused hindrance.

В.И. Есипенко<sup>1</sup>, А.А. Серов<sup>2</sup>, А.Д. Сюваткин<sup>1</sup>

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ДАМ  
В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСА ПОМЕХ  
ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛА В ДЕМОДУЛЯТОРЕ**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,  
<sup>2</sup>ООО «Т2Мобайн»

Рассмотрена помехоустойчивость системы связи с ДАМ в условиях действия гауссовского шума и сосредоточенной по спектру помехи при нелинейной обработке аддитивной смеси в демодуляторе с последующей фильтрацией результата обработки на второй гармонике несущей частоты полезного сигнала.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, дискретная амплитудная манипуляция (ДАМ), гауссовский шум, сосредоточенная по спектру помеха, нелинейная обработка аддитивной смеси, фильтрация на второй гармонике сигнала.

Помехоустойчивость системы связи с ДАМ исследована подробно в условиях действия различных видов отдельных помех (гауссовский шум, сосредоточенные по времени (импульсные) помехи, сосредоточенные по спектру (гармонические) помехи, модулирующие помехи, межсимвольные помехи и др.).

Увеличение числа радиосредств выдвигает в настоящее время ряд проблем, а именно: как обеспечить уменьшение взаимных помех между этими радиосредствами, когда они работают одновременно, а их спектры частично накладываются [1].

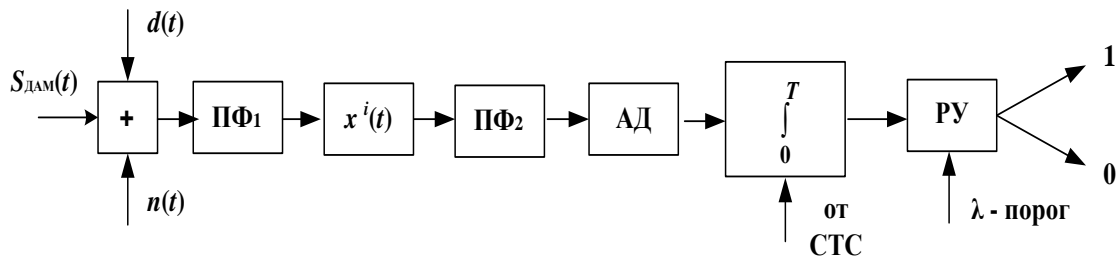
В последнее время появилась возможность применить нелинейную обработку принимаемого полезного сигнала на фоне помех в демодуляторе с переходом для последующей фильтрации в высшие спектральные области с целью дальнейшего повышения помехоустойчивости данной системы связи.

Известно [2-5], что помехоустойчивость системы связи с ДАМ при воздействии только гауссовского шума не ухудшается при применении нелинейной обработки сигнала с последующей фильтрацией в высших спектральных областях. Однако в литературе отсутствуют сведения о помехоустойчивости данной системы связи при действии комплекса помех не только при применении нелинейной обработки, но и на первой гармонике (на несущей частоте). В [6] выполнено исследование данной системы связи при действии рассматриваемого комплекса помех и приведена оценка помехоустойчивости на первой гармонике полезного сигнала (то есть на несущей частоте).

В данной работе рассматривается помехоустойчивость системы связи с ДАМ в условиях действия рассматриваемого комплекса помех при применении нелинейной обработки рассматриваемой аддитивной смеси с последующей узкополосной фильтрацией полезного сигнала на второй гармонике несущей частоты: на входе демодулятора действует аддитивная смесь полезного сигнала, белого шума и синусоидальной помехи.

Структурная схема применяемого демодулятора приведена на рис.1.





**Рисунок 1. Структурная схема демодулятора с умножением частоты**

На вход демодулятора поступает аддитивная смесь ДАМ сигнала  $s(t) = s_{\text{ДАМ}}(t)$ , гауссовского шума  $n(t)$  и сосредоточенной по спектру помехи  $d(t)$ . Полосовой фильтр  $\text{ПФ}_1$  настроен на несущую частоту  $f_0$  полезного сигнала и имеет полосу пропускания, равную ширине спектра  $\Delta\omega_0$  полезного сигнала. Гауссовский шум  $n(t)$  имеет на выходе  $\text{ПФ}_1$  дисперсию  $\sigma^2$ , равное нулю ( $m = 0$ ) математическое ожидание и фазу  $\varphi(t)$ , имеющую равномерное распределение в интервале  $(9, 2\pi)$ . Нелинейное устройство возводит в квадрат ( $i = 2$ ) результирующую смесь с выхода полосового фильтра  $\text{ПФ}_1$ , а полосовой фильтр  $\text{ПФ}_2$ , полоса пропускания которого согласована с возросшей шириной спектра полезного сигнала, выделяет полезный сигнал.

Амплитудный детектор выделяет результирующие огибающие выходных сигналов  $\text{ПФ}_1$ :  $U_0(t)$  - при наличии полезного сигнала,  $U_1(t)$  - при его отсутствии. Интегратор и решающее устройство (РУ) обеспечивают принятие решения о том, что есть сигнал или нет. Система тактовой синхронизации (СТС) обеспечивает разбиение времени приёма на правильные интервалы времени длительностью  $T$ .

Математическая модель сигнала с ДАМ такова [1]:

$$s_{\text{ДАМ}}(t) = \begin{cases} U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & T \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (1)$$

Параметры ДАМ сигнала следующие:

- 1) несущая частота  $f_0 = 10.0 \text{ кГц}$ ,
- 2) длительность посылки  $T = 0,00125 \text{ сек}$ ,
- 3) ширина спектра полезного сигнала  $\Delta\omega_0 = 800 \text{ Гц}$ ,
- 4) амплитуда  $U_m = 2,0 \text{ (В)}$ ,
- 5) начальная фаза – несущественна, поэтому принято, что  $\varphi_0 = 0$ ,
- 6) частота дискретизации  $f_d = 120 \text{ кГц}$ .

Математические модели гауссовского шума и сосредоточенной помехи следующие:

- 1) на выходе  $\text{ПФ}_1$  имеем узкополосный гауссовский шум с математической моделью

$$n(t) = V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_w(t)], \quad (2)$$

где  $V(t)$  – огибающая шума;

2) сосредоточенная помеха  $d(t)$  есть синусоида с математической моделью

$$d(t) = D \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_n(t)], \quad (3)$$

где  $\Delta\omega_n = 300 \text{ Гц}$  - отстройка сосредоточенной помехи по частоте от несущей частоты полезного сигнала.

В данной работе принято:

- 1)  $\varphi_{uu}(t) = \varphi_{u1}$  имеет равномерное распределение,  $\varphi_n(t) = 0$ ,  $m_A = 0$ ,
- 2) на интервале  $(0, T)$  имеем смесь

$$x_1(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_{uu}(t)] + D \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_n(t)], \quad (4)$$

С учётом сделанных замечаний из (4) имеем следующее:

$$x_1(t) = U_m \cos(\omega_0 t) + V(t) \cos \varphi_{u1} \cos(\omega_0 t) - V(t) \sin \varphi_{u1} \sin(\omega_0 t) + D \cos(\Delta\omega t) \cos(\omega_0 t) - D \sin(\Delta\omega t) \sin(\omega_0 t) = [U_m + A(t) + D \cos(\Delta\omega t)] \cos(\omega_0 t) - [B(t) + D \sin(\Delta\omega t)] \sin(\omega_0 t), \quad (5)$$

где в (5)  $U_m, V(t)$  и  $D$  - соответственно амплитуды полезного сигнала  $s_1(t)$ , гауссовского шума и сосредоточенной помехи соответственно;  $A(t) = V(t) \cos \varphi_{u1}$  и  $B(t) = V(t) \sin \varphi_{u1}$  - гауссовские огибающие квадратурных компонент узкополосного шума с параметрами  $m_A = m_B = 0$  и  $\sigma_A^2 = \sigma_B^2 = \sigma_n^2$ .

Огибающая  $U_1(t)$  суммарного процесса  $x_1(t)$  в (8) (это выход  $ПФ_1$ ) определяется так:

$$U_1(t) = \sqrt{(U_m + A(t) + D \cdot \cos \Delta\omega t)^2 + (B(t) + D \cdot \sin \Delta\omega t)^2} \quad (6)$$

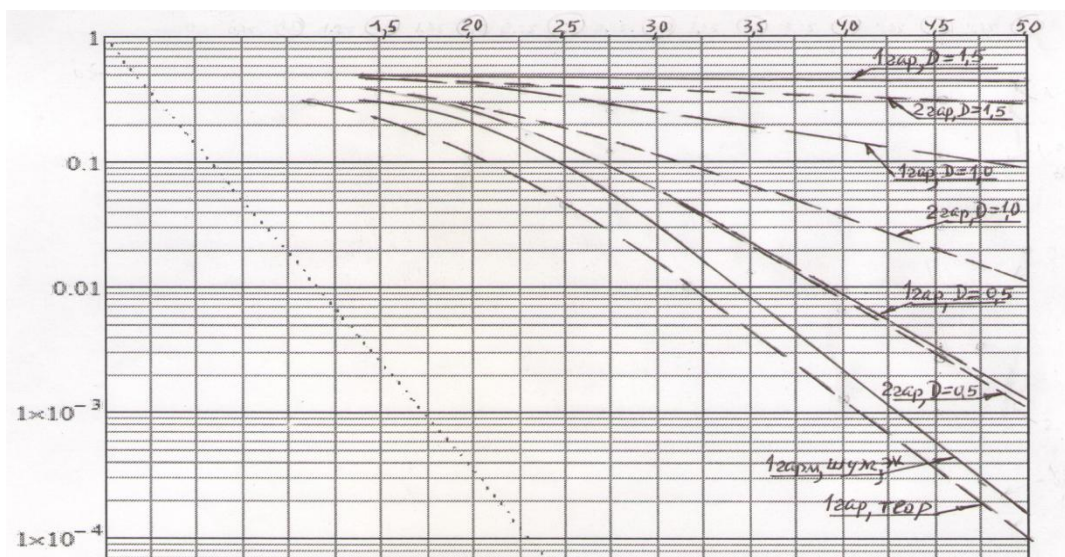
Оптимальный порог  $\lambda$  для детектирования определен в [1] исходя из того, что он обеспечивает минимальную вероятность ошибки при действии только шумовой помехи:

$$P_{ош} = P_{ош}(\lambda) = p(1) \cdot p(0/1) + p(0) \cdot p(1/0) = \min P_{ош}(\lambda), \quad (7)$$

где  $P_{ош}(\lambda)$  - полная вероятность принятия ошибочного решения;  $p(1)$  - вероятность передачи символа "1";  $p(0)$  - вероятность передачи символа "0";  $p(0/1)$  - вероятность ошибочного принятия решения о передаче 0, если передавалась "1";  $p(1/0)$  - вероятность ошибочного принятия решения о передаче 1, если передавался "0".

Результирующая огибающая на выходе фильтра  $ПФ_2$  будет иметь вид  $U_{21}(t)$  при наличии полезного сигнала и  $U_{20}(t)$  при его отсутствии.

Будем считать, что априорные вероятности передаваемых символов равны:  $p(1) = p(0) = 0.5$ . Тогда, согласно [1]  $\lambda_{опт} = (0,5 \div 0,65)U_m$ . Полную вероятность ошибочного приёма находим экспериментально при использовании функционального моделирования путём статистических испытаний. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.



**Рисунок 2. Кривые помехоустойчивости при отсутствии и наличии сосредоточенной помехи**

Из рисунка видно, что выигрыш в помехоустойчивости при переходе на вторую гармонику улучшается при:

- 1) амплитуде сосредоточенной помехи  $D = 0.5(B)$  ( $\nu = U_m / D = 0.25$ ) он незначителен;
- 2) амплитуде сосредоточенной помехи  $D = 1.0(B)$  ( $\nu = U_m / D = 0.5$ ) выигрыш почти максимален и достигает одного порядка;
- 3) сосредоточенной помехе  $D = 1.5(B)$  ( $\nu = U_m / D = 0.75$ ) выигрыш тоже незначителен.

Таким образом, выполненные исследования показали, что применение нелинейной обработки рассматриваемой смеси с переходом для последующего детектирования в высшие спектральные области является перспективным, так как позволяет улучшить помехоустойчивость приёма полезного сигнала.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

### **Библиографический список**

1. **Теплов, Н.Л.** Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н.Л. Теплов. – М.: Связь, 1964. – 359 с.
2. **Есипенко, В.И.** К вопросу воздействия импульсных сигналов на нелинейный безынерционный элемент // Межвуз. сб. научн. тр. ГГУ им Н.И. Лобачевского, 1977, с. 55-62, г. Горький. – с.55-62.
3. **Есипенко, В.И.** Снижение искажающего влияния преобладающих модулирующих помех // Радиотехника. 1977, т. 33, №5. – с.55-62.
4. **Есипенко, В.И.** Демодулятор частотно-манипулированных сигналов с расщеплёнными значениями частот / Авторское свидетельство № 614548 (СССР). Б.И., №25, 1978. – с.212.
5. **Есипенко, В.И.** Оценка помехоустойчивости системы связи с ДЧМ при наличии сосредоточенной помехи в канале связи / В.И. Есипенко, Л.Ю. Богомолова // Труды НГТУ, 1915, №1. – с.11-18.

6. **Есипенко, В.И.** Система связи с ДАМ в условиях действия комплекса помех / В.И. Есипенко, А.Б. Зуев, А.А. Серов, А.Д. Сюваткин // Труды международной конференции ИСТ-2020, 2020.

**V.I. Esipenko, A.A. Serov, A.D. Syuvatkin**

**INTERFERENCE IMMUNITY OF A COMMUNICATION SYSTEM  
WITH A DAM UNDER THE CONDITIONS OF AN INTERFERENCE  
COMPLEX DURING NON-LINEAR SIGNAL PROCESSING IN A DEMODULATOR**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Considered the noise immunity of a communication system with a DAM under conditions of Gaussian noise and concentrated on the spectrum of hindrance during non-linear processing of the additive mixture in a demodulator with subsequent filtering of the processing result at the second harmonic of the carrier frequency of the useful signal.

**Keywords:** noise immunity, discrete amplitude shift keying (DAM), gaussian noise, spectrum-focused hindrance, non-linear processing, subsequent filtering of the processing result at the second harmonic of the carrier frequency.

В.И. Есипенко, А.Д. Сюваткин

**БОРЬБА С ИМПУЛЬСНЫМИ ПОМЕХАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ОПОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассмотрена возможность борьбы с импульсными помехами в цифровых системах передачи с применением базы опорных колебаний для  $m$ -ичных фазоманипулированных посылок.

**Ключевые слова:** импульсная помеха, корреляционная обработка, решающее устройство.

Большинство применяемых способов борьбы с импульсными помехами основано на применении разновидностей использования сочетания широкополосных фильтров и ограничителей уровня сигнала помехи (ШОУ). Таким способам присуще множество недостатков, включая возможность появления паразитных гармоник при воздействии помех большой амплитуды. Негативную роль играет непредсказуемый характер появления импульсных помех. В цифровых системах передачи можно применять новые методы помехоустойчивого приема, нереализуемые в аналоговых системах. В частности, если имеется конечный набор  $m$  – уровней видов передаваемых колебаний, то можно создать и хранить в некотором регистре в приемнике базу опорных колебаний, соответствующих возможному набору исходных передаваемых колебаний. В этом случае обеспечивается режим оптимального приема. В силу наличия различных помех в канале передачи, на вход приемника приходит искаженный сигнал. В цифровом приемнике можно организовать любой известный метод сравнения принятого сигнала с помехами с сигналами из базы опорных колебаний. Необходимо лишь выработать критерии оптимального приема.

В данной статье рассматриваются возможности борьбы с импульсными помехами применением в приемнике базы опорных колебаний.

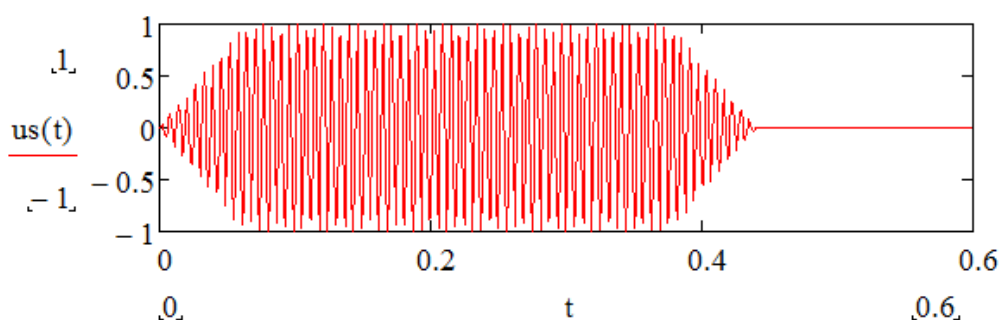
Будем полагать, что принимаемыми сигналами являются колебания несущей частоты с манипуляцией начальной фазы. Длительность каждой фазоманипулированной посылки равна длительности модулирующего бита ( $T_6$ ). На интервале длительности бита происходит значительное количество периодов колебаний несущей частоты. Очевидно, что при поражении импульсной помехой более половины длительности фазоманипулированной посылки восстановление сообщения может оказаться невозможным. Поэтому в исследованиях примем, что длительность импульсной помехи не превышает половины битовой длительности. При этом возможны варианты, что импульсная помеха может повредить любую часть фазоманипулированных колебаний (начальная, срединная или оконечная часть). Принимаемый сигнал для простоты и определенности будем считать в виде фазоманипулированных (типа OQPSK) радиочастотных колебаний. С целью уменьшения уровня импульсной помехи на возможное возникновение нелинейных искажений в тракте обработки вначале сигнал должен быть подвергнут амплитудному ограничению на уровне амплитуды принимаемых колебаний сигнала в соответствии с методом применения ШОУ. Однако, при недостаточном быстройдействии ограничителя при высоких уровнях импульсных помех, возможно возникнове-

ние нелинейных искажений. Можно полагать, что более целесообразным в таких случаях будет записание (бланкирование) тракта приемника на время воздействия импульсной помехи.

В методе с применением базы опорных колебаний рассмотрены возможности применения корреляционного анализа совпадения принимаемого полезного сигнала, частично пораженного импульсной помехой, с колебаниями из базы опорных частот.

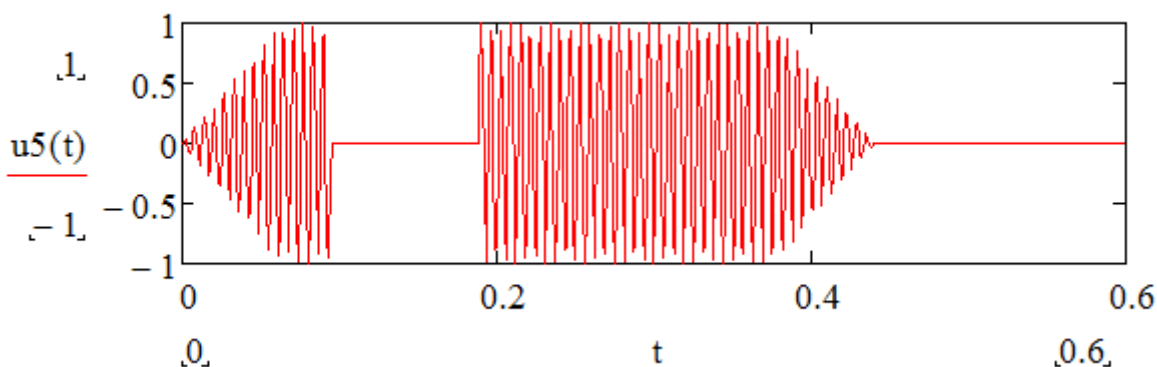
Пример такого исследования проведен моделированием процесса с использованием программы MathCad.

Принимаемый радиосигнал после прохождения фильтра представлен радиоимпульсом с пологими фронтами (см. рис.1), а опорные колебания имеют огибающую прямоугольной формы. Влияние импульсной помехи в модели представлено как участок времени, на котором бланкирующее устройство «выключает» и сигнал и помеху. В модели для упрощения выбрали, что на длительности битового интервала происходит 70 периодов колебаний несущей частоты. Из них на фронты принятого сигнала приходится по 10 периодов колебаний.



**Рисунок 1. Вид принятого сигнала**

В качестве примера на рис. 2 приведен принятый сигнал с пораженным импульсной помехой участком после бланкирования этого участка.



**Рисунок 2. Пример принятого сигнала с пораженным участком**

Набор опорных колебаний соответствующих  $m = 4$  уровням возможных начальных фаз, хранятся в базе процессора. Это радиоимпульсы ( $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$ ) с частотой заполнения, равной несущей частоте и имеющие сдвиги начальных фаз  $0, -\pi/2, -\pi, -3\pi/2$ .

Принятый сигнал поступает на четыре коррелятора. В результате выполнения операции скалярного произведения на выходах корреляторов получаем напряжение:

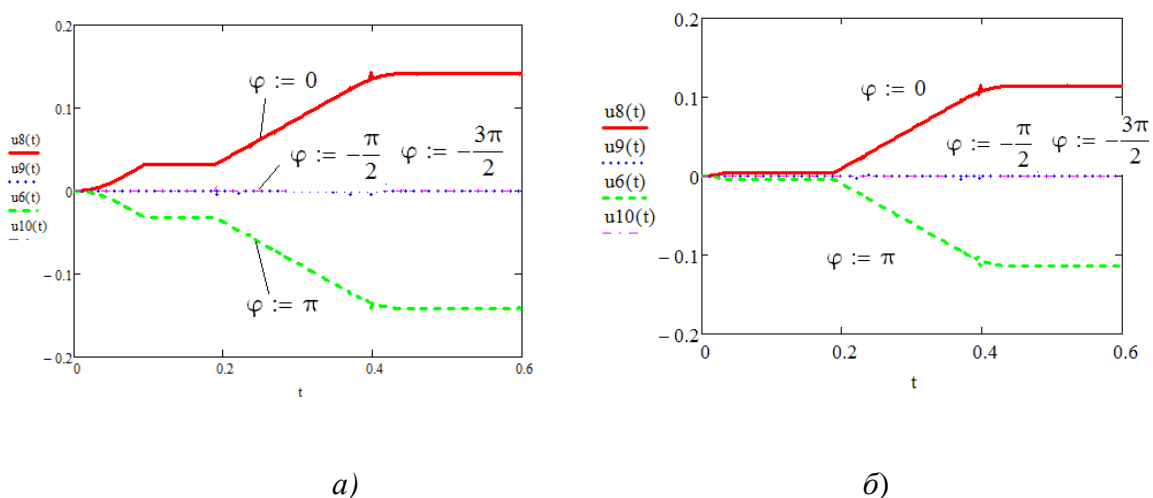
$$u_k(t) = \int_0^t u_c(t) \cdot u_{он}(t) \cdot dt .$$

Пределы интегрирования соответствуют длительности бита.

Местоположение и длительность пораженного участка в модели легко может меняться в пределах длительности радиоимпульса. На рис. 3, а показан результат моделирования, когда пораженный участок находится сразу после переднего фронта принятого сигнала и длится примерно 10 периодов колебаний несущей частоты.

Также положено, что в приемном устройстве обеспечена синхронизация с передаваемыми сообщениями как по частоте, так и по времени. Следовательно, длительность битового интервала известна в приемном устройстве.

На решающее устройство приходят сигналы с выхода каждого коррелятора. Напряжение будет положительным только с выхода того коррелятора в котором совпали начальные фазы колебаний принятого сигнала и одного из колебаний из базы опорных колебаний. Колебания с начальной фазой, отличающиеся от истинного на  $\pi$ , дадут на выходе коррелятора отрицательную величину, а колебания, отличающиеся на  $\pm\pi/2$  и  $\pm3\pi/2$ , дадут нулевое значение.



**Рисунок 3. Пример выходного напряжения коррелятора с различными участками пораженного сигнала**

На рис. 3, а показан пример, когда поражен начальный участок принятого сигнала в соответствии с рис.2 и поражение длится порядка 10 периодов колебаний.

На рис. 3, б показан пример, когда поражен весь начальный участок принятого сигнала и поражение длится порядка 15 периодов колебаний.

На этих графиках показаны выходные напряжения корреляторов при перемножении принятого сигнала параллельно со всеми опорными колебаниями из базы сигналов, имеющих разные начальные фазы. На приведенных графиках принятому сигналу присвоена начальная фаза, равная нулю. Графики показывают, что при любом расположении пораженного участка, напряжения на выходах корреляторов вполне различимы. Следовательно, решающее устройство способно определить с какой начальной фазой был принят сигнал даже при значительном участке поражения.

Из приведенных рисунков видно, что если принятый сигнал совпадает по фазе с одним из опорных колебаний, то выполняется условие:

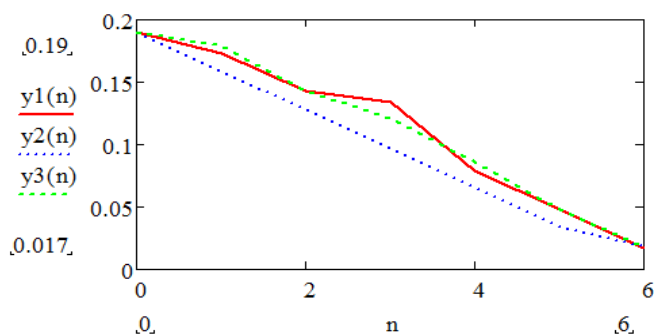
$$u_k(t) = \int_0^t u_c(t) \cdot u_{он}(t) \cdot dt > 0.$$

Если фазы различаются на  $\pm \pi/2$ , то значение интеграла будет равно нулю, а если фазы различаются на  $\pm \pi$ , то значение интеграла принимает отрицательную величину.

Проведено исследование влияния длительности режекции от действия импульсной помехи на величину максимального значения интеграла корреляции для 3-х случаев, когда помеха расположена вначале принятого сигнала, в средней части и в конечной части. Результаты вычислений представлены на рис. 4. Из этого рисунка видно, что на величину значения интеграла влияет не только длительность режекции (что вполне ожидаемо), но и то, что поражен начальный, средний или конечный участки принятого сигнала. Что заранее не было очевидным. Результаты подтверждают ожидаемое, что наибольшим отличием будут обладать сигналы с противоположными начальными фазами.

Влияние местоположения пораженного помехой участка на значение интеграла представлено на рис. 4. На этом рисунке кривые, обозначенные  $y_1(n)$ ,  $y_2(n)$ ,  $y_3(n)$  соответствуют режекции в начальной, средней и конечной части принятого сигнала. Значения длительности времени режекции кратны 10-ти периодам колебаний, то есть равны  $n \cdot 10T$ . С ростом длительности пораженного участка значение интеграла уменьшается почти линейно.

Проведенные расчеты показывают, что неточность синхронизации по фазе между принятым сигналом и опорным колебанием практически линейно уменьшает величину скалярного произведения и уменьшается разница уровней (между кривыми  $u_8$  и  $u_9$  на рис. 3) такого произведения между соседними фазовыми состояниями несущих колебаний при передаче различных символов. Например, при рассмотренных 4-х значениях начальных фаз, несинхронность фаз на  $\pi/2$  полностью нарушает возможность различения посылок.



**Рисунок 4. Максимальное значение интеграла**

В соответствии с такими результатами можно назначать значение порога величины значения интеграла для корректной работы решающего устройства. Превышение такого порога будет означать для решающего устройства (РУ), что принятый сигнал совпадает по фазе с тем или иным опорным колебанием из базы опорных сигналов. При таком подходе приемное устройство можно считать оптимальным приемником для фазоманипулированных сигналов при наличии импульсных помех.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-2052.*



---

**Борисов, В.И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, Г.С. Нахмансон. - М.: «Радио и связь», 2003. – 638 с.

**V.I. Esipenko, A.D. Syuvatkin**

**COMBATING PULSE INTERFERENCE WITH THE OF SIGNAL  
OSCILLATIONS SIMULATION**

The article discusses a possibility to combat pulse interference in digital transmission systems with the use of a base of signal simulation oscillating for m- phase manipulated oscillations.

**Key words:** pulse interference, correlation processing, decision device.

С.С. Зельманов

**ОСОБЕННОСТИ ПОНЯТИЯ РЕЗОНАНСА В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ  
И ЕГО РАЗВИТИЕ В ПРИКЛАДНОЙ РАДИОТЕХНИКЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается развитие понятия резонанса и его спектральный критерий в резонансной системе с потерями энергии. Исследуется возможность резонанса в системе с экспоненциальными собственными процессами. Рассматривается обобщение резонанса на более широкий класс линейных стационарных динамических систем, заданных лишь внешним отображением вход-выход, для которых существует экстремальный отклик на сигналы как гармонического, так и негармонического типа. Вводится понятие резонанса формы сигнала, в том числе многомерного. Показано, что такой резонанс может возникать в системе при отсутствии в ней признаков классического частотного резонанса. Предлагается классификация видов резонанса формы для передаточных функций систем общего вида.

**Ключевые слова:** спектральный критерий, экспоненциальный процесс, поведенческая модель, резонанс формы.

**Введение**

В теоретической физикетрудами выдающихся российских учёных Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, А.А. Андропова, С.А. Хайкина и других была создана теория колебаний, в которой было уделено большое внимание определению и развитию понятия резонанса в линейных стационарных системах. При всём многообразии физической природы рассматриваемых в теоретической физике резонансных систем обращает на себя внимание объединяющее их свойство, а именно свойство малых потерь. Это свойство заключается в весьма высокой добротности, начиная от колебательного контура на радиочастотах, до электрона в атоме, и составляет интервал от  $10^2$  до  $10^7$ . Потери в колебательной системе считались малыми и часто вредными, а резонансная частота считалась зависимой только от реактивных параметров. Такому подходу в теоретической физике и соответствовало предложенное определение явления резонанса [1]:

«Резонанс – резкое возрастание амплитуд установившихся вынужденных колебаний, наступающее при приближении частоты  $p$  гармоничного внешнего воздействия к частоте  $\omega_i$  одного из нормальных колебаний, свойственных данной колебательной системе». «Нормальные колебания – гармонические собственные колебания, которые могли бы существовать в линейных колебательных системах, если бы в них не происходило рассеяние энергии».

Это определение стало исчерпывающим и классическим, и необходимости дальнейшего развития теории резонанса в линейных стационарных системах не последовало, так как в теоретической физике это понятие было адекватно рассматриваемым системам.

С развитием теоретической и прикладной радиотехники появились резонансные системы, в которых потери энергии оказались столь существенными, что ни о каких нормальных колебаниях в них не могло быть и речи. Особенно это имеет отношение к RC-системам, пренебрежение конструктивными потерями в которых приводит к разрушению системы.

Кроме того, появились системы со многими степенями свободы, для объяснения явления резонанса в которых было необходимым дальнейшее её развитие.

На необходимость решения этой проблемы указывал академик А.А. Харкевич, когда утверждал, что «Ощущается потребность в таком развитии теории резонанса, которая позволила бы в общем виде рассматривать системы со многим степенями свободы» [2]. При этом А.А. Харкевич отмечал, что проблемы в создании общей теории резонанса связаны с трудностями решения характеристического уравнения сложной системы в общем виде.

Ограниченность в применении в радиотехнике классического определения резонанса была связана ещё и с тем, что оно было адекватно только одиночному резонатору, в котором собственное и свободное колебание совпадают и выступают в единстве. Поэтому возникла задача серьёзного учета потерь при выработке критерия резонансов прикладных радиотехнических системах с произвольным числом степеней свободы. Это привело к появлению критерия спектрального резонанса [3].

### 1. Критерий спектрального резонанса

При действии гармонического сигнала на входе линейной системы с постоянными параметрами на выходе ее появляется напряжение, выражение которого имеет вид интеграла Дюамеля:

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_{t_0}^t u_{\text{вх}}(\xi) h_{\delta}(t - \xi) d\xi, \quad (1)$$

где  $h(t - \xi)$  – реакция системы на  $\delta$ -импульс, представляющая собой свободное колебание, то есть сумму затухающих апериодических и колебательных собственных процессов. При  $t \geq \xi$  эта реакция имеет вид (2):

$$h(t - \xi) = \sum_{k=1}^n \left\{ a_k e^{-\alpha_k(t-\xi)} + b_k e^{-\beta_k(t-\xi)} \cos[\omega_k(t - \xi) + \varphi_k] \right\}, \quad (2)$$

а при  $t < \xi$   $h(t - \xi) = 0$ . В этом выражении  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$  и  $\omega_k$  – положительные величины, а  $a_k$ ,  $b_k$  и  $\varphi_k$  – вещественные постоянные числа. Иначе говоря, функция (2) изображает свободное колебание, как реакцию системы на  $\delta$ -импульс.

Из выражения (2) следует, что выходное колебание представляет собой результат взаимодействия входного гармонического напряжения и свободного колебания системы.

После преобразования выражения (2) получим:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \sum_{k=1}^n \left\{ a_k \int_{t_0}^t u_{\text{ВХ}}(\xi) e^{-\alpha_k(t-\xi)} d\xi + b_k \int_{t_0}^t u_{\text{ВХ}}(\xi) e^{-\beta_k(t-\xi)} \cos[\omega_k(t - \xi) + \varphi_k] d\xi \right\}. \quad (3)$$

Можно показать, что на выходе системы установившееся гармоническое колебание будет иметь вид:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}} [A(\omega, \infty) \sin \omega t - B(\omega, \infty) \cos \omega t] = U_{\text{ВЫХ}}(\omega) \sin[\omega t - \psi(\omega)], \quad (4)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}(\omega) = U_{\text{ВХ}} k(\omega)$ ,  $k(\omega) = \sqrt{A(\omega, \infty)^2 + B(\omega, \infty)^2}$ ,

$$\psi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega, \infty)}{A(\omega, \infty)}; \quad A(\omega, \infty) = \sum_{k=1}^n [A_k(\omega, \infty)_0 + A_k(\omega, \infty)]; \quad (5)$$

$$B(\omega, \infty) = \sum_{k=1}^n [B_k(\omega, \infty)_0 + B_k(\omega, \infty)]. \quad (6)$$

Из выражений (4)-(6) следует, что функции  $A_k(\omega, \infty)_0$ ,  $A_k(\omega, \infty)$  и  $B_k(\omega, \infty)_0$ ,  $B_k(\omega, \infty)$  являются частотными синусоидальными и косинусоидальными спектрами собственного аperiodического и собственного колебательного процессов с номером  $k$ , входящих в состав свободного колебания системы. Функция  $k(\omega)$  является модулем частотного спектра свободного колебания  $h(t)$  и одновременно передаточной функцией рассматриваемой линейной системы с постоянными параметрами.

В общем случае частотные спектры всех собственных процессов в системе с несколькими и даже многими степенями свободы перекрываются. Это означает, что каждый относительный максимум модуля частотного спектра свободного процесса будет совпадать с частотой, зависящей от наличия всех собственных процессов. Поэтому имеется полное основание считать, что выходное колебание появляется в результате взаимодействия входного и свободного процесса, являющегося суммой собственных процессов системы. Наличие экстремумов модуля спектра свободного процесса свидетельствует о возможности резонансов в системе на частотах этих экстремумов. Эти частоты и являются резонансными частотами системы.

В этом состоит смысл спектрального критерия резонанса, учитывающего потери в резонансной линейной стационарной системе с произвольным числом степеней свободы.

Из выражения (2) следует, что в составе собственных процессов наряду с колебательными могут иметь место аperiodические процессы. В связи с этим возникает вопрос о возможности резонанса в линейной системе только аperiodическими экспоненциальными собственными процессами. Очевидно, что это возможно в случае, если сумма экспоненциальных собственных процессов представлять собой свободное затухающее колебание. Известно, что корни характеристического уравнения резонансной системы являются комплексно-сопряженными. Возможен ли резонанс в системе с отрицательными корнями характеристического уравнения? Рассмотрим такую возможность [4].

## 2. Резонанс в системе с собственными экспоненциальными процессами

Если это возможно, то класс резонансных линейных динамических систем может быть несколько расширен. Рассмотрим общий случай, когда свободный процесс в линейной динамической системе есть сумма произвольного числа собственных экспоненциальных не ортогональных процессов вида (7):

$$u_2(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots + C_n e^{-\alpha_n t}. \quad (7)$$

Тогда частотный спектр свободного колебания (7) системы может быть определен так:

$$S(j\omega) = \sum_{k=1}^n S_k(j\omega) = \sum_{k=1}^n C_k \frac{1}{\alpha_k + j\omega}. \quad (8)$$

Резонанс в такой линейной системе может иметь место, если существует хотя бы одна частота  $\omega_p$ , на которой огибающая модуля спектральной плотности (8) свободного колебания имеет максимум, так как имеет место резонанс.

Эта задача сводится к доказательству возможности существования величин  $\alpha_k$  и  $C_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ), выражения (8). при которых решение будет с заданной степенью точности представлять собой заранее заданную непрерывную функцию  $u_{\text{св}}(t)$  с максимумом частотного спектра на заданной частоте  $\omega_p$ . Действительно, чтобы произвести полином, принадлежащий к рассматриваемому классу, в соответствии с формулой Виета необходимо,

чтобы отношение  $a_n/a_1$  имело вид: 
$$\frac{a_n}{a_1} = \frac{\alpha^n}{\sum_{k=1}^n \alpha_k} = A\alpha^{n-1}(-1)^{n-1},$$

$$A = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n}{1 + 2 + 3 + \dots + n} = \frac{n!}{0,5n(1+n)} = \frac{2(n-1)!}{n+1}, \text{ откуда } \alpha = -\left(\sqrt[n-1]{a_n/a_1 A}\right) \quad (9)$$

Это означает, что представление решения в виде суммы экспонент с кратными показателями возможно лишь при величине  $\alpha$ , зависящей от коэффициентов уравнения (9). Тогда свободное колебание системы может быть представлено в виде

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{-\alpha_k t} = \sum_{k=1}^n C_k (e^{-\alpha t})^k. \quad (10)$$

Обозначение  $e^{-\alpha t} = x$ , откуда  $t = -\frac{1}{\alpha} \ln x$ . Очевидно, что если  $0 \leq t < \infty$ , то  $1 \geq x > 0$ .

С учетом этого выражение (12) примет вид  $u_2\left(-\frac{1}{\alpha} \ln x\right) = \sum_{k=1}^n C_k x^k$ . Обозначим

$u_{\text{св}}\left(-\frac{1}{\alpha} \ln x\right) = f(x)$ . Тогда поставленная задача может быть сформулирована так:

существуют ли величины  $C_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ), при которых степенной полином с заданной степенью точности аппроксимирует заданную непрерывную функцию  $f(x)$  в интервале  $1 \geq x > 0$ ? В соответствии с теоремой Вейерштрасса о равномерном приближении непрерывной функции многочленами при достаточно большом  $n$  существуют такие коэффициенты

$C_k$ , при которых выполняется неравенство  $\left|f(x) - \sum_{k=1}^n C_k x^k\right| \leq \varepsilon, 0 < x \leq 1$ , где  $\varepsilon$  – сколь

угодно малая положительная величина. Доказательство верно для любой непрерывной функции  $f(x)$ , а значит, и для свободного колебания  $u_{\text{св}}(t)$ , которое может иметь частотный спектр с экстремумом типа "максимум" на частоте  $\omega_p$ , причем, количество таких частот может быть произвольным. Отсюда следует, что в линейной системе, в которой все собственные процессы – аperiodические (экспоненциальные), возможен сколь угодно резко выраженный резонанс на заранее заданной частоте, а в качестве корней характеристического уравнения могут иметь место и отрицательные вещественные числа.

Это означает, что сумма экспоненциальных не ортогональных собственных процессов может представлять собой свободное колебание, являющееся результатом неполной компенсации экспонент.

### 3. Резонанс формы

Существуют системы, в которых резонанс может иметь место не только на одной, но и на нескольких частотах. При этом возможны случаи, когда резонанс на нескольких частотах наступает одновременно. Выполнение условия резонанса для ряда или, точнее, для определенного спектра частот одновременно, означает, что условие резонанса справедливо и по отношению к вполне определенному сигналу, которому соответствует этот частотный спектр.

В связи с этим возникает вопрос: что это за класс линейных стационарных систем, в которых резонанс имел бы место одновременно на нескольких или многих частотах? Это означает вопрос: существуют ли системы, которые бы резонансно реагировали на воздействия, отличные от гармонических колебаний?

Другими словами, речь идет о возможности максимального реагирования системы на сложное воздействие, то есть на сложный сигнал в целом.

Среди таких систем обращает на себя внимание согласованный фильтр, который экстремально реагирует на входной сигнал определенной формы.

Возникает вопрос. Можно ли отнести согласованный фильтр к таким резонансным системам? Свободный процесс резонансной линейной системы является реакцией этой системы на входной  $\delta$  – импульс, то есть импульсной характеристикой системы, в частном случае – согласованного фильтра.

При этом напряжение на выходе линейной системы определяется как свертка вынуждающей силы (входного сигнала) со свободным процессом системы, то есть с ее импульсной характеристикой, и может быть представлено интегралом Дюамеля:

$$u_2(t) = \int_0^t u_{ВХ}(\xi) h_\delta(t - \xi) d\xi. \quad (11)$$

Импульсная характеристика согласованного фильтра воспроизводит значения входного сигнала  $u_1(t)$  в обратной последовательности, начиная с момента  $t = T_0$  и заканчивая моментом  $t = 0$ . Поэтому в интервале времени  $0 \leq t \leq T_0$  на выходе согласованного фильтра будет иметь место переходный режим. Этот режим характеризуется возрастанием выходного напряжения до максимальной величины к моменту времени  $t = T_0$ .

В связи с этим возникает вопрос, можно ли согласованный фильтр, который в момент времени  $t = T_0$  экстремально реагирует только на определенный сигнал, считать резонансной системой? Для того, чтобы сделать такое заключение, необходимо ответить на следующий вопрос. Каков параметр настройки согласованного фильтра, связанный с эффектом его экстремального реагирования?

При гармоническом частотном резонансе таким параметром служит частота гармонического воздействия, на которую настраивается резонансная система путем изменения её параметров.

Очевидно, что в случае согласованного фильтра параметром настройки будет являться форма сигнала, с которым согласован фильтр. Объектом настройки в фильтре является форма его импульсной характеристики, на которую «настраивается в резонанс» согласованный фильтр.

В случае вариации формы входного сигнала относительно формы импульсной характеристики или формы импульсной характеристики относительно формы входного сигнала будет иметь место режим расстройки по форме, приводящий к уменьшению

резонансного пикового значения выходного сигнала по отношению к его экстремальному значению.

Следовательно, характеристика экстремальности согласованного фильтра должна иметь вид функционала  $F[h_\delta(t), u_1(t, k)]$ , зависящего от импульсной характеристики фильтра, то есть от его свободного процесса, и формы входного сигнала, обладающего некоторым параметром формы  $k$ .

Зависимость степени реагирования фильтра от формы входного сигнала может быть определена как избирательность согласованного фильтра по форме сигнала.

В частности, для гармонического воздействия параметр формы  $k$  является частотой и определяется номером гармоники  $\sin k\omega t$ . Гармоники с разными номерами отличаются по частоте, и соответственно по форме. Изменение формы гармонического сигнала происходит за счет изменения его частоты.

Каков же должен быть критерий экстремальности согласованного фильтра? Какой вид должна иметь математическая операция, позволяющая оценить степень отличия формы входного сигнала от формы свободного процесса или импульсной характеристики фильтра и обеспечить максимальное значение выходного сигнала при их соответствии друг другу?

В качестве такого критерия может быть использовано максимальное значение функционала  $F$ , при резонансном значении вариационного параметра  $k_p$  (12):

$$F_{\max} [h_\delta(t), u_1(t, k_p)] = \max \left[ \max \int_0^{T_0} u_1(t, k_p) h_\delta(T_0 - t) dt \right], \quad (12)$$

где  $T_0$  – длительность входного сигнала  $u_1(t, k_p)$ ,  $k_p$  – var - резонансный вариационный параметр формы сигнала.

Критерием экстремальности резонанса в согласованном фильтре является относительный максимум (экстремум) максимальной величины свертки входного сигнала и зеркального отображения свободного процесса фильтра.

Явление, при котором наблюдается этот относительный максимум (экстремум) величины свертки, мы можем определить как резонанс формы входного сигнала [5].

#### 4. Обобщённый резонанс

Рассмотренные ранее особенности резонанса в линейных стационарных системах с произвольным числом степеней свободы и конструктивными потерями энергии предполагали внутреннее описание резонансной системы с анализом происходящих в ней процессов при внешнем воздействии.

Более широкий подход к изучению резонанса в линейных стационарных динамических системах предполагает рассмотрение поведенческой модели системы с внешним описанием, то есть системы типа «вход-выход», отличным от традиционного внутреннего описания резонансной системы.

Поведенческая модель системы позволяет ставить и решать задачи на некоторые её «особые» поведения. Известны решения задачи на устойчивое поведение, неустойчивое поведение, ограниченный отклик. Определение резонанса как особого внешнего поведения позволяет существенно обобщить это понятие, приблизив к научному объяснению многие поведенческие ситуации в гораздо более широком классе динамических систем, по сравнению с теми системами, которые описываются дифференциальными уравнениями второго порядка.

Для систем общего вида резонанс имеет место не для уникального сигнала, а для класса эквивалентности по отношению к резонансу. И этот класс эквивалентности по отношению к резонансу можно называть формой сигнала, частный случай которого рассмотрен на примере согласованного фильтра. В этом случае можно говорить о резонансе формы. Если не рассматривать зависимость поведения системы от её начального состояния, а полагать его некоторым стандартным, например нулевым, то оператором перехода от функции внешнего воздействия  $u_1(t)$  к функции-«отклику», то есть выходному значению  $u_2(t)$  может служить интеграл свертки для её нулевого начального состояния:

$$u_2(t) = \int_0^t G(t, \tau) u_1(\tau) d\tau,$$

где  $G(t, \tau)$  - это ядро этого оператора.

При этом резонанс рассматривается как свойство системы с внешним описанием типа «вход-выход». Это свойство альтернативно традиционному классическому резонансу системы с внутренним описанием

Рассмотрим такую бихевиоральную, то есть поведенческую модель. При этом учтем, что в соответствии с теорией бихевиоризма система может иметь самую различную физическую природу, но главным здесь является понятие о её поведении, как объективно наблюдаемой системе реакций на разнообразные внешние воздействия (стимулы).

Модель такой динамической системы имеет вид:

$$y(t) = F_x(u(\tau < t)), \quad (13)$$

где  $t$  – время (действительное число), а входной сигнал  $u: t \rightarrow U$ , представлен в виде  $U$  – множеством своих значений. В случае, когда система имеет  $n$  входов, то будем полагать  $U = R^n$ , где  $R^n$  - множество  $n$ -мерных векторов.

Функция  $F_x$  означает семейство функций внешнего отображения, индексированное состоянием системы, то есть функций, преобразующих отрезок входного сигнала  $u(\tau) = u(\tau < t)$  при  $\infty < \tau < t$  в значение выходного сигнала  $y \in Y$  для каждого выбранного начального состояния системы  $x$ .

Выходной сигнал  $y: t \rightarrow Y$  функция, представленная своими значениями в  $Y$  для систем с одним выходом, где  $Y$  – множество действительных чисел.

Введем передаточно-параметрическую характеристику, как скалярную функцию, аргументом которой может являться:

- одно число для однопараметрического резонанса,
- $n$  чисел для  $n$ -параметрического резонанса,
- элемент функционального пространства в общем случае.

Эта передаточная функция определена в нормированном функциональном пространстве входных сигналов, суженных на отрезок  $(0, T)$  так, что  $L = \|y\| = f(u)$ ,  $u = u(t)$ ,  $t \in (0, T)$ , а её значение – неотрицательное число  $L$ .

Если найдется такая точка в функциональном пространстве входных сигналов  $u_0$ , для которой справедливо соотношение вида:

$$L_0 = f(u_0) > f(u), \quad \forall u \neq u_0, \quad (14)$$

означающее, что в функциональном пространстве входных сигналов существует некоторый сигнал  $u_0$ , для которого имеет место максимальный уровень (норма) выходного сигнала по



сравнению со всеми другими сигналами, то есть в системе (13) имеет место резонанс. Такой резонанс, в частности, наблюдается в согласованном фильтре.

В силу линейности и стационарности (13) резонанс, очевидно, будет иметь место для всех сигналов вида:  $u = \mu u_0(t - t_0)$  где  $\mu$  и  $t_0$  – масштабный коэффициент и сдвиг. Это означает, что в нормированном функциональном пространстве входных сигналов могут существовать группы сигналов. При воздействии на систему каждого сигнала из своей группы резонансная реакция системы будет идентична, но будет отличаться от резонансной реакции на сигналы из любой другой группы.

Отсюда следует, что для систем вида (13) резонанс имеет место не для уникального сигнала, а для класса эквивалентности по отношению к резонансу. И этот класс эквивалентности по отношению к резонансу можно называть формой сигнала. В этом случае можно говорить о резонансе формы в самом широком смысле.

Таким образом, обобщено понятие частотного резонанса, в качестве которого фигурирует резонанс формы как общий вид резонанса. Резонанс формы является обобщением следующих видов резонансов:

- 1) однопараметрический собственный резонанс - имеется максимум на передаточной характеристике – функции одной действительной переменной (форма выходного сигнала совпадает с формой входного сигнала);
- 2) матричный резонанс формы при наличии  $n$  - сигналов на входе и 1го на выходе. (формы входных сигналов различны и не совпадают с формой выходного сигнала);
- 3) многопараметрический резонанс формы – (форма входного и выходного сигнала не обязательно одинаковы, имеется максимум на передаточной характеристике – функции многих по числу параметров переменных).

## 5. Практическое использование резонанса формы

Существующие способы испытаний систем и конструкций основаны на использовании в качестве испытательного сигнала гармоник экстремумов АЧХ системы или шумового воздействия. При этом комплексные характеристики объекта испытаний и характеристики испытательного сигнала не согласованы между собой, что ведёт к неполноценному результату испытаний. Понятие резонанса формы позволяет сформировать оптимальный резонансный сигнал в виде зеркального отображения импульсной характеристики объекта испытаний. При этом достигается самый максимально возможный отклик объекта, то есть оптимально решается задача испытаний [6].

### Заключение

Предложенное в теоретической физике определение понятия резонанса применительно к системам с малыми потерями и появление в прикладной радиотехнике резонансных систем существенными потерями и произвольным числом степеней свободы послужили стимулом к дальнейшему обобщению понятия резонанса и его критерия. Подходы эти не противоречат друг другу, а скорее взаимно дополняют друг друга при рассмотрении вновь появляющихся в прикладной радиотехнике всё более сложных систем.

## Библиографический список

1. **Мандельштам, Л.И.** Лекции по теории колебаний / Л.И. Мандельштам. М.: Наука», 1972. – 466 с.
2. **Харкевич, А.А.** Основы радиотехники / А.А. Харкевич. - М.:ГИЛ, вопросы связи и радио,1963. – 69 С.
3. **Зельманов, С.С.** Влияние потерь энергии в системе на характер резонансных процессов Международный форум информатизации (МФИ-2008) // Международный конгресс «коммуникационные технологии и сети» (СТН-2008): Труды. межд. Конф / МАИ. Москва. 2008. С.96-101.
4. **Зельманов, С.С.** Резонанс в линейной стационарной системе с экспоненциальными собственными процессами // Известия ЮФУ. Технические науки.- Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010.-12(113). №3. С.116-125.
5. **Зельманов, С.С.** Исследование явления резонанса формы сигнала в согласованном фильтре // Электросвязь. 2011, №1.С34-37.
6. **Зельманов, С.С.,** Крылов В.В. «Способ динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия. Заявка №2019107896.Патент №.2702930. Приоритет от 19.03. 2019г.

**S.S. Zelmanov**

### **FEATURES OF THE CONCEPT OF RESONANCE IN THEORETICAL PHYSICS AND HIS DEVELOPMENT IN APPLIED RADIO ENGINEERING**

The development of the concept of resonance and its spectral criterion in a resonant system with energy losses are considered. The possibility of resonance in a system with exponential intrinsic processes is investigated. A generalization of resonance to a wider class of linear stationary dynamic systems, given only by an external input-output mapping, for which there is an extreme response to signals of both harmonic and non-harmonic types, is considered. The concept of resonance of the waveform, including multidimensional, is introduced. It is shown that such a resonance can occur in a system in the absence of signs of a classical frequency resonance in it. A classification of the forms of resonance of the form for the transfer functions of systems of a general form is proposed.

**Keywords:** spectral criterion, exponential process, behavioral model, shape resonance.

А.Ю. Карягин

## ЗАДАЧА НАЗНАЧЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ В ПРОЕКТАХ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Рассмотрена классическая постановка задачи о назначениях и представлена ее математическая модель. Указаны наиболее часто используемые методы решения задачи о назначениях. Показана схема классического венгерского алгоритма. Представлена несбалансированная задача о назначении и ее математическая модель. Описан модифицированный венгерский алгоритм. Проведено сравнение модифицированного и классического венгерского алгоритмов. Выполнена постановка задачи и сформулирована ее математическая модель.

**Ключевые слова:** математическая оптимизация, задача о назначениях, венгерский алгоритм, модифицированный венгерский алгоритм, многокритериальная оптимизация.

В настоящее время математическая оптимизация является важной областью математики. В широком смысле оптимизация находит применение в разных отраслях науки, техники и человеческой деятельности в целом [1, 2]. В современном мире человек часто сталкивается с проблемой выбора лучшего решения из совокупности альтернатив в какой-либо области деятельности. В таком случае возникает необходимость решения задачи оптимизации.

Важной частью управления работой организации является отбор кадров. В случае необходимости структуризации персонала возникает оптимизационная задача распределения персонала на определенные рабочие позиции. В статье рассматриваются различные методы решения задачи назначения претендентов на вакантные рабочие места, в которой каждый из них обладает определенным набором навыков (компетенций) для выполнения требуемых обязанностей. Представлена задача о назначении с возможностью параллельного повышения квалификации исполнителей.

### Постановка задачи

Необходимо сформировать команду из сотрудников предприятия, способных наиболее эффективно решить поставленную задачу с привлечением наименьших человеческих ресурсов при этом реализовать возможность обучения персонала недостающим компетенциям.

### Основная часть

В классической форме задача о назначении формулируется следующим образом. Существует некоторое число работ и некоторое число исполнителей. Любой исполнитель может быть назначен на исполнение любой (только одной) работы, но с неодинаковыми затратами. Нужно распределить работы так, чтобы выполнить их с минимальными затратами [3].

Математическая модель задачи о назначениях общего вида:

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min(\max) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} x_{ij} = (\leq) 1, j = \overline{1, n} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m s_{ij} x_{ij} = (\leq) 1, j = \overline{1, m} \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m} \quad (4)$$

Любая задача о назначениях может быть решена с использованием методов линейного программирования или алгоритма решения транспортной задачи. Для решения такого вида в большинстве случаев можно использовать симплекс-метод. При решении задач о назначениях наиболее часто используются два метода – метод Мака и венгерский метод [3].

Метод Мака применяется для распределения функций между элементами системы, когда каждый из этих элементов способен выполнять любую из функций с разной эффективностью [3]. Предполагается выполнение одним элементом одной функции, и на выходе системы необходимо получить максимальную эффективность.

Общая схема классического венгерского алгоритма представлена на (рис. 1).

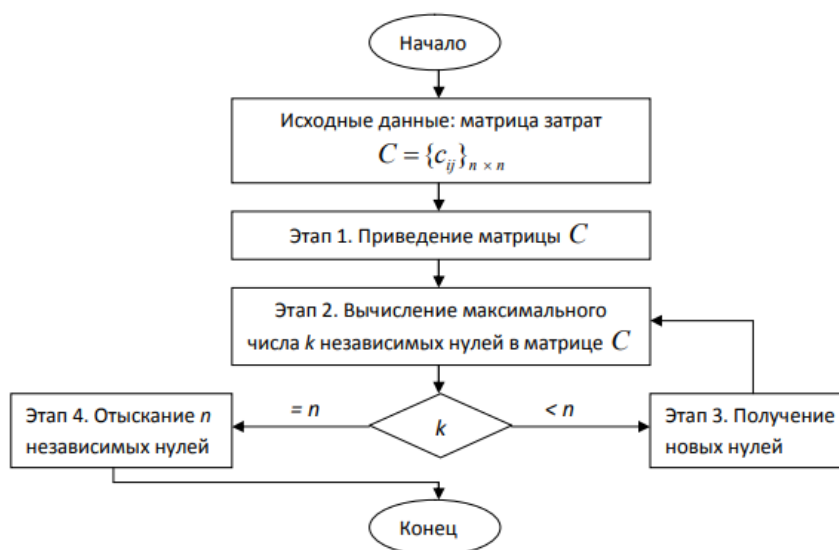


Рисунок 1. Общая схема алгоритма

Несбалансированная задача о назначении – это особый подкласс задач о назначении, целью которого является поиск оптимального распределения количества работ  $n$  на количество рабочих  $m$  причем  $n \neq m$ . Выделяются следующие признаки [4]:

- количество работ больше, чем количество рабочих  $n > m$ ;
- каждый рабочий способен выполнять несколько работ;
- никакая работа не может быть назначена более чем одному рабочему;
- каждая пара рабочий - работа имеет определенную стоимость.

Математическая модель в этом случае выглядит следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \rightarrow \min \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1, i = \overline{1, m} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1, j = \overline{1, n} \quad (7)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ или } 1 \quad (8)$$

Ограничение (6) указывает на то, что одному рабочему может быть назначено более одной работы, а ограничение (7) показывает, что никакая работа не может быть назначена более чем одному рабочему.

Для такой задачи может быть применен следующий модифицированный венгерский алгоритм [5]:

1. Найти минимальную стоимость в каждом столбце и вычесть ее из соответствующего столбца. После данной операции возникает хотя бы один ноль в каждом столбце;
2. Найти минимальную стоимость в каждой строке и вычесть ее из соответствующей строки;
3. Проверить достижение идеальной задачи. Если число столбцов равно количеству строк, перейти к шагу 6, в противном случае к шагу 4;
4. Если количество столбцов не равно количеству строк, выбирается наименьшая непокрытая стоимость:
  - а) вычитается выбранная непокрытая стоимость из каждой непокрытой стоимости в таблице,
  - б) прибавляется эта наименьшая непокрытая стоимость к затратам, расположенным на каждом пересечении.
5. Повторяются шаги 3 и 4, до момента достижения идеальной задачи;
6. Для назначения работы необходимо найти строку, имеющую только один ноль. Выбирается этот ноль и вычеркивается оставшийся ноль, соотносящийся с соответствующим столбцом, поскольку одна и та же работа не может быть назначена более чем одному рабочему, но один и тот же рабочий может выполнять более одной работы.
7. Любые строки, имеющие два или более нулей, соотносятся с минимальной стоимостью в исходной задаче.
8. Повторяются шаги 6 и 7 до распределения всех работ.

В таблице показано сравнение модифицированного алгоритма с классическим Венгерским алгоритмом.

Наиболее близким способом решения данной задачи является «Модифицированный Венгерский алгоритм», но, согласно условию, каждая работа может выполняться не только одним рабочим, поэтому прямое применение такого метода невозможно. Также в данном алгоритме отсутствует реализация обучения претендентов. Поскольку рассмотренные алгоритмы не удовлетворяют условию поставленной задачи необходима разработка нового алгоритма решения.

## Сравнение модифицированного и классического алгоритмов

Модифицированный алгоритм	Венгерский алгоритм
Данный метод используется при несбалансированной задаче о назначении	Данный метод используется при сбалансированной задаче о назначении
Число работ всегда больше числа рабочих и все работы выполняются реальными рабочими.	При количественном превосходстве числа работ перед рабочими, нехватка рабочих восполняется введением фиктивных.
Все работы выполняются	Некоторые работы остаются без выполнения
Один рабочий выполняет, по крайней мере, одну работу	Один рабочий выполняется только одну работу
Каждая работа может выполняться только одним рабочим	Каждая работа может выполняться только одним рабочим

### Математическая модель поставленной задачи

Существует множество подзадач проекта  $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ , множество возможных исполнителей  $E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_k\}$  и множество компетенций  $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_m\}$ . Требуется назначить исполнителей  $E$  на подзадачи проекта  $T$  с учетом требуемых компетенций, то есть определить матрицы назначений исполнителей на выполнение подзадачи  $X = \|x_{ij}\|$   $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$  и матрицу направления исполнителей на обучение  $Y = \|y_{ij}\|$   $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$ .

Известна матрица  $C$  стоимости выполнения подзадач проекта исполнителями, матрица  $P$ , отражающая взаимосвязь подзадач проекта с требуемыми для их реализации компетенциями, а также матрица  $V$  стоимости обучения каждого исполнителя требуемым компетенциям (если исполнитель изначально обладает необходимыми навыками, то стоимость его обучения равна нулю).

$$L(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij} w_{ij} \rightarrow \min \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} \geq 1 \quad (12)$$

$$y_{ij} = q_{ij} v_{ij} \quad (13)$$

где  $W = VP$  – матрица, отражающая стоимость обучения сотрудника для выполнения подзадач проекта.

$Q = XP^T$  – матрица, отражающая необходимые для сотрудника компетенции для выполнения назначенных ему подзадач проекта.

Учитывая, что сформулированная математическая постановка задачи является задачей многокритериальной оптимизации, она требует разработки и применения специальных алгоритмов решения.

### Библиографический список

1. **Зайцев, М.Г.** Методы оптимизации управления для менеджеров: компьютерно-ориентированный подход / М.Г. Зайцев. - М.: Дело АНХ, 2016. - 312 с.
2. **Данилин, Д.А.** Решение задач о назначениях в области разработки программного обеспечения с использованием ключевых показателей эффективности / Д.А. Данилин, З.И. Баусова // Научный Форум: Экономика и Менеджмент. – 2017. – С.39-44.
3. **Аттетков, А.В.** Методы оптимизации: учеб. пособие / А.В. Аттетков, В.С. Зарубин, А.Н. Канатников. - М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 270 с.
4. **Ventepaka, Y., Haragopal V.V.** A New Approach Of Solving Single Objective Unbalanced Assignment Problem / Y. Ventepaka, V. V. Haragopal. // American Journal Of Operations Research. – 2016. – P.81-89.
5. **Shah, K., Reddy P.K., Vairamuthu S.** Improvement In Hungarian Algorithm For Assignment Problem / K. Shah, P.K. Reddy, S. Vairamuthu // Artificial Intelligence And Evolutionary Algorithms In Engineering Systems. – 2014. – P.1-8.

**A.Y. Karyagin**

### THE TASK OF APPOINTING EXECUTORS IN PROJECTS WITH THE POSSIBILITY OF PARALLEL TRAINING

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva

**Purpose:** The article is devoted to the review of problems and methods of mathematical optimization.

**Design/ methodology/ approach:** A non-classical algorithm for solving the assignment problem with the possibility of training is presented.

**Findings:** Various types of optimization problems are presented more attention is paid to the assignment problem. Various types of assignment problems and methods for solving them are considered.

**Research limitations/ implications:** Through analysis and comparison, the shortcomings of the classical Hungarian algorithm for solving the non-classical assignment problem in front of the modified algorithm are revealed.

**Originality/ value:** The modified algorithm is more flexible and allows you to solve non-standard types of assignment problems, in particular, with the possibility of implementing a continuing education program for employees.

**Keywords:** mathematical optimization, the assignment problem, the Hungarian method, modified Hungarian method, multi-criteria optimization.

В.Р. Милов<sup>1</sup>, А.Ю. Павлин<sup>2</sup>, Ю.С. Егоров<sup>1</sup>, А.А. Салтыкова<sup>1</sup>, Л.А. Васильева<sup>1</sup>

## СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ТЕКСТА ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ДОКУМЕНТОВ НАЦИОНАЛЬНОЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

<sup>2</sup>Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Работа посвящена описанию методологии автоматизированного анализа текста для сравнения документов национальной нормативной базы по информационной безопасности. Приведены результаты анализа попарного сравнения документов нормативной базы по информационной безопасности.

**Ключевые слова:** анализ текстов, информационная безопасность, поддержка принятия решений.

Система обеспечения кибербезопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами атомной электростанции (АСУ ТП АЭС) основывается на нормативной базе. В данной работе представлен процесс автоматизированного анализа и попарного сравнения текста нормативных документов (приказов ФСТЭК) с целью определения их близости.

В процессе первичного анализа текста выделим следующие задачи:

- 1) структурирование текстового корпуса – выделение документов в корпусе;
- 2) сегментация текста – разделение текста на предложения;
- 3) графематический анализ – выделение слов в предложениях.

### Структурирование текстового корпуса

Решение задачи структурирования исходного текстового корпуса, то есть выделения документов, как правило, не представляет трудностей. Источником анализируемых текстов является набор документов национальной нормативной базы по информационной безопасности: Приказ ФСТЭК №31 от 14 марта 2014 г., Приказ ФСТЭК России № 235 от 21.12.2017, Приказ ФСТЭК России № 239 от 25.12.2017 г. Таким образом, исходный текстовый корпус в данном случае уже определен, и этап структурирования текстового корпуса дополнительно выполнять не требуется.

### Сегментация текста

Сегментация текста заключается в автоматическом выделении предложений в тексте, что требуется для того, чтобы в пределах одной лингвистической единицы выражался единственный класс требований. В простейшем случае сегментация текста осуществляется на основе особых маркеров конца предложения – точки (или многоточия), а также восклицательного и вопросительного знаков.



Во-первых, к перечисленным маркерам добавляется точка с запятой – знак препинания является промежуточным между точкой и запятой по степени смысловой связи разделяемых ими фрагментов текста.

Во-вторых, в сложносочиненных предложениях выделяются простые предложения при условии наличия противительных союзов: *а, но, однако, однако же, все же, зато, а то, не то, хотя*. Если два простых предложения, в которых выражены некоторые требования, связаны противительным союзом, скорее всего, такие предложения будут иметь различия.

В-третьих, большая часть случаев сокращения приходится на следующие варианты: *т. е.* (то есть), *т. к.* (так как), *т. н.* (так называемый), *др.* (другой). При этом точка либо показывает на сокращение слова, либо завершает предложение, либо выполняет одновременно обе эти функции – и завершает предложение и сокращает слово.

## Графематический анализ

Графематический анализ (или токенизация – *tokenization*) подразумевает выделение в тексте отдельных слов. На этапе графематического анализа слова определяются как непрерывные последовательности букв, разделенные любыми другими символами (как правило, пробелами).

Второй этап предварительной обработки текстов после первичного анализа – морфологический анализ, под которым понимается определение грамматических форм и категорий слов.

На этапе морфологического анализа для каждого слова, выделенного в результате первичного анализа, находят его нормальную (словарную) форму и часть речи. Определение нормальной формы позволяет существенно сократить размерность признакового пространства. Распознавание частей речи делает возможным анализировать слова в зависимости от части речи.

Как правило, при морфологическом анализе применяются два основных подхода – словарный и бессловарный. В первом используется словарь основ или словоформ, который для русского языка может быть построен на основе грамматического словаря А.А. Зализняка. Во втором подходе словарь не используется, а морфологический анализ осуществляется либо с помощью списка аффиксов (префиксов, суффиксов, инфиксов), либо на основе машинного обучения и размеченного текстового корпуса. Также распространен гибридный подход.

Морфологический анализ осуществляют специализированные программные средства, которые называются *морфологическими парсерами*. Результатом морфологического анализа может быть либо нормальная (словарная) форма слова (по-другому, лемма – *lemma*), либо основа слова (*stem*), не обязательно совпадающая с морфологическим корнем. В первом случае процедуру анализа называют *лемматизацией* (*lemmatization*), а парсер – *лемматизатором* (*lemmatizer*), во втором случае процедура называется *стеммингом* (*stemming*), а парсер – *стеммером* (*stemmer*).

При морфологическом анализе возникают две ключевые проблемы: незнакомые слова и неоднозначность слов. Если встречается незнакомое слово, предсказывается возможная лемма и грамматические характеристики. Как правило, угадывание осуществляется по аналогии с известными словами. Проблема неоднозначности слов решается либо на основе учета контекста, либо при помощи выбора наиболее частого варианта.

Указанные подходы к интеллектуальному анализу текстов рассматриваются в контексте готовых программных инструментов их реализующих, а также позволяющих в авто-

матическом режиме сравнивать документы нормативной базы по информационной безопасности.

Контекстная диаграмма A0 (рис.1) описывает процесс сравнения документов в нотации IDEF0.

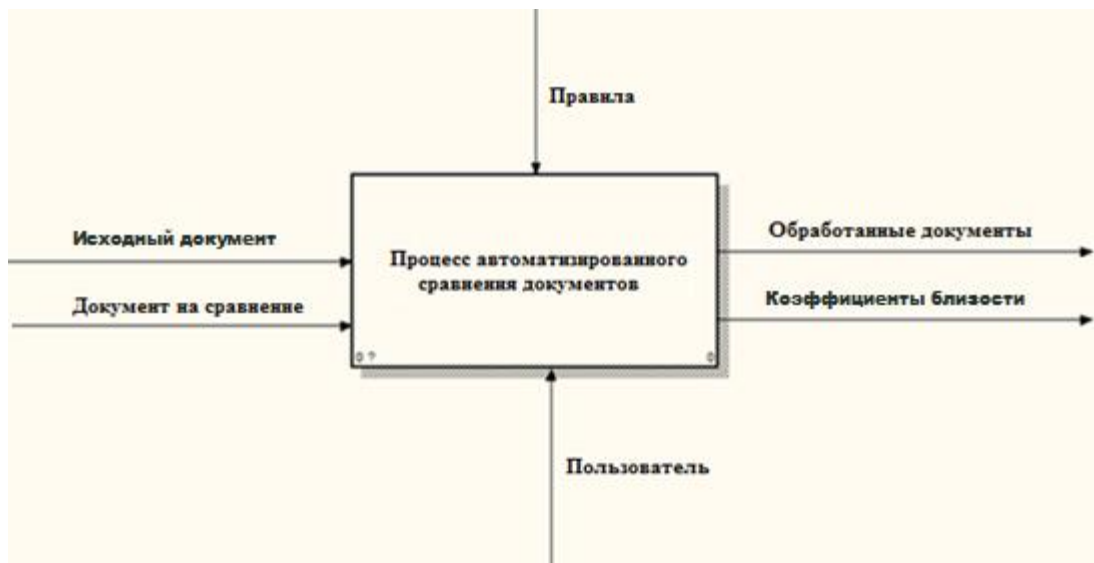


Рисунок 1. Контекстная диаграмма A0 процесса сравнения документов

На вход процесса (процедуры) автоматического сравнения документов подаются текстовые документы. На выходе формируются обработанные документы и коэффициенты близости. Процедура сравнения является несимметричной. Первый документ представляется в виде множества нумерованных пунктов приказа, которые последовательно сравниваются со вторым документом. Диаграмма (рис.2) представляет декомпозицию процесса сравнения документов.

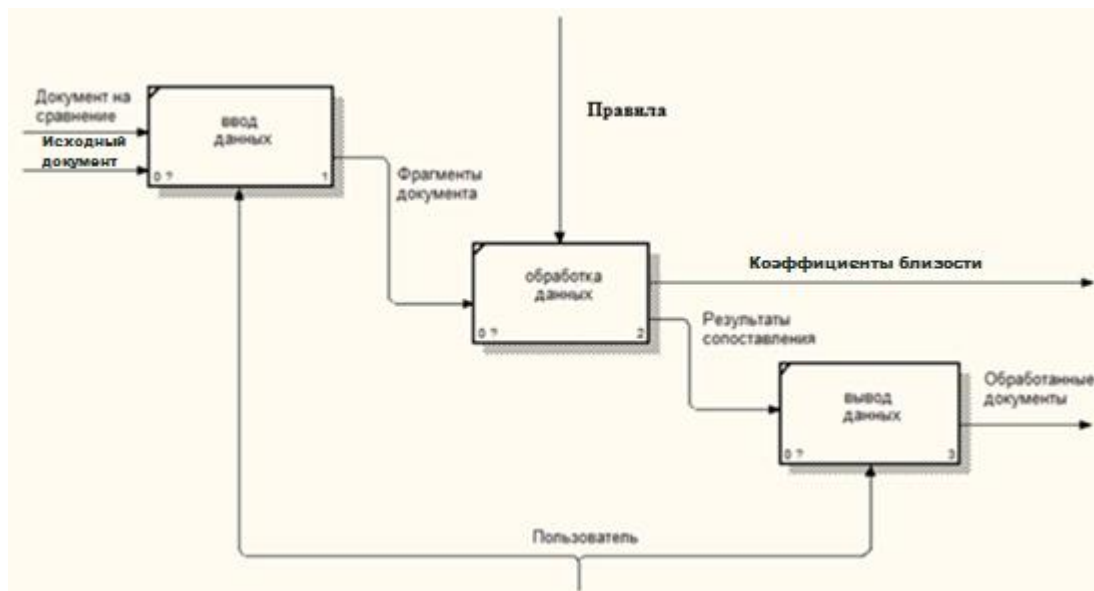


Рисунок 2. Диаграмма декомпозиции A0 процесса сравнения документов

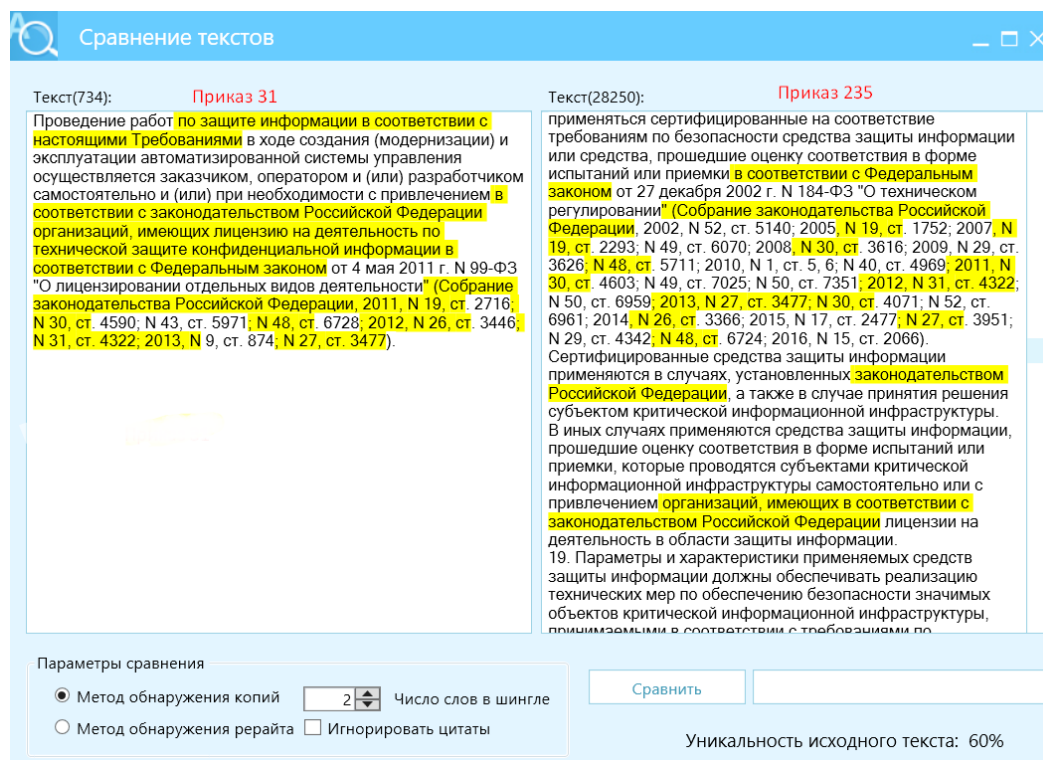
Документы на сравнение поступают в блок ввода данных. В результате формируются разделенные фрагменты документа исходного документа, необходимые для дальнейшего сравнения, которые передаются в блок обработки данных. Фрагменты создаются с использовани-

ем нумерации внутри документа. Пункты могут быть пронумерованы на одном или нескольких уровнях, например, 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3.

В блоке вывода данных формируются обработанные (размеченные) документы.

Попарное сравнение документов национальной нормативной базы по информационной безопасности проводилось с использованием antiplagiarism.net.

Antiplagiarism.net – программный продукт для проверки текста на наличие заимствований из разных источников интернета. Сравнение фрагментов документов выполняется в интерфейсном окне сервиса (рис. 3) с использованием метода обнаружения копий при установленной длине шингла (фрагмента из нескольких последовательных слов текста), равной трем.



**Рисунок 3. Интерфейс окна сравнения текстов документов**

При попарном сравнении документов национальной нормативной базы по информационной безопасности рассчитывались:

- 1) максимальный коэффициент сходства;
- 2) средний коэффициент сходства (по пунктам, имеющим сходство);
- 3) доля пунктов без сходства;
- 4) доля пунктов со слабым сходством;
- 5) доля пунктов с выраженным сходством.

Для определения близости фрагментов документов рассчитывался коэффициент включения

$$K_{\text{вкл}} = \frac{n_{\text{совп}}}{n} \quad (1)$$

где  $n_{\text{совп}}$  – число символов в совпадающих частях текстов,  $n$  – объем фрагмента (пункта) в символах.

Степень сходства между пунктами документов определялась согласно условиям, представленным в табл. 1.

Таблица 1

## Условия определения степени сходства пунктов документов

Условие	Степень сходства	Количество пунктов
$K_{\text{вкл}} = 0$	Нет сходства	$N_{\text{без сход}}$
$K_{\text{вкл}} < b$	Слабое сходство	$N_{\text{слаб сход}}$
$K_{\text{вкл}} \geq b$	Выраженное сходство	$N_{\text{выр сход}}$

Пороговое значение  $b = 0,2$  определено с помощью экспертного оценивания.

На основе попарного сравнения документов национальной нормативной базы по информационной безопасности получены значения количества пунктов без сходства, со слабым сходством и с выраженным сходством, а также доли таких пунктов в составе всего документа.

Таблица 2

## Обобщенные результаты попарного сравнения документов

Показатель	Документы (приказы ФСТЭК)					
	31-235	235-31	31-239	239-31	235-239	239-235
Максимальный коэффициент сходства, %	32%	39,7%	34,2%	37,8%	47,7%	56,6%
Средний коэффициент сходства (по пунктам, имеющим сходство), %	8,3%	21,3%	15,5%	10,2%	31,2%	24,5%
Доля пунктов с выраженным сходством, %	6,1%	48,6%	30,6%	41,8%	91,9%	41,8%
Доля пунктов со слабым сходством, %	32,7%	45,9%	59,2%	49,1%	8,1%	36,4%
Доля пунктов без сходства, %	61,2%	5,4%	10,2%	9,1%	0,0%	21,8%

Результаты сравнения документов (табл. 2) представим в виде ранжирования пар приказов по степени сходства:

1. Приказ ФСТЭК России № 235 и Приказ ФСТЭК России № 239.
2. Приказ ФСТЭК № 31 от 14 марта 2014 г. и Приказ ФСТЭК России № 239.
3. Приказ ФСТЭК № 31 и Приказ ФСТЭК России № 235.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольшая близость содержания выявлена между приказами ФСТЭК № 235 и № 239, а наименьшая – между приказами ФСТЭК № 31 и № 235.

## Библиографический список

1. Грязнухина, Т.А. Синтаксический анализ научного текста на ЭВМ / Т.А. Грязнухина [и др.]. - К.: Научная мысль, 1999. – 77 с.

2. **Jurafsky, D.**, Martin James H. Speech and Language Processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition. Prentice-Hall, 2-nd edition, 2008.–1032 p.

3. **Grimmer, J.**, Stewart B. M. Text as Data: The promise and pitfalls of automatic content analysis methods for political texts // Political Analysis. 2013. Vol. 21, No 3. P. 267–297.

4. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.

5. **Акимов, Н.Н.** Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС / Н.Н. Акимов, В.А. Кольцов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8. С. 7-13.

6. **Акимов, Н.Н.** Элементы концептуальной модели обеспечения кибербезопасности критически важных промышленных объектов / Н.Н. Акимов, В.Р. Милов, Ю.С. Егоров // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ – 2018). – Н. Новгород: НГТУ, 2018. С. 463-467.

**V.R. Milov<sup>1</sup>, A.Y. Pavlin<sup>2</sup>, Y.S.Yegorov<sup>1</sup>, A.A. Saltykova<sup>1</sup>, L.A. Vasilyeva<sup>1</sup>**

## **METHOD FOR AUTOMATED TEXT ANALYSIS FOR COMPARING DOCUMENTS OF THE NATIONAL REGULATORY BASE ON INFORMATION SECURITY**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

<sup>2</sup>Branch of «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» (RFNC-VNIIEF)  
«NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»

The work is devoted to the methodology of automated text analysis for comparing documents of national and foreign regulatory framework on affordable security. The results of the analysis of pairwise comparison of documents of the national regulatory framework on affordable security are presented.

**Keywords:** text analysis, information security, decision support.

А.А. Поликарпова, Н.А. Калинина

## РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТЕНТА НА ОСНОВЕ ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

В статье рассматривается использование специального метода формирования целевого контента, основанного на задаче о рюкзаке 0-1 и дополнительного упорядочения полученной выборки, в качестве способа повышения эффективности информационно-справочных систем. Для тестирования и демонстрации работы предложенного метода разработан прототип информационно-справочной системы.

**Ключевые слова:** информационная система, информационно-справочная система, контент информационно-справочной системы.

### Введение

Главной целью любой информационно-справочной системы (ИСС) является удовлетворение информационной потребности пользователя. Действующие системы успешно с этим справляются, в ответ на большинство поисковых запросов человек получает большое число различных файлов, документов, статей. Однако в современном динамично развивающемся мире стала наблюдаться проблема нехватки у людей времени на обработку и освоение всей полученной информации. Одной из главных причин здесь является слабая структурированность или её отсутствие в результатах поиска. Человек в большинстве случаев не способен по первому взгляду на незнакомый документ определить, сколько времени он потратит на изучение и усвоение полученного материала, и насколько предложенный материал соответствует поставленным целям.

Принимая во внимание описанные ранее аспекты работы человека с информационными элементами (ИЭ) (файлы, документы и тому подобное), предлагается расширить процедуру представления результатов поиска в информационно-справочной системе за счет внедрения специального метода формирования целевого контента (контента ИСС, соответствующего цели пользователя, представленной в виде поискового запроса).

В основу предлагаемого метода положена идея «задачи о рюкзаке 0-1»: в роли «рюкзака» выступает целевой контент ИСС, в качестве множества предметов, которые необходимо поместить в рюкзак, - результаты процедуры поиска (информационные элементы, удовлетворяющие поисковому запросу, имеют свою ценность для достижения поставленной цели (стоимость) и трудоемкость освоения (объем или вес)). Целевая функция задачи о рюкзаке такого вида – максимизация ценности полученного в результате поиска целевого контента при соблюдении установленного ограничения (общая трудоемкость материалов).

Математическая постановка задачи [1]: даны  $N$  информационных элементов (результаты процедуры поиска), для каждого из которых определен вес (трудоемкость освоения предложенной информации)  $w_n$  и ценность  $p_{nm}$  достижения  $m$ -ой цели, где  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ . Ограничение на суммарную трудоемкость отобранных ИЭ в целевой контент задаётся допус-

тимым весом  $W$ . Каждый файл может быть взят не более одного раза. Необходимо максимизировать ценность полученного в результате поиска целевого контента

$$z_m = \sum_{n=1}^N P_{nm} x_n$$

соблюдая установленное ограничение

$$\sum_{n=1}^N w_n x_n \leq W$$

где

$$x_n = \begin{cases} 1, & \text{если ИЭ взят} \\ 0, & \text{если не взят} \end{cases}$$

### Выбор метода решения «задачи о рюкзаке»

При выборе метода решения рассматривались четыре альтернативы: полный перебор, метод ветвей и границ, динамическое программирование и жадный алгоритм.

**«Полный перебор»** относится к точным методам решения. Основная идея: перебор всех возможных вариантов заполнения рюкзака. Реализация такого подхода строится с использованием рекурсии. Временная сложность алгоритма равна  $O(N!)$ . Поэтому главным и существенным недостатком данного метода является невозможность работать с большим количеством информационных элементов [2].

**Метод ветвей и границ** похож на «полный перебор». Отличие и преимущество данного метода заключается в том, что заведомо неоптимальные ветви исключаются. Недостаток: эффективность применения метода ветвей и границ существенно зависит от входных данных. Подход целесообразно применять только при значительном расхождении удельных ценностей предметов [3].

Суть **динамического программирования**: оптимальное решение на  $i$ -ом шаге находится исходя из найденных ранее оптимальных решений на предшествующих шагах [4]. Достоинства метода: дает точное решение, в процессе получения которого одновременно вычисляются решения для всех размеров рюкзака от 1 до  $W$ . Недостатки: данный метод требует использования дополнительной памяти  $O(N*W)$  ( $N$  - количество рассматриваемых предметов); временная сложность алгоритма порядка  $O(N*W)$ .

**Жадный алгоритм**. Основная идея: вещи сортируются по их удельной ценности (то есть отношению ценности предмета к его весу), затем предметы с наибольшей удельной ценностью помещаются в рюкзак. Достоинство метода – временная сложность данного алгоритма:  $O(N \log N)$  при необходимости сортировки и  $O(N)$  при уже отсортированных данных [5]. Недостаток – может быть получен результат далекий от оптимального.

На основе сравнительного анализа четырех методов решения задачи о рюкзаке 0-1 было принято решение использовать жадный алгоритм. При выборе алгоритма учитывалось: вес предмета (информационного элемента) – трудоемкость освоения, измеряемая в часах (рекомендуется использовать вещественный тип числа); требуется высокая скорость выполнения операции; предполагается работа с большим количеством документов; абсолютная точность решения не требуется.

## Алгоритм работы метода формирования целевого контента ИСС

Входные данные: список файлов, удовлетворяющих поисковому запросу; ограничение на суммарную трудоемкость целевого контента.

Выходные данные: целевой контент.

### Алгоритм

1. Вычисление для каждого файла из результатов поиска его удельной ценности (отношение показателя полезности данного элемента для достижения поставленной цели к его трудоемкости). Показатели полезности хранятся в матрице полезностей (рис. 1 – таблице, строки которой соответствуют информационным элементам, столбцы – целям поиска в ИСС, а ячейки на пересечении строк и столбцов – степени важности (полезности) ИЭ для достижения выбранной цели. Степень полезности материала (значение принадлежит отрезку  $[0,1]$ , где 0 – не имеет ценности для данной цели, 1 – очень важен) и трудоемкость освоения (измеряется в часах) оцениваются экспертами.

	J1	J2	J3
▶ 1	0,35	0,45	0
2	0	0,2	0
3	0	0,4	0
4	0	0,5	0
5	0	0,8	1
6	0	0	0,75
7	0	0	0,75
8	0	0,7	1
9	0,5	0,75	0
10	0,75	0	0
11	0,5	0,8	0
12	0,8	0	0
13	0,95	0	0
14	1	0	0
15	0,65	0	0
16	0,5	0,7	0
17	0,6	0,7	0
18	0,95	0	0
19	0,55	0	0

Рисунок 1. Матрица полезностей

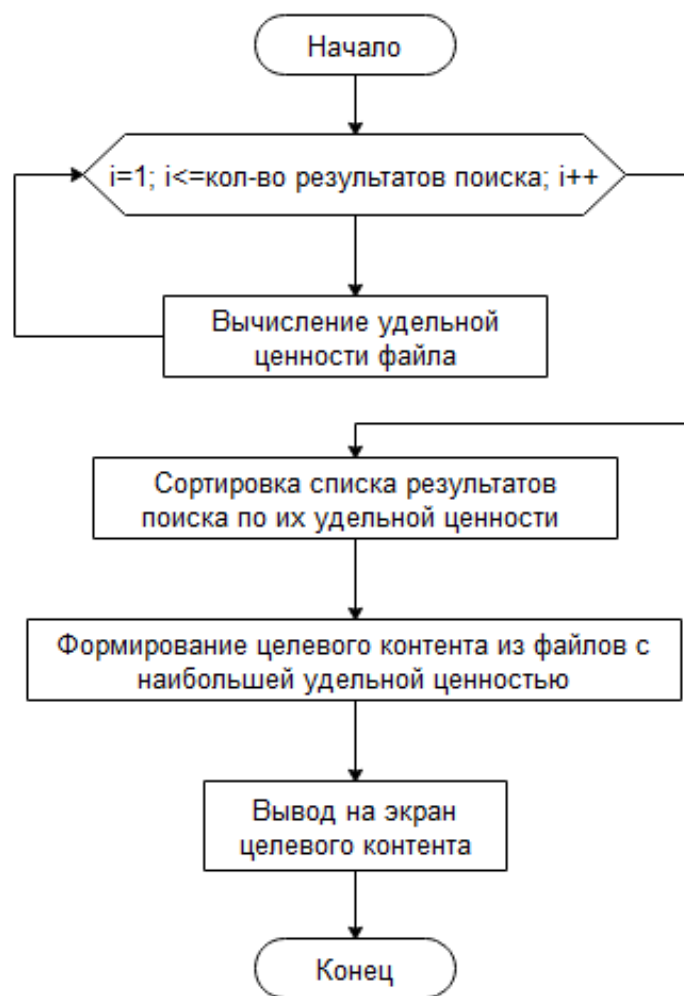
2. Сортировка списка результатов поиска по удельной ценности файлов.
  3. Наполнение целевого контента файлами с наибольшей удельной ценностью до тех пор, пока не будет достигнуто ограничение на общую трудоемкость (или не закончатся файлы).
  4. Вывод целевого контента на экран.
- Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

### Сравнение результатов работы ИСС с применением метода формирования целевого контента и без него

Пример поискового запроса: «основы» (основы работы в AutoCAD).

Результаты поиска по запросу «основы» в ИСС, не использующей предложенный метод формирования целевого контента (рис. 3), – 12 документов общей трудоемкостью 16,25 ч.





**Рисунок 2. Блок-схема алгоритма работы метода формирования целевого контента ИСС**

В обновленной версии ИСС применяется разработанный прототип метода формирования целевого контента, в котором предусмотрен учет ценности каждого документа для достижения поставленной цели, а также устанавливается ограничение на суммарную трудоемкость информационных элементов (по умолчанию – 7,75 ч., пользователь может установить свое значение (рис. 4)).

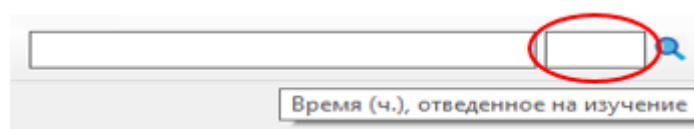
Результаты поиска по запросу «основы» в обновленной ИСС, использующей метод формирования целевого контента (рис.5), – 7 документов общей трудоемкостью 7,75 ч.

Сравнение результатов показало, что были отсечены документы – «Слой чертежа», «Назначение свойств объектам и слоям», «Блоки в AutoCAD», «Лист чертежа», «Создание примечаний». Действительно, данные документы хотя и относятся к основам работы в AutoCAD, но необходимы для более детальной работы с чертежом, поэтому для «новичка» на первых этапах освоения AutoCAD они не обладают большой важностью, но требуют много времени на изучение.

Итоговые результаты выводятся в порядке их эффективного восприятия за счет наличия семантических связей между информационными элементами и реализации алгоритма Демукрона (алгоритм топологической сортировки) на фрагменте сети знаний. Сеть знаний (орграф, вершинами которого являются материалы, с которыми работает система, а дугами – связи между ними) представлена в вид матрицы смежности [6].

ID	Имя файла	Папка	Ключевые слова
14	Основы работы с ин...	Основы работы ...	основы, ин
15	Панорамирование и...	Основы работы ...	основы, па
18	Создание базовых г...	Основы работы ...	основы, кр
12	Настройка точности...	Основы работы ...	основы, по
17	Слой чертежа.docx	Основы работы ...	основы, сл
10	Назначение свойст...	Основы работы ...	основы, св
13	Основные операции...	Основы работы ...	основы, ре
1	Блоки в AutoCAD.docx	Основы работы ...	основы, чер
9	Лист чертежа.docx	Основы работы ...	основы, чер
19	Создание примечан...	Основы работы ...	основы, пр
11	Нанесение размеро...	Основы работы ...	основы, ра
16	Распечатывание че...	Основы работы ...	основы, пе

**Рисунок 3. Результаты поиска в ИСС без встроенного метода формирования целевого контента. Запрос - "основы"**



**Рисунок 4. Поле ввода общей трудоемкости**

ID	Имя файла	Папка	Ключевые слова	Путь	Трудоемкость, ч.
14	Основы работы ...	Основы работы ...	основы, интерф...	Документация\...	1
15	Панорамирован...	Основы работы ...	основы, панора...	Документация\...	0,25
18	Создание базов...	Основы работы ...	основы, круг, п...	Документация\...	2
12	Настройка точн...	Основы работы ...	основы, постро...	Документация\...	1,25
13	Основные опер...	Основы работы ...	основы, редакт...	Документация\...	1,5
11	Нанесение раз...	Основы работы ...	основы, размер...	Документация\...	0,75
16	Распечатывани...	Основы работы ...	основы, печать,...	Документация\...	1

**Рисунок 5. Результаты поиска по запросу «основы» в обновленной ИСС**

### Заключение

Тестирование прототипа ИСС, в котором реализован метод формирования целевого контента, показало, что результаты поиска в системе стали содержать наиболее полезный материал, который можно изучить за отведенное на обучение время. Временных задержек в работе системы в результате внедрения метода не выявлено. На данном этапе использование «жадного алгоритма» оправдало себя.

### **Библиографический список**

1. **Поликарпова, А.А.** Формирование целевого контента информационно-справочных систем / А.А. Поликарпова, Н.А. Калинина // Информационные системы и технологии - 2019: [Электронный ресурс]: сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции—Электрон. дан. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, 2019. –1 электрон. диск (CD-ROM) – С. 363-366
2. **Окулов, С.М.** Программирование в алгоритмах [текст] / С.М. Окулов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002. – 341 с.
3. **Бурков, В.Н.** Прикладные задачи теории графов [текст] / В.Н. Бурков, И.А. Горгидзе, С.Е. Ловецкий; под ред. А.Я. Горгидзе – Тбилиси: Вычислительный центр АН СССР, 1974. – 231 с.
4. Задача о рюкзаке // Википедия - свободная энциклопедия. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача\\_о\\_рюкзаке](https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_о_рюкзаке)
5. **Кузюрин, Н.Н.** Сложность комбинаторных алгоритмов. Курс лекций / Н.Н. Кузюрин С.А. Фомин. –2005. 79с.
6. **Поликарпова, А.А.** Процедуры представления контента информационно-справочных систем предприятий / А.А. Поликарпова, Н.А. Калинина // Будущее технической науки: сборник материалов XVII Международной молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. – Нижний Новгород, 2018. – 360 с. – С. 63-64

**A. A. Polikarpova, N. A. Kalinina**

### **THE INFORMATION REFERRAL SYSTEMS PROTOTYPE DEVELOPMENT USING THE CONTENT FORMING METHOD ON BASE OF THE KNAPSACK PROBLEM**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

This article is devoted to the consideration of the possibility of using a special method of forming target content as a way to increase the effectiveness of information referral systems. The proposed method is based on the idea of a “0-1 knapsack problem”. As an algorithm for solving this problem, the "greedy algorithm" is chosen. The implementation of the considered method will maximize the value of the target content, subject to the restriction on the overall complexity of the materials.

**Key words:** information system, information referral system, content of information referral system.

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Представлен сравнительный анализ эффективности алгоритмов машинного обучения. Рассмотрены несколько алгоритмов машинного обучения: линейная регрессия, логистическая регрессия, наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов, метод  $k$ -средних. Рассмотрены принципы их работы, сферы применения, скорость обучения, точность прогноза, эффективность.

**Ключевые слова:** машинное обучение, метод  $k$ -средних, метод главных компонент, логистическая регрессия, линейная регрессия.

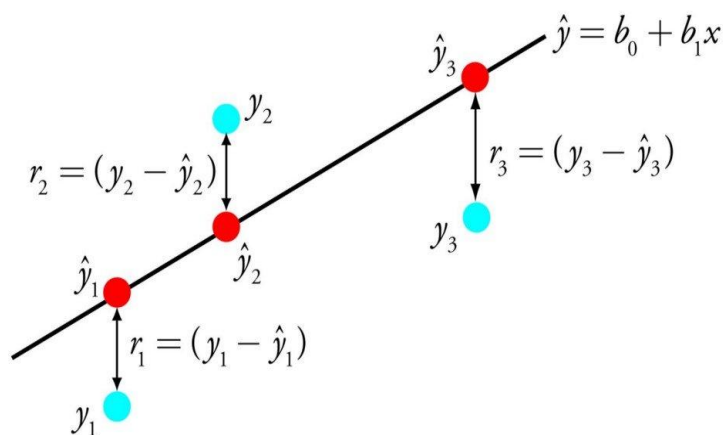
### Введение

Машинное обучение — процесс, в результате которого машина (компьютер) способна показывать поведение, которое в нее не было явно заложено (запрограммировано) [1]. Главной задачей машинного обучения является автоматическое определение взаимосвязей между наблюдаемыми и скрытыми переменными объекта, с тем, чтобы для произвольного объекта по его наблюдаемым компонентам можно было оценить возможные значения скрытых компонент. Машинное обучение работает с объектами — элементарными единицами данных, естественным образом, возникающими в конкретных задачах, которые характеризуются наблюдаемыми переменными и скрытыми переменными, принимающими значения из некоторых заранее известных множеств. Цель машинного обучения — научить машину (точнее, программу) решать задачу, предъявив ей несколько примеров (с правильными и неправильными решениями). Цель человека — извлечь полезную информацию из данных, например, выявить скрытые закономерности и взаимосвязи. В машинном обучении применяются различные алгоритмы, причём определённые алгоритмы считаются достаточно многофункциональными. Нет такого алгоритма, который был бы лучшим выбором для каждой задачи. Нельзя сказать, что нейронные сети всегда работают лучше, чем деревья решений, и наоборот. На эффективность алгоритмов влияет множество факторов: размер; структура набора данных. В данной работе будут рассмотрены различные алгоритмы машинного обучения, их эффективность для различных классов задач.

### Линейная регрессия

Линейную регрессию [4] можно представить в виде уравнения, которое описывает прямую, наиболее точно демонстрирующую взаимосвязь между входными переменными  $X$  и выходными переменными  $Y$ . Для составления этого уравнения нужно найти определённые коэффициенты  $B$  для входных переменных. На рис. 1 показан общий вид графика линейной регрессии. Линейная регрессия — пожалуй, один из наиболее известных и понятных алгоритмов в статистике и машинном обучении.

Для оценки регрессионной модели используются различные методы линейной алгебры или метода наименьших квадратов. Чтобы модель была наиболее точной необходимо убрать похожие (коррелирующие) переменные и избавиться от шума в данных, если это возможно.

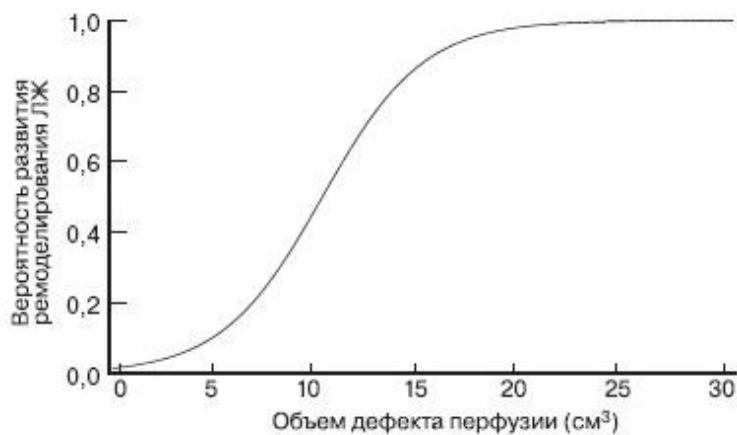


**Рисунок 1. Функция линейной регрессии**

### Логистическая регрессия

Логистическая регрессия — один из алгоритмов, пришедший в машинное обучение из статистики. Данный метод можно использовать для задач бинарной классификации.

Данный алгоритм можно отнести к сильным статистическим методам расчёта вероятности возникновения определённого события с одной или несколькими независимыми переменными. Логистическая регрессия определяет уровень связи среди категориальной зависимой и одной либо некоторыми самостоятельными переменными путём применения логистической функции, являющейся аккумулятивным логистическим распределением. Используют данный алгоритм при измерении показателей результативности маркетинговых кампаний; вычислении возможности возникновения землетрясения в определённый день; оценке кредитоспособности лица; предсказании доходов с конкретного продукта.



**Рисунок 2. Модель логистической регрессии**

Логистическая регрессия похожа на линейную тем, что в ней тоже требуется находить значения коэффициентов для входных переменных. А разница кроется в том, что выходное значение изменяется с помощью нелинейной или логистической функции. На рис. 2 изображена модель логистической регрессии[3].

Как и в случае с линейной регрессией, логистическая регрессия выполняет свою задачу лучше, если убрать лишние и похожие переменные. Модель логистической регрессии быстро обучается и хорошо подходит для задач бинарной классификации.

### Наивный байесовский классификатор

Наивный Байес (Naïve Bayes) состоит из двух типов вероятностей, которые рассчитываются с помощью тренировочных данных:

1. Вероятность каждого класса.
2. Условная вероятность для каждого класса при каждом значении  $x$ .

После расчёта вероятностной модели её можно использовать для предсказания с новыми данными при помощи теоремы Байеса. Если у вас вещественные данные, то, предполагая нормальное распределение, рассчитать эти вероятности не составляет особой сложности.

Наивный Байес называется наивным, потому что алгоритм предполагает, что каждая входная переменная независима. Это сильное предположение, которое не соответствует реальным данным. Тем не менее, данный алгоритм весьма эффективен для целого ряда сложных задач вроде классификации спама или распознавания рукописных цифр.

Если брать во внимание, что алгоритм основан на теореме Байеса, наивный байесовский классификатор можно использовать, только если признаки независимы. Предполагается, что наличие какого-либо признака в классе не связано с наличием какого-либо другого признака. Даже если признаки зависят друг от друга или от других признаков, они вносят вклад в вероятность определения объекта [2]. В связи с таким допущением алгоритм называется «наивным». Определение наиболее вероятного образа из двух возможных является классической задачей байесовского классификатора (рис.3).

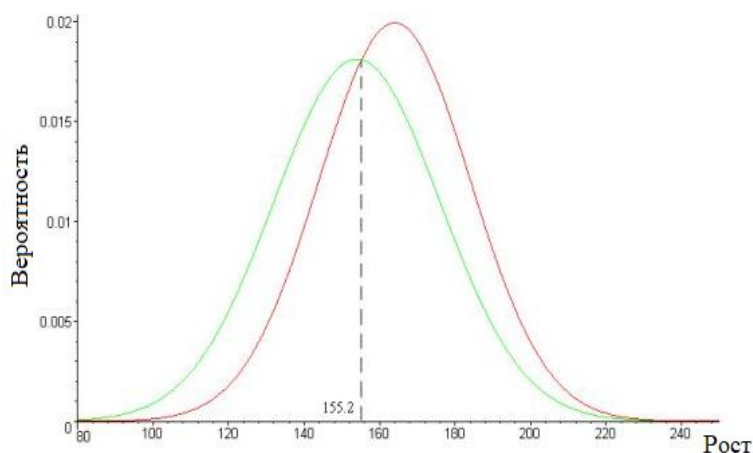


Рисунок 3. Модель байесовского классификатора

Таким образом, теорему Байеса можно использовать в областях, связанных с объединением новостных статей по их тематике, обнаружением нежелательных писем в электронной почте и программном обеспечении для распознавания лиц.

## Метод опорных векторов

Метод опорных векторов (Support Vector Machine) применяется для решения задач, связанных с классификациями объектов. Каждый объект (набор его данных - вектор) в пространстве относится к одному из двух predetermined классов. Метод опорных векторов, вероятно, один из наиболее популярных и обсуждаемых алгоритмов машинного обучения.

Гиперплоскость — это линия, разделяющая пространство входных переменных (рис.4). В методе опорных векторов гиперплоскость выбирается так, чтобы наилучшим образом разделять точки в плоскости входных переменных по их классу: 0 или 1. В двумерной плоскости это можно представить как линию, которая полностью разделяет точки всех классов. Во время обучения алгоритм ищет коэффициенты, которые помогают лучше разделять классы гиперплоскостью.

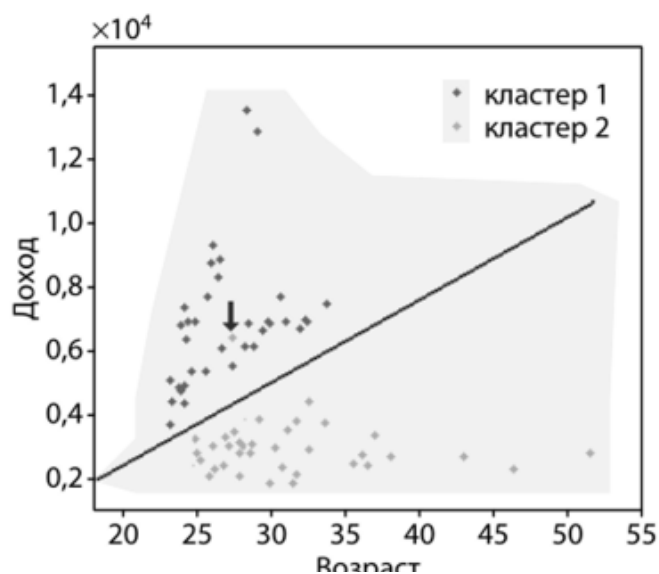


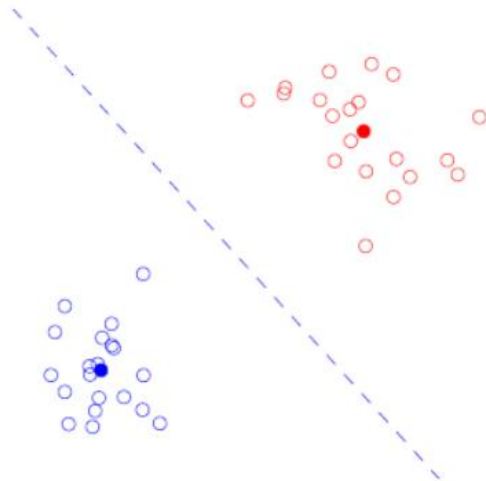
Рисунок 4. Гиперплоскость и входные переменные

Метод опорных объектов может решать большое количество задач, но из числа глобальных можно выделить вопросы, связанные с распознаванием параметров человека по фотографии и отображением рекламных баннеров на интернет-ресурсах. Немаловажную роль данный метод сыграл при процессах относящихся к человеческой ДНК. Метод опорных векторов – один из самых эффективных классических классификаторов, на который стоит обратить внимание.

## Метод $k$ -средних

Метод относится к технике кластерного анализа. Учитывает набор данных в виде векторов, создает кластеры точек на основе расстояний между ними. Основная идея алгоритма заключается в том, что вектора произвольно разбиваются на кластеры, после чего итеративно перемещаются центры кластеров, а затем вектора разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике (рис.5).

Метод  $k$ -средних применяется в большом количестве сфер, из которых можно выделить медицину, распознавание изображений и речи, определение наиболее посещаемых мест.

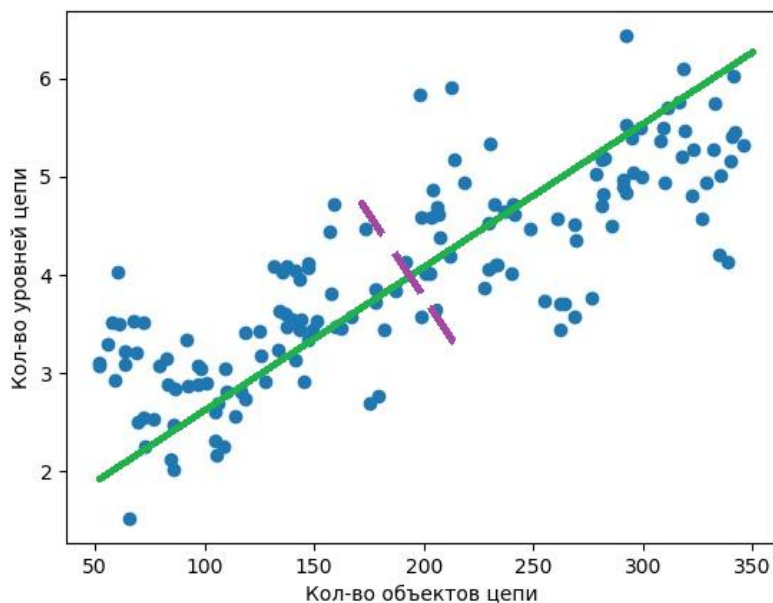


**Рисунок 5. Иллюстрация метода  $k$ -средних**

### **Метод главных компонент**

Метод главных компонент (Principal Component Analysis) считается статистическим, потому что использует ортогональное преобразование для конвертации группы исследований за коррелированными переменными в группу значений линейно некоррелированных переменных, называемых главными компонентами. Для облегчения обучения и визуализации алгоритм содержит упрощение данных.

Алгоритм используется во многих областях, в таких как компьютерное зрение, сжатие данных, распознавание объектов. Для плохо упорядоченных данных этот алгоритм не подходит. На рис. 6 изображен график применения метода главных компонент для определения надежности оценки цепей поставок.



**Рисунок 6. График метода главных компонент**



Результат сравнения эффективности рассмотренных алгоритмов машинного обучения приведен в таблице.

### Сравнительный анализ эффективности алгоритмов машинного обучения

Название алгоритма	Скорость обучения	Точность прогноза	Настройка параметров	Эффективность
Линейная регрессия	Быстрая	Хорошая	Нет	Показывает высокий результат, если убрать похожие переменные и избавиться от шума в данных
Логистическая регрессия	Быстрая	Хорошая	Нет	Выполняет поставленную задачу лучше, если убрать лишние и похожие переменные
Наивный Байесовский классификатор	Быстрая	Хорошая	Несколько. Параметры создаются и задаются программистом в зависимости от полученных данных	Оптimalен в широком классе задач. Учитывает только индивидуальное влияние входных переменных
Метод опорных векторов	Низкая	Хорошая	Минимум	Особенно полезен при больших наборах данных
Метод $k$ -средних	Низкая	Хорошая	Минимум	Существенно искажает результат при наличии шума в наборе данных
Метод главных компонент	Медленная	Высокая	Минимум	Понижение размерности при больших объемах данных

### Выводы

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов машинного обучения показывает, что самыми быстрыми по скорости обучения являются следующие алгоритмы: логистическая регрессия; наивный Байес; линейная регрессия. Высокую точность прогноза показывает метод главных компонент. Для задач, где нужно задать много параметров, лучше использовать наивный Байес.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. **Chang, S.**, Cohen T., Ostdiek B. What is the machine learning / Chang S., Cohen T., Ostdiek B. // Physical Review D. 2018. Т. 97. № 5. С. 054024.
2. **Kumar, N.K.**, Al Mamun A., Savitha R. Ocean wave height prediction using ensemble of extreme learning machine/ Kumar N.K., Al Mamun A., Savitha R. // Neurocomputing. 2018. Т. 277. С. 12-20.
3. **Китов, В.** Практические аспекты машинного обучения // Открытые системы. СУБД. 2016. № 1. С. 14-17.

4. Жуков, Д.А. Задачи обеспечения эффективности машинного обучения при диагностике технических объектов / Жуков Д.А., Клячкин В.Н. // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. № 10. С. 172-174.

5. Голошапова, И.О. Оценка инфляционных ожиданий российского населения методами машинного обучения / Голошапова И.О., Андреев М.Л. // Вопросы экономики. 2017. № 6. С. 71-93.

**K.S. Romanov, N.E. Posobilov**

## **COMPARISON OF EFFICIENCY OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS**

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva

The article is devoted to comparing the effectiveness of machine learning algorithms. The paper considers several machine learning algorithms such as the k-means method, the decision tree, the principal component method, logistic regression, the Naive Bayes classifier, the support vector method, and linear regression. Each of these algorithms is considered in detail. They also examined the principles of their work, the scope, training speed, accuracy of the forecast, the possibility of task parameters, their effectiveness.

**Keywords:** machine learning, k-means method, principal component method, logistic regression, linear regression.

А.А. Салтыкова

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕМЕ  
«АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ СИНТАГМ  
ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА С УЧЕТОМ СИНТАКСИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Статья посвящена моделированию объекта исследования по теме «Автоматизация определения семантической близости синтагм естественного языка с учетом синтаксических связей». В фокусе изучения методы моделирования, применимые к сфере анализа словосочетаний средствами информационных технологий. В статье представлена диаграмма концептов предметной области и построена модель IDEF0 с декомпозицией, демонстрирующей структуру и потоки данных основных блоков модуля анализа синтагм.

**Ключевые слова:** синтагма, дистрибутивная семантика, модель, естественный язык.

В условиях современного развития информационных технологий и лавинообразного роста объема информации остро встает вопрос о ее обработке, об извлечении полезной информации, улучшении информационного поиска и т.д. Принимая во внимание глобализацию научных исследований, экономического взаимодействия и, по сути, всех сфер деятельности человека, возрастает спрос на быстрый и качественный машинный перевод текстов одного языка на другой. Распознавание речи, генерирование текста, системы антиплагиата требуют обработки текста, определения семантической, синтаксической, морфологической близости фраз. В современных условиях, безусловно, все эти процессы требуют автоматизации.

Обработка естественного языка – комбинированное направление информационных технологий и математической лингвистики. Со стороны информационных технологий, как правило, исследователями указывается использование искусственного интеллекта и алгоритмов для анализа и синтеза текста применительно к пониманию текста и генерации грамотного текста.

Обработкой текста естественного языка и автоматизацией обработки занимаются многие российские исследователи (Н. Аюшеева [1], М. Ковалев, В.А. Крайванова, Е.Н. [2] Крючкова, В.П. Клочков [13], Г.Р. Рыбакова, Н.О. Васильева, Т.В. Малкова, И.В. Кротова, Диковицкий, В.В. [3],[4] и др.). Данной тематике посвящены многочисленные статьи зарубежных ученых (Li Gao, Kun Dai, Liping Gao, Tao Jin, Andrii Biloshchytskyi, Alexander Kuchansky, Svitlana Biloshchytska, Anastasiia Dubnytska, N. Peter Whitehead, William T. Scherer, Michael C. Smith, Qianli Ma, Liuhong Yu, Shuai Tian, Enhuan Chen, Wing W. Y., Ankur Agarwal, Christopher Baechle, Ravi Behara, Xingquan Zhu и др.). По отдельным аспектам данной тематики защищены диссертации (Ю.А. Орлова [5], Е.В. Котельников [6], Е.В. Полицына, А.З. Панкратова, Ю.Н. Петрова [7], И.В., Оборотнева, В.Л. Бердник [8], С.А. Холодова, А.В. Филиппова, К.О. Сбойчаков [9] и др.).

И, тем не менее, тема не теряет своей актуальности, поскольку практическая разработанность ее еще не исчерпана. Основные сферы ее применения – сравнение новостного контента, определение близости контента, системы антиплагиата, электронные словари-



Графическим представлением этих моделей служат блок-схемы. Показательный пример функциональной модели – IDEF0.

Структурная модель представляет последовательность и состав стадий и этапов работы. Ее графическое представление, в частности, блок-схемы. В определенном смысле, диаграмма концептов предметной области исследования – информационная и структурная модель. Таким образом, для моделирования схемы анализа синтагм естественного языка применимы информационный, структурный и функциональный тип моделирования.

Первоначально на этапе моделирования целесообразно определиться с основными понятиями предметной области, что было осуществлено в виде диаграммы концептов (рис.1). Это позволит правильно оценить возможную структуру и процессы, которые будут происходить в системе.

Далее на основе понятий предметной области целесообразно осмыслить структуру системы и функционирование модулей системы.

Таким образом, цели моделирования выглядят следующим образом:

- определение основных понятий предметной области;
- определение основных модулей, к которым эти понятия и связанные с ними процессы будут относиться;
- определение функционирования системы – направление информационных потоков (входящих, исходящих, управляющих) и происходящих процессов.

Язык описания модели – прежде всего, графический язык диаграмм. Это и диаграмма концептов, и IDEF0 схема, дающие преимущество наглядности.

Требования к модели, носящие принципиальный и универсальный характер:

- целенаправленность;
- адекватность;
- универсальность;
- экономичность;
- наглядность;
- управляемость;
- доступность для исследования или воспроизведения;
- адаптивность, способность к эволюции.

При создании и разработке информационных систем используются CASE-средства. Это инструмент, который позволяет автоматизировать процесс разработки информационной системы и программного обеспечения. Часто сфера применения CASE-средств – разработка и создание информационных систем управления предприятием, однако для целей данного исследования данный класс программных продуктов также применим, поскольку он позволяет «выделять процессы, анализировать их, определять взаимосвязи элементов процессов, оптимизировать их структуру» [12].

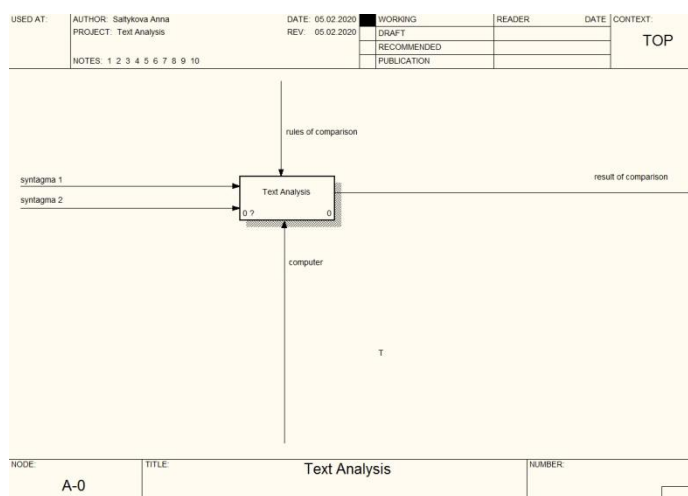
Основными характеристиками CASE-средств, важными с точки зрения моделирования и оптимизации процессов, являются следующие [12]:

- наличие графического интерфейса,
- наличие репозитория,
- гибкость применения,
- возможность коллективной работы,
- построение прототипов,
- построение отчетов.

Для представления схемы анализа синтагм естественного языка в виде потоков данных и процессов представляется удобным пакет моделирования VPwin (AllFusion Process Modeler). VPwin – мощный инструмент моделирования. Модель, созданная средствами VPwin, позволяет четко документировать различные аспекты анализа текста – действия, которые необходимо предпринять, способы их осуществления, требующиеся для этого ресурсы и др. Таким образом, формируется целостная картина деятельности.

Действенным инструментом разработки является модель процессов IDEF0 дающая четкое представление о физических и информационных потоках в системе, взаимозависимости процессов. Декомпозиция любого блока дает представление об уровнях вложенности, сложности каждого блока. Такое наглядное представление позволяет проектировщику оценить все входные и выходные потоки, подключить их к соответствующему блоку и не потерять при проектировании.

Применительно к данному исследованию, модель процессов IDEF0 будет выглядеть следующим образом (рис. 2).



**Рисунок 2. Модель IDEF0. Верхний уровень**

**A-0 – модуль анализа синтагмы.** Данная диаграмма отображает самый обобщенный верхний уровень функционирования системы.

**Потоки входящих данных** – две сравниваемые синтагмы.

**Потоки исходящих данных** – результат сравнения.

**Управляющие потоки данных** – правила сравнения.

**A0 – Диаграмма декомпозиции.** Диаграмма декомпозиция включает в себя четыре блока (рис.3): лемматизация, дистрибутивная семантика, синтаксический анализ, определение сходства фраз.

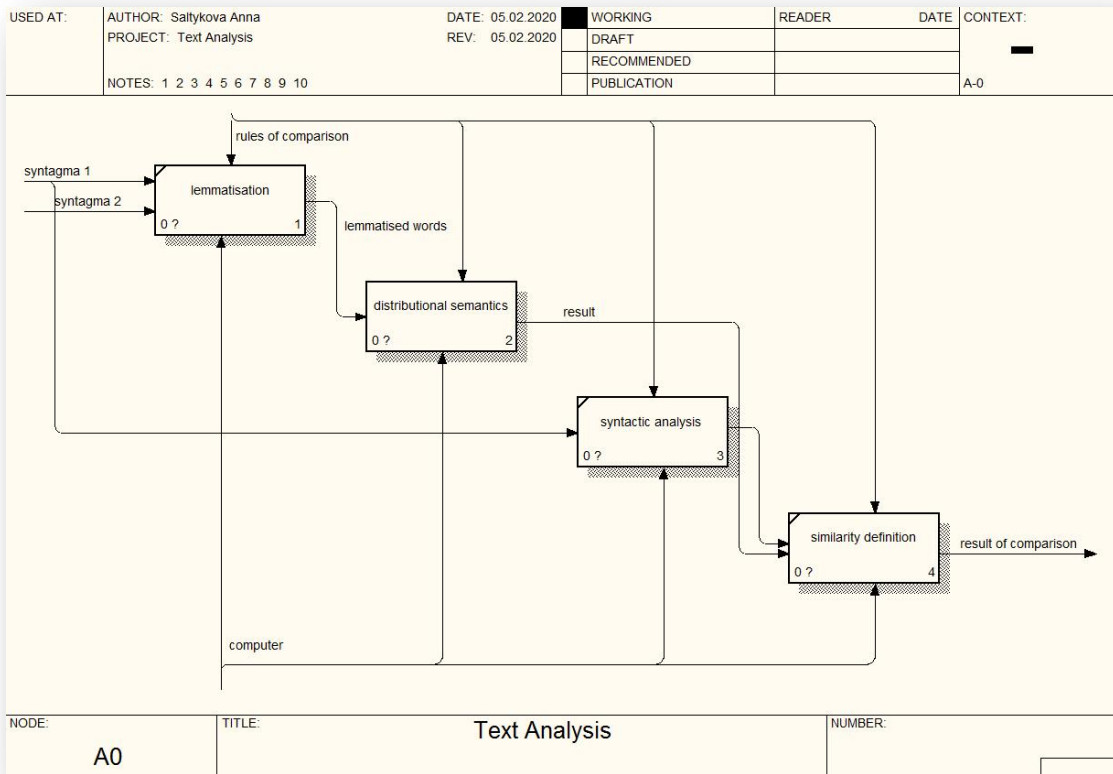
Каждый блок декомпозиции представляет собой отдельный модуль анализа текста. Модуль дистрибутивной семантики декомпозируется, в свою очередь, на два блока (рис.4):

- создание контекстных векторов и
- определение косинусной меры близости.

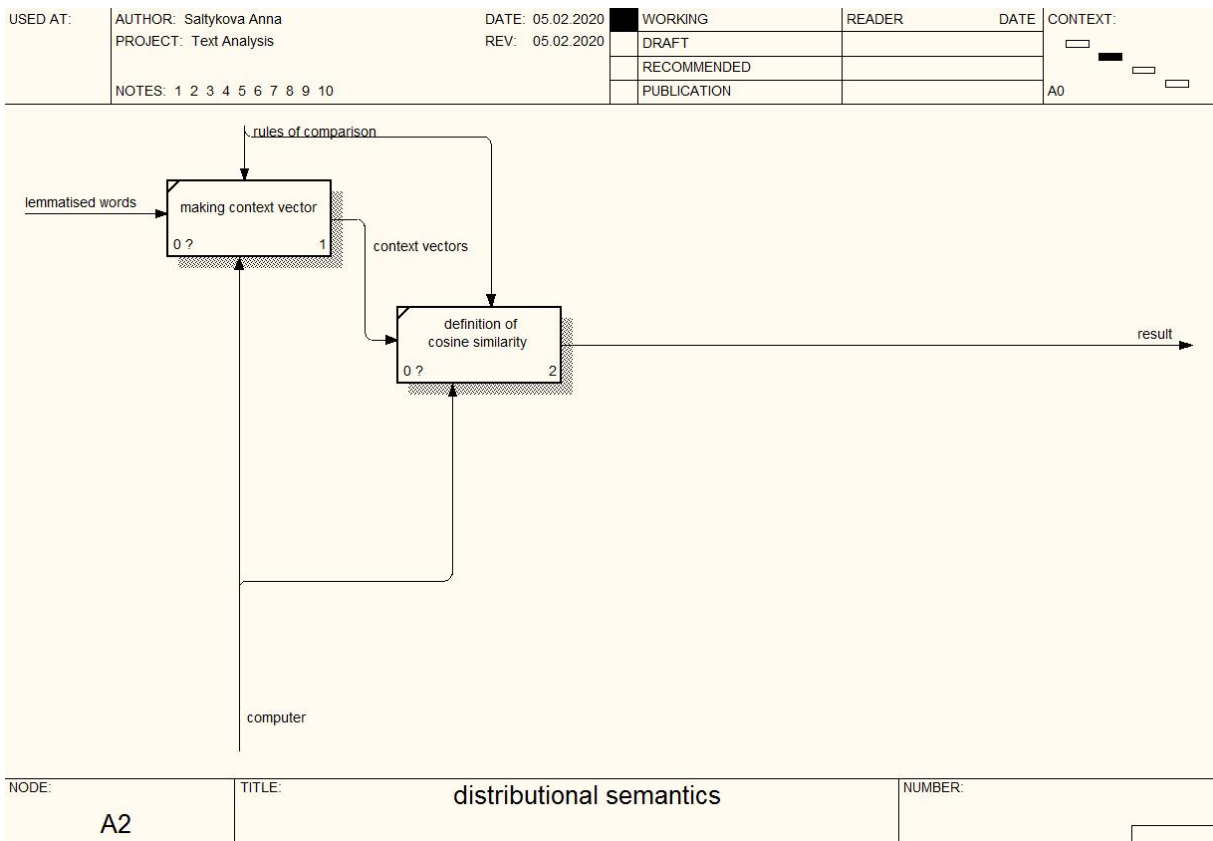
Далее с учетом результатов синтаксического анализа определяется окончательно степень сходства двух фраз.

Таким образом, модель IDEF0 наглядно представляет основные потоки данных и основные блоки, необходимые для реализации задач данного исследования.

Построенная диаграмма концептов также визуализирует и определяет структурные компоненты процедуры семантического анализа синтагм с учетом синтаксических связей.



**Рисунок 3. Модель IDEF0. Декомпозиция верхнего уровня**



**Рисунок 4. Модель IDEF0. Уровень A2**

## Библиографический список

1. **Аюшеева, Н. Н.** Способ расчета весовых коэффициентов вершин семантической сети научного текста / Н.Н. Аюшеева, Т.Н. Кушева // *Fundamental research*. 2012. №6. 626 с.
2. **Крайванова, В.А.** Проблема извлечения знаний в условиях динамически изменяющейся внешней среды на примере логического анализа текстов на естественном языке / В.А. Крайванова, Е.Н. Крючкова // *Вычислительные технологии* Т. 15. № 3. 2010.
3. **Диковицкий, В.В.** Обработка текстов естественного языка в моделях поисковых систем / В.В. Диковицкий, М.Г. Шишаев // *Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии*. Апатиты: изд-во КНЦ РАН, 2010. Вып. 1. 29с.
4. **Диковицкий, В.В.** Семантический анализ текста с применением нейросетевого анализа морфологии и синтаксиса // *Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии*. Апатиты: изд-во КНЦ РАН, 2010. Вып. 11-15(9). 109с.
5. **Орлова, Ю.А.** Автоматизация семантического анализа текста технического задания: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. Волгоград, 2008. 24 с.
6. **Котельников, Е.В.** Методология интеллектуального анализа мнений при обработке текстовой информации на основе правдоподобного вывода: дис. канд. техн. наук: спец. Нижний Новгород, 2019. 365 с.
7. **Петрова, Ю.Н.** Коммуникативно-семантическое моделирование конструкций с кумулятивным отрицанием: автореф. дис. канд. филол. наук: спец. Москва, 2009. 27 с.
8. **Бердник В.Л.** Модели и методы семантического сравнения строк символов в коллекции документов: автореф. дис. канд. техн. наук. Волгоград, 2008. 24 с.
9. **Сбойчаков, К.О.** Автоматизированная система смысловой обработки текстов при создании электронных фондов библиотеки: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. Москва, 2003. 18 с.
10. Синтагма. Лингвистический энциклопедический словарь // [Электронный ресурс]. URL: <http://tapemark.narod.ru/les/447c.html> (дата обращения: 09.11.2019).
11. Y. Tina Lee. Information modeling from design to implementation // *National Institute of Standards and Technology*, 1999.
12. CASE средства. Менеджмент качества // [Электронный ресурс]. URL: [https://www.kpms.ru/Automatization/CASE\\_tools.htm#CASE\\_1](https://www.kpms.ru/Automatization/CASE_tools.htm#CASE_1) (дата обращения: 09.11.2019).
13. Klochkov, V.P., Rybakova G.R., Vasileva, N. O., Malkova T. V., Krotova I. V. Parameters of modeling the semantic compatibility of educational information // *Amazonia Investiga*. Vol. 8 Núm. 23. 506 с.

**A.A. Saltykova**

### **OBJECT OF STUDY MODEL DEVELOPMENT ON THE TOPIC «AUTOMATION OF THE DETERMINATION OF NATURAL LANGUAGE SYNTAGMAS SEMANTIC PROXIMITY, TAKING INTO ACCOUNT SYNTACTIC RELATIONS»**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

This article is devoted to the object of study modeling on the topic "Automation of the determination of natural language syntagmas semantic proximity, taking into account syntactic relations". The study focuses on the modeling methods applicable to natural language phrases analysis by means of information technology. The article presents a diagram of domain concepts and an IDEF0 model with decomposition demonstrating the structure and data flows of the syntagma analysis module main blocks.

**Key words:** syntagma, distribution semantics, model, natural language.



И.В. Скрипник

**ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ СВЯЗИ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

ООО НПП «ПРИМА», г. Нижний Новгород

Представлены актуальные вопросы исследования и разработки самоорганизующейся авиационной сети связи (FANET), позволяющей обеспечивать устойчивое взаимодействие в группах беспилотных летательных аппаратов. Предложены подходы к совершенствованию протоколов физического, канального и сетевого уровней.

**Ключевые слова:** авиационная самоорганизующаяся сеть связи, беспилотный летательный аппарат, множественный доступ, маршрутизация.

Принципиально новый взгляд на построение системы управления войсками и вооруженными силами привёл к пересмотру замысла формирования технической основы системы управления, при которой её основная составляющая – автоматизированная система управления Вооружёнными Силами Российской Федерации (АСУ ВС РФ) – рассматривается как целостная система, охватывающая все уровни управления. Информационные технологии в настоящее время составляют основу автоматизированных систем управления (АСУ) войсками и оружием. Они реализуют решение информационных, расчётных задач; визуализации обстановки на театре боевых действий; моделирования боевых действий, поддержки принятия решений по результатам моделирования, исполнения функций боевых задач [1]. Высокотехнологичные радиоэлектронные системы и средства управления войсками и оружием превратились в одну из главных составляющих успешного ведения боевых действий, и с каждым годом их роль продолжает возрастать [2].

Анализ опыта применения БПЛА в современных военных конфликтах позволяет сделать вывод, что наличие полной оперативной и достоверной информации о противнике является основным условием успешного ведения боевых действий. Высокая динамичность и быстротечность боевых действий приводит к ускоренному устареванию собранной информации, что выдвигает на первый план задачу гарантированного обеспечения высокой вероятности своевременной доставки информации. Важным направлением повышения эффективности воздушной разведки, особенно в зонах повышенной опасности, является организация управления многими беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), в том числе на базе авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения [3].

При этом современные авиационные комплексы управления с использованием БПЛА должны решать разведывательные задачи, ударные задачи поражения объектов, специальные задачи радиоэлектронного противодействия (РЭП), имитации ложных целей, задачи ретрансляции информации и команд боевого управления. Таким образом, приоритетным направлением развития систем БПЛА является создание разведывательных и разведывательно-ударных комплексов на их основе [3].

Развиваемые технологии самоорганизующихся авиационных сетей связи (FANET – Flying Ad Hoc Network) обеспечивают обмен различным трафиком, в том числе высокоскоростными потоками видеоинформации и данными управления в реальном масштабе времени [4, 5]. Каждый БПЛА может быть как источником мультимедиа потока (аудио-видео и данных) от

различных сенсоров на борту БПЛА, так и ретранслятором потока от другого узла, образуя многосвязную (ячеистую - Mesh) топологию сети. Самоорганизующаяся сеть FANET позволяет существенно расширить возможности по доведению информационных потоков до наземных, морских и воздушных пунктов управления и по обмену междуразличными подвижными объектами, включая БПЛА. Однако при наличии больших потенциальных возможностей, реализация FANET связана с решением сложных научно-технических задач и проблем.

Основная проблема – снижение качества услуг в сети FANET, которое вызвано высокими и очень высокими скоростями перемещения узлов FANET относительно земли и друг друга с быстрым изменением координат (широта, долгота, высота). Маневрирование в 3D пространстве сопровождается изменением ориентации положения ЛА (углы курса, крена, тангажа), что является дополнительным негативным фактором, который приводит к экранированию сигналов корпусом ЛА и, как следствие, к кратковременным отказам линии связи.

Во время выполнения миссии действующие узлы могут отключаться, а новые узлы – подключаться к сети. Поэтому 3D топология сети FANET подвержена быстрым изменениям и для неё не подходят протоколы маршрутизации, основанные на оценивании топологии сети и состояния линии, разработанные для наземных мобильных самоорганизующихся сетей MANET (Mobile Ad Hoc Network), функционирующих в плоскости (2D) с уверенно прогнозируемой траекторией движения ноутбуков, носимых человеком со скоростью до 5 км/час и для автомобильных сетей VANET (Vehicle Ad Hoc Network) со скоростями узлов до 150 км/час,двигающихся по маршрутам, задаваемым дорожной картой.

Большой доплеровский сдвиг частоты из-за высоких скоростей движения ЛА усложняет схемы оптимального приёма.

Многолучёвость, обусловленная зеркальным отражением сигнала от подстилающей поверхности из-за высокой поднятости антенн БПЛА, приводит к увеличению скорости и глубины быстрых интерференционных замираний сигнала, вызывающих пакетирование ошибок на выходе демодулятора.

В таких сложных условиях на физическом уровне гарантированное обеспечение заданных значений системных характеристик качества обслуживания (QoS) сети FANET возможно путём разработки новых алгоритмов формирования и обработки сигналов на всех уровнях эталонной модели ВОС. Таким образом, актуальны следующие задачи развития FANET.

**На физическом уровне** целесообразна разработка эффективных высокоскоростных сигнально-кодированных конструкций (СКК) на базе гибкого мультиплексирования многих поднесущих колебаний с ортогональным частотным разделением F-OFDM (Flexible – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) и адаптивной M-позиционной квадратурной амплитудной модуляцией (MQAM) каждой поднесущей (F-OFDM + MQAM), с адаптивным каскадным кодированием [7, 11]. Такой подход позволяет объединять в одном пакете данные нескольких логических (виртуальных) каналов, соответствующих разным приложениям (например, видео потоки от разных камер, аудио потоки и данные от различных источников). По каждому логическому каналу может быть применена своя символьная скорость, ширина полосы поднесущего колебания, позиционность модуляции поднесущих и своё кодирование прямого исправления ошибок.

Разработка эффективных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) на базе адаптивных направленных антенн, которые значительно повышают дальность, вероятность, достоверность, помехозащищённость (робастность) доставки пакетов, уменьшая при этом время задержки передачи пакета [7]. Для эффективной реализации протоколов ПВОС требуется отслеживать на каждом ЛА параметры 4D траектории своего движения и движения ЛА на другом конце радиолинии, а именно позицию (широту, долготу,

высоту), вектор скорости и положение БПЛА (углы курса, крена, тангажа) с их прогнозированием на момент начала передачи пакета для точной настройки адаптивных антенн по направлению и ширине луча [8-10].

Разработка эффективных методов поляризационного ортогонального разнесения сигналов, позволяющих в несколько раз повысить пропускную способность в заданном частотно-пространственно-временном луче [7].

Разработка адаптивных каскадных кодов и других методов помехоустойчивого кодирования, позволяющих исправлять ошибки вместо повторной передачи стертых пакетов с помощью процедур ARQ, которые в нестационарных каналах FANET могут приводить к недопустимым задержкам и потерям пакетов [11].

**На канальном уровне** решается задача разработки новых эффективных протоколов доступа к каналу сети FANET, которые реализуются на подуровне MAC.

Хотя MANET, VANET и FANET имеют разные проблемы и характеристики, у них есть также несколько общих принципов построения. По сути FANET является специальным вариантом MANET и VANET, узлы которого обладают наибольшей подвижностью. Изначально для построения FANET использовали все направленные антенны и стандарт IEEE 802.11 [5], который является одним из наиболее часто используемых уровней MAC для MANET. С помощью механизма обмена сигналами «запрос на передачу» (RTS - request-to-send) и «передача разрешена» (CTS - clear-to-send) стандарт IEEE 802.11 может бороться с проблемой скрытого узла (hidden node) [11]. Но его недостатком является низкий коэффициент использования пропускной способности канала (всего 0,18) и большая задержка передачи пакета при большом числе узлов, использующих один канал. Причина этого в методе случайного доступа к каналу с прослушиванием несущей CSMA/CA (CarrierSenseMultipleAccess/CollisionAvoidance), который используется в IEEE 802.11.

Высокая мобильность узлов является одной из важных особенностей FANET, которая создаёт проблемы для уровня MAC. Из-за высокой мобильности, изменения расстояний и взаимного положения между узлами в FANET часто происходят изменения качества линий, связи, что снижает вероятность правильной доставки пакета. Кроме того, задержка передачи пакета может изменяться случайным образом в течение сеанса связи при наличии множества транзитных участков. Так для приложений реального времени задержка пакетов должна быть жёстко ограничена, что предопределяет дополнительные проблемы для MAC[6]. Для обеспечения требований FANET на уровне MAC находят применение комбинированные протоколы множественного доступа к каналу, направленные антенны и полнодуплексные радиоканалы (с частотным FDD или временным TDD разделением) [6], с мульти-пакетным приёмом (mpr - multi-packet reception) [17]. Рассмотренные примеры перспективных технологий, предлагаемых в новом поколении мобильной связи 5G [7] как множественный доступ с разреженным кодом могут быть применены на уровне MAC сети FANET.

**На сетевом уровне**FANET требуется разработка новых эффективных протоколов маршрутизации. Передача данных в современных инфраструктурных сетях, так и в самоорганизующихся сетях MANET, VANET обычно основаны на IP-протоколе с маршрутизацией на сетевом уровне модели OSI. Известен ряд подходов к решению задачи маршрутизации в самоорганизующихся сетях. Эти подходы нашли воплощение в следующих протоколах: DSR (Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks) – реактивный протокол маршрутизации «динамическая маршрутизация от источника» [12]; AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) – реактивный протокол «запроса вектора расстояния» [13]; OLSR (Optimized Link-State Routing) – проактивный «оптимизированный протокол состояния линии» [14]; GRP (Geografic Routing Protocol) – географический протокол маршрутизации на базе позиции[15];

TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) –распределенный протокол маршрутизации на основе алгоритма «обратного соединения» [16].

Результаты имитационного моделирования на имитаторе OPNET протоколов маршрутизации для различных сетевых сценариев (размеров сетей, видеопотоков разного разрешения, скоростей движения) представлены в [16]. Полученные оценки системных характеристик Ad Hoc сетей (пропускной способности, задержки передачи пакета, вероятности доставки пакета, джиттера) демонстрируют отсутствие одного лидирующего протокола маршрутизации, который был бы лучшим по всем по всем показателям для всех сценариев работы сети. Различные протоколы демонстрируют свое преимущество в тех или иных сценариях работы сети по одному-двум показателям (системным характеристикам), например, по задержке или по пропускной способности. Поэтому актуальной представляется разработка алгоритмов адаптации сетевого уровня по протоколам маршрутизации к сценарию работы сети для заданного критерия качества функционирования.

Предприятием ООО «НПП «ПРИМА» проводятся исследования и разработка концепции, требований, показателей и критериев качества функционирования высокоскоростной самоорганизующейся сети связи БПЛА (FANET), а также методов и протоколов сетевого взаимодействия. Разработана архитектура FANET, включающая описание состава сети, структуры радиоэлектронного комплекса летательного аппарата и наземного пункта управления, описание сетевой топологии и характеристик потоков передаваемой информации, структуры каналов связи и оценки пропускной способности логических каналов FANET на различных этапах взаимодействия с учётом временных характеристик перестройки направленных антенн. Возможность программируемой перестройки параметров самоорганизующейся системы связи составляет основу для адаптации на всех уровнях OSI в зависимости от режимов применения и сценариев использования. Следующий этап разработки предполагает проведение имитационного моделирования алгоритмов функционирования и коммуникационных протоколов для их оптимизации в различных сценариях использования FANET.

### Библиографический список

1. **Бец, М.О.** Основные направления развития и использования информационных и телекоммуникационных технологий в Вооружённых Силах Российской Федерации // Тематический сборник с приложением на CD «Связь 2017 в вооружённых силах Российской Федерации». С. 28-30.
2. **Арсланов, Х.А.** Роль военно-научного комплекса войск связи в повышении эффективности развития системы связи Вооружённых Сил Российской Федерации / Х.А. Арсланов, А.Н. Бобков // Тематический сборник с приложением на CD «Связь 2017 в вооружённых силах Российской Федерации». С. 20-22.
3. **Смирнов, С. В.** Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 1-27.
4. **Клабуков, И.** Исследовательская программа DARPA на 2015 год (Review of DARPA FY 2015 Research Programs) / И. Клабуков, М. Алехин, А. Нехина. – М., 2014. – 96 с.
5. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel A. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013.N11. P. 1254-1270.
6. **Кейстович, А.В.,** Милов В.Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи / А.В. Кейстович, В.Р. Милов; под ред. В.Р. Милова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 278 с.

7. **Степухин, А.Н.**, Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. Изд. в 2-х томах / А.Н. Степухин, А.Д. Николаев. – М.: Инфра-Инженерия, 2017. - 796 с.
8. **Alshbatat, A.I.**, Dong L. Adaptive MAC protocol for UAV communication networks using directional antennas // Proceedings of International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2010. P. 598-603.
9. **Alshbatat, A.I.**, Dong L. Cross-layer design for mobile ad-hoc unmanned aerial vehicle communication networks // Proceedings of International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2010. P. 331-336.
10. **Alshbatat, A.I.**, Dong L. Performance analysis of mobile ad hoc unmanned aerial vehicle communication networks with directional antennas // International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2010 (2010), Article ID 874586, 14 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2010/874586>
11. **Luo, Q.**, Wang J. FRUDP: A reliable data transport protocol for aeronautical ad hoc networks// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. PP. 1-1. 10.1109/JSAC.2018.2804099.
12. **Perkins, E.**, Belding-Royer E.M., Das S.R., Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing // IETF draft, RFC 3561, November 2002. <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>.
13. **Clausen, T.**, Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) // IETF, RFC 3626, 2003.<https://tools.ietf.org/html/rfc3626>.
14. **Jain, R.**, Puri A., Sengupta R. Geographical Routing Using Partial Information for Wireless Ad Hoc Networks // IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 8, N. 1, Feb. 2001, P. 48–57.
15. Park V.D., Corson M.S. A performance comparison of the Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) and Ideal Link-State Routing//*Proceedings third IEEE symposium on computers and communications (ISCC'98)*, 1998, p. 592-598.
16. **Islam, M.S.**, Riaz M.A., Tarique M. Performance Analysis of the Routing Protocols for Video Streaming over Mobile Ad Hoc Networks // International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), May 2012, Vol.4, N. 3, P. 133-150.
17. **Chen, H.**, Yu F., Chan H.C.B., Leung V.C.M. A novel multiple access scheme in wireless multimedia networks with multi-packet reception // Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling (WMuNeP '05), 2005, P. 24-31.

**I.V. Skripnik**

## **RESEARCH ISSUES IN UNMANNED AERIAL VEHICLES AD HOC NETWORK**

Research & Production Enterprise PRIMA, LLC (Nizhny Novgorod)

The report discusses current issues of research and development of a flying ad hoc network (FANET). Such a network provides stable interaction in groups of unmanned aerial vehicles. Approaches to improving the protocols of the physical, data link and network layers are proposed.

**Keywords:** flying ad hoc network, unmanned aerial vehicle, multiple access, routing.

И.В. Скрипник<sup>1</sup>, Ю.С. Егоров<sup>2</sup>, Е.А. Камышан<sup>2</sup>**СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ  
СИНТЕЗ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**<sup>1</sup>ООО «НПП «ПРИМА»,<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе рассматривается подход к описанию и выбору системно-технических решений при проектировании радиосвязного оборудования. Подход позволяет формализовать требования с применением аппарата нечеткой логики и определить частные целевые функции для поддержки принятия проектных решений. Рассмотрен пример выбора варианта реализации авиационной радиостанции.

**Ключевые слова:** системно-технические решения, радиосвязное оборудование, бортовой комплекс связи, требования, нечеткая логика.

Передовой технологический уровень разработки и приемки бортовых средств авиационной связи не всегда в полной мере поддерживается отечественными нормативными документами и государственными стандартами, что предопределяют необходимость развития современных процедур выбора системно-технических решений.

На этапе проектирования сначала создается абстрактная модель, затем формируется одно или несколько потенциальных проектных решений. Для сопоставления нескольких вариантов проектных решений необходимо определить критерии сравнительной оценки этих решений. При этом важно, чтобы все исходные требования, содержащиеся в техническом задании, были учтены, а предлагаемые решения, отраженные в требованиях к системе и предполагаемой архитектуре, полностью адекватны.

На этапе разработки важно обеспечить наличие средств для проверки того, что каждое требование правильно понято и документировано [1].

На этапе приемо-сдаточных испытаний выполняется верификация, цель которой заключается в установлении качества конечного продукта путем проверки его на соответствие функциональным и нефункциональным требованиям. При этом ограничения, накладываемые требованиями, выступают как критерии оценки качества формируемых технических решений. При формальной проверке невыполнение даже отдельных некритичных ограничений, не снижающих ценность разработки, может привести к тому, что вариант реализации изделия или всего аппаратно-программного комплекса будет отклонен.

Обозначим совокупность требований, к характеристикам  $n$ -го компонента аппаратно-программного комплекса как  $R_{nl}$ ,  $l = \overline{1, L_n}$ . При выборе системно-технических решений требования  $R_{nl}$ , связанные с числовыми характеристиками  $y_{nl}$ , формализуются заданием интервалов значений в виде односторонних неравенств  $y_{nl} \geq y_{Lnl}$  или  $y_{nl} \leq y_{Hnl}$  либо двусторонних неравенств  $y_{Lnl} \leq y_{nl} \leq y_{Hnl}$ . Допустимые значения дискретных характеристик могут быть заданы равенства либо перечислением с использованием логических связок  $\wedge$  – конъюнкция и  $\vee$  – дизъюнкция. Так, если радиостанция должна поддерживать несколько диапазонов рабочих частот, то соответствующее требование выполняется, если одно-

временно выполняются все элементарные «дочерние» требования («работа в диапазоне частот  $\Delta F_i$ »). Другое требование может заключаться в поддержке одного из нескольких интерфейсов передачи данных. Для учета выполнения требований введем индикаторную (логическую) переменную  $r_{nl}$  такую, что  $r_{nl} = 1$ , если требование  $R_{nl}$  выполняется и  $r_{nl} = 0$  в противном случае.

Представим результат проверки выполнения  $l$ -го требования,  $k$ -го варианта реализации,  $n$ -го компонента комплекса в виде

$$r_{nlk} = F_{R_{nl}}(y_{nlk}), \quad (1)$$

где  $F_{R_{nl}}(\bullet)$  – формальная спецификация требований,  $y_{nlk}$  – значение  $l$ -й характеристики,  $k$ -го варианта реализации,  $n$ -го компонента комплекса.

Для выбора варианта реализации устройства предлагается следующий алгоритм. Сначала на основе анализа требований технического задания для каждого радиоэлектронного устройства (компонента комплекса) формируются ограничения, которые определяют множество допустимых решений  $V_{An}$ .

Затем на основе проверки выполнения требований для отдельных вариантов реализации (ВР)  $v_{nk}$ ,  $k = \overline{1, K}$  последовательно проверяется выполнение требований. В результате для каждого ВР  $v_{nk}$  проверяется принадлежность множеству допустимых решений  $V_{An}$ . При этом

$$v_{nk} \in V_{An}, \text{ если } r_{nk} = 1, \text{ где } r_{nk} = \bigwedge_{l=1}^{L_n} r_{nlk}. \quad (2)$$

Если множество допустимых решений  $V_{An}$  содержит один единственный элемент, то этот вариант реализации является решением  $\hat{v}_{nk}$  задачи выбора варианта реализации аппаратно-программных комплексов. Однако этой случай достаточно редко возникает на практике. Чаще множество допустимых решений  $V_{An}$  содержит несколько элементов либо оказывается пустым.

Если множество допустимых решений  $V_{An}$  содержит один единственный элемент, то этот вариант реализации является решением  $\hat{v}_{nk}$  задачи выбора варианта реализации аппаратно-программных комплексов. Однако этой случай достаточно редко возникает на практике. Чаще множество допустимых решений  $V_{An}$  содержит несколько элементов либо оказывается пустым.

Если множество допустимых решений содержит несколько элементов, то выполняется процедура выбора одного из нескольких допустимых вариантов реализации. Поскольку индикаторная переменная выполнения требований  $r_{nk} = 1$  для всех допустимых вариантов решений  $v_{nk} \in V_{An}$ , то для их сравнения предложено применение аппарата нечеткой логики. Кроме того, существенно затрудняется учет характеристик при ранжировании альтернативных конфигураций, что востребовано в системах поддержки принятия проектных решений. Наконец значительно снижается гибкость при задании требований.

Для формализации требований вместо указания пороговых значений характеристик с определением двух градаций выполнения требований (выполняется и не выполняется), предлагается задавать требования с помощью функций принадлежности (ФП) нечеткому

множеству  $r = \mu_R(y)$ . Степень выполнения модифицированного требования  $R$  определяется, как значение соответствующей ФП  $r \in [0;1]$ .

В качестве основных вариантов формализации требований, связанных с количественными характеристиками компонент комплекса, предлагается использовать в развитие [2]: линейную s-образную ФП для правосторонних ограничений, линейную z-образную ФП для левосторонних и трапецевидную ФП для двухсторонних ограничений.

Поэтому ФП для формализации требований [3] можно рассматривать как переход от жестких ограничений с одним порогом к двухпороговым мягким ограничениям.

Для учета особенностей выполнения требований предложены функции принадлежности (рис. 1) к нечеткому множеству специального вида:

$$\mu_S(y) = \mu_S(y; y_B, y_T, c) = \begin{cases} 0 & ; y < y_B \\ c & ; y = y_B \\ \frac{(1-c)y + cy_T - y_B}{y_T - y_B} & ; y_B < y \leq y_T \\ 1 & ; y > y_T \end{cases} \quad (3)$$

– для представления односторонних ограничений снизу;

$$\mu_Z(y) = \mu_Z(y; y_B, y_T, c) = \begin{cases} 1 & ; y < y_B \\ \frac{(c-1)(y - y_B)}{y_T - y_B} & ; y_B < y \leq y_T \\ 0 & ; y > y_T \\ c & ; y = y_T \end{cases} \quad (4)$$

– для представления односторонних ограничений сверху.

Параметрами ФП (3) и (4) являются граничные требуемые значения, определяемые исходными ограничениями-неравенствами, дополнительное значение, начиная с которого ФП принимает единичное значение и оценка степени выполнения требования  $c$  при достижении граничного требуемого значения. «Ступенька» в ФП (см. рисунок) обеспечивает переход через точку, соответствующую граничному требуемому значению.

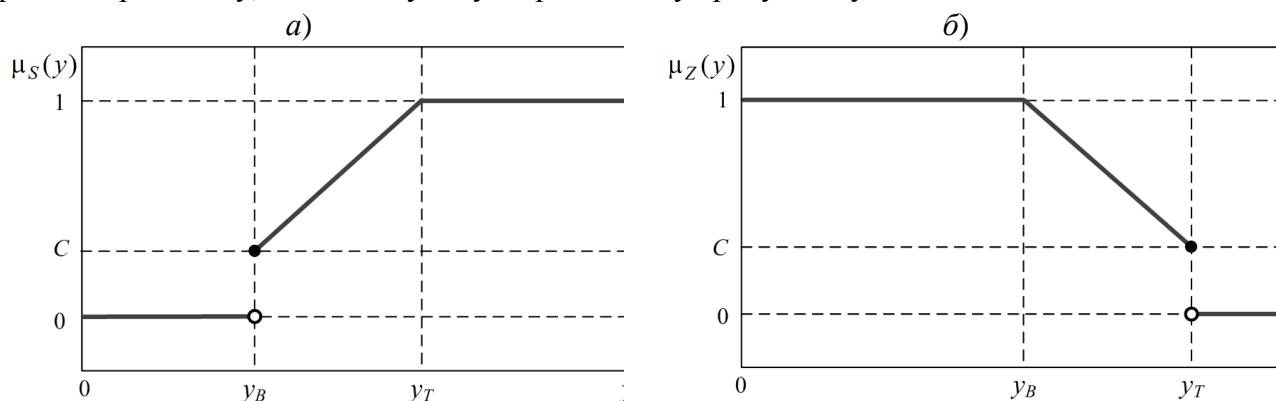


График функции принадлежности: s-вида (a) и z-вида (b)

Для примера рассмотрим характеристики (табл. 1) вариантов реализации авиационной радиостанции МВ/ДМВ диапазона.

Проверим выполнение требований  $R_{nl}$ ,  $l = \overline{1,8}$  для  $K_n = 3$  вариантов реализации (табл. 1). Поскольку все требования выполняются только для ВР-1, то согласно описанному ранее алгоритму этот первый вариант реализации  $\hat{v}_{n1}$  может быть принят в качестве искомого. Если



учесть наличие опции в составе 1-го требования и опциональный (не обязательный) характер 4-го требования (табл. 1), то третий вариант реализации  $v_{n3}$  также будет принадлежать множеству допустимых решений  $V_{An}$ . В этом случае возникает необходимость в дальнейшем сравнении двух альтернатив  $v_{n1} \in V_{An}$  и  $v_{n3} \in V_{An}$ .

**Таблица 1**

**Характеристики вариантов реализации авиационной радиостанции МВ/ДМВ диапазона**

Требования		Варианты реализации			
	Характеристики	Целевые хар-ки	ВР-1	ВР-2	ВР-3
	Диапазон рабочих частот, МГц	30-88 (опция); 100-150 (об.); 220-400 (об.)	30-88; 100-150; 156-174; 220-400	30-88; 100-150; 220-400	100-150; 156-174; 220-400
	Излучаемая мощность, Вт	Не менее 20	30	30	25
	Чувствительность приемника, мкВ	Не более 3	2	2,5	3
	Наличие режима ППРЧ	Опция	Есть	Есть	Нет
	Интерфейсы для передачи данных	C1-ФЛ или C2	C1-ФЛ, RS-422	C1-ФЛ, C2	C2
	Интерфейсы для передачи речи	C1-ТЧ	C1-ТЧ, АГ	АГ	C1-ТЧ, АГ
	Наработка на отказ, ч	Не менее 1500	2500	2000	3000
	Масса, кг	Не более 8	6,5	8	5

Результат проверки с использованием (1) представлен в табл. 2.

**Таблица 2**

**Выполнение требований для вариантов реализации авиационной радиостанции МВ/ДМВ диапазона**

№	Требования	Ед. изм.	Опция	Варианты реализации		
				ВР-1	ВР-2	ВР-3
1	R1: $y_1 = a_{1,1} \wedge a_{1,2} \wedge a_{1,3}$		*	1	1	0
2	R2: $y_2 \geq 20$	Вт		1	1	1
3	R3: $y_3 \leq 3$	мкВ		1	1	1
4	R4: $y_4 = a_4$		*	1	1	0
5	R5: $y_5 = a_{5,1} \vee a_{5,2}$			1	1	1
6	R6: $y_6 = a_6$			1	0	1
7	R7: $y_7 \geq 1,5$	тыс. ч		1	1	1
8	R8: $y_8 \leq 8$	кг		1	1	1

Для этого применим двухпороговые мягкие ограничения и найдем параметры ФП (3) и (4). Для ФП  $s$ -вида (рис.2, а) параметры определяются выражением

$$y_{Bnl} = y_{Lnl}, \quad y_{Tnl} = \max_{k=1, K_n} y_{nlk}. \quad (5)$$

Для ФП  $z$ -вида (рис.2, б) параметры ФП определяются выражением

$$y_{Bnl} = \min_{k=1, K_n} y_{nlk}, \quad y_{Tnl} = y_{Hnl}. \quad (6)$$

Оценку степени выполнения требования при достижении граничного требуемого значения примем равной  $c = 0,5$ . Обоснование выбора этого значения может составить предмет дополнительного исследования.

Для опциональных требований задаются весовые коэффициенты  $0 < w_{nl} < 1$ , характеризующий значимость отдельных требований. При нулевом значении весового коэффициента, соответствующее требование исключается из рассмотрения.

Результат анализа выполнения требований для двух отобранных ВР-1 и ВР-3 на основе предложенного подхода, с применением нечеткой логики представлен в табл. 3.

Таблица 3

Оценки степени выполнения модифицированных требований для вариантов реализации авиационной радиостанции МВ/ДМВ диапазона

№	Функции принадлежности	Единицы измерения	Весовой коэффициент	Варианты реализации			
				Без учета весов		С учетом весов	
				ВР-1	ВР-3	ВР-1	ВР-3
1	$\mu_{R1}(y)$		0,4	1	0	1	0,6
2	$\mu_{R2}(y) = \mu_S(y; 20; 30; 0,5)$	Вт	1	1	0,75	1	0,70
3	$\mu_{R3}(y) = \mu_Z(y; 2; 3; 0,5)$	мкВ	1	1	0,5	1	0,5
4	$\mu_{R4}(y)$		0,6	1	0	1	0,4
5	$\mu_{R5}(y)$		1	1	1	1	1
6	$\mu_{R6}(y)$		1	1	1	1	1
7	$\mu_{R7}(y) = \mu_S(y; 1,5; 3; 0,5)$	тыс. ч	1	0,833	1	0,833	1
8	$\mu_{R8}(y) = \mu_Z(y; 5; 8; c)$	кг	1	0,75	1	0,75	1

Сравнение отдельных ВР из множества допустимых решений может быть выполнено с помощью обобщенного показателя системно-технических решений. Для его формирования учтем необходимость выполнения всех требований и невозможность компенсации невыполнения одних требований выполнением других. Используя аппарат нечеткой логики [3] и развивая подход [2], для агрегирования выполнения требований применим  $t$ -норму [3] ( $t$ -норму типа «минимум» и алгебраическую  $t$ -норму).

Коэффициент соответствия требованиям  $k$ -го ВР  $n$ -го компонента комплекса  $v_{nk}$  при использовании  $t$ -нормы типа «минимум» имеет вид

$$K_{Mnk} = \min_{l=1, L_n} r_{nlk}, \quad (7)$$

Для учета значимости отдельных требований применим взвешенную  $t$ -норму [3]:

$$T\{a_1, \dots, a_L, w_1, \dots, w_L\} = \prod_{l=1}^L \{1 - w_l(1 - a_l)\} . \quad (9)$$

Тогда, выражения для коэффициента соответствия требованиям  $k$ -го ВР  $n$ -го компонента комплекса  $v_{nk}$  примут вид

$$K_{Mnk}^* = \min_{l=1, L} \{1 - w_{nl}(1 - r_{nlk})\} \quad (10)$$

при использовании взвешенной  $t$ -нормы типа «минимум» и

$$K_{Pnk}^* = \prod_{l=1}^{L_n} \{1 - w_{nl}(1 - r_{nlk})\} \quad (11)$$

при использовании взвешенной алгебраической  $t$ -нормы.

Применяя выражения (10) и (11) к оценкам степени выполнения модифицированных требований (табл. 3) получим  $K_{Mn1}^* = 0,75$ ,  $K_{Mn3}^* = 0,4$  и  $K_{Pn1}^* = 0,625$ ,  $K_{Pn3}^* = 0,084$ . Таким образом, как при использовании взвешенной  $t$ -нормы типа «минимум»  $K_{Mn1}^* > K_{Mn3}^*$ , так и при использовании алгебраической  $t$ -нормы  $K_{Pn1}^* > K_{Pn3}^*$ , то есть предпочтительным является первый ВР  $\hat{v}_{n1}$ , который и является решением задачи выбора системно-технических решений.

В общем случае при использовании алгоритма выбора системно-технических решений множество допустимых решений  $V_A$  может оказаться пустым, если отсутствует хотя бы один ВР, для которого выполняются все требования и согласно (2)  $r_{nk} = 1$ . Тогда выполняется переход к процедуре выбора прототипа для последующей модернизации. Для этого формируются двухпороговые функции принадлежности (ФП) и различным требованиям сопоставляются весовые коэффициенты, определяющие их значимость.

Распространенным односторонним ограничением-неравенствам ставятся в соответствие ФП вида (3) и (4). Однако выражения (5) и (6), определяющие параметры для процедуры выбора на множестве допустимых решений, не подходят в случае выбора прототипа для последующей модернизации. Учитывая, что в рассматриваемом случае все исходные ограничения не выполняются ни для одного ВР параметры ФП  $s$ -вида (рис.2, а) определим в виде

$$y_{Bnl} = \min_{k=1, K_n} y_{nlk}, \quad y_{Tnl} = y_{Lnl}. \quad (12)$$

параметры ФП  $z$ -вида (рис.2, б) определим в виде

$$y_{Bnl} = y_{Hnl}, \quad y_{Tnl} = \max_{k=1, K_n} y_{nlk}. \quad (13)$$

При таком определении параметров ФП коэффициенты соответствия требованиям (10), (11) характеризуют близость альтернатив (вариантов реализации устройства) к множеству допустимых решений.

При решении задачи выбора прототипа для последующей модернизации, в отличие от процедуры выбора на множестве допустимых решений, возникает необходимость в дополнительной оценке для различных ВР трудоемкости доработки и вероятности достижения целей проектирования.

Таким образом, при модернизации каждая из альтернатив может быть охарактеризована степенью соответствия требованиям (невыполнения требований); оценкой вероятности дос-

тижения целей проектирования (выполнения требований после модернизации); оценкой трудоемкости доработки (модернизации).

Определение трудоемкости модернизации прототипа и вероятности достижения целей проектирования обычно выполняется с привлечением известных процедур обработки экспертных мнений и выходит за рамки данной статьи.

При этом стоимость и продолжительность разработки согласовываются между Заказчиком и Исполнителем, предлагающим выполнить модернизацию изделия под требования Заказчика. Оценка вероятности достижения целей проектирования зависит от стоимости и продолжительность разработки, а также от квалификации Исполнителя.

Предложенный способ анализа системно-технических решений на основе нечеткого моделирования требований может составить основу для системы поддержки принятия решений при проектировании радиоэлектронных комплексов.

### Библиографический список

1. **Халл, Э.** Инженерия требований / Э. Халл, К. Джексон, Дж. Дик; пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 224 с.
2. **Баранов, В.Г.** Способ управления конфигурацией комплекса информационных систем / В.Г. Баранов, Д.В. Седаков, В.Р. Милов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8. С. 26-33.
3. **Yegorov, Y.S.,** Milov, V.R., Kvasov, A.S., Sorokoumova, S.N., Suvorova, O.V. Formalization of software requirements for information systems using fuzzy logic // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 042062 doi:10.1088/1742-6596/1015/4/042062.

**I.V. Skripnik<sup>1</sup>, Y.S. Yegorov<sup>2</sup>, E.A. Kamyshan<sup>2</sup>**

### SYSTEM DESIGN AND STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF COMMUNICATION COMPLEXES WITH FUZZY LOGIC

<sup>1</sup>NPP PRIMA LLC, Russia, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The paper considers an approach to the description and selection of system-technical solutions in the design of radio communication equipment. The approach allows us to formalize requirements using a fuzzy logic apparatus and define private target functions to support project decision making. An example of the choice of implementation of an aviation radio station is considered.

**Keywords:** system-technical solutions, radio communication equipment, on-board communications complex, requirements, fuzzy logic.

А.Д. Сухова, Ю.С. Егоров, И.А. Мозолин

**ОБЗОР И ВЫБОР МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРИОРИТЕТОВ СОБЫТИЙ  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЕОЛОКАЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе проводится обзор и выбор методов поддержки принятия решений и методов интеллектуального анализа данных для разработки технологии интеллектуальной поддержки принятия решений при определении приоритетов событий на основе данных геолокации. Технология позволит обеспечить поддержку принятия решений пользователю при формировании маршрутов и организации времени.

**Ключевые слова:** интеллектуальная поддержка принятия решений, система поддержки принятия решений, интеллектуальный анализ данных, концептуальное проектирование информационных систем, интеллектуализация, автоматизация, геолокация.

Возрастающие информационные потоки требуют от современного человека быть постоянно подключенным к каналам коммуникации, планировать жизнедеятельность и контролировать достижение поставленных целей. В условиях неопределенности на анализ поступающей информации уходит много времени. Принятие взвешенных и эффективных решений – одна из главных задач, стоящих перед современным человеком. На данный момент разработаны стандартные программные средства (будильник, календарь, карта, голосовой помощник), направленные на повышение производительности людей. Современные сервисы решают общие типизированные проблемы, но не учитывают персональные факторы, индивидуальные приоритеты для оценки и анализа с целью принятия эффективного решения. Человек самостоятельно анализирует текущую информацию в условиях неопределенности при формировании альтернатив. Таким образом, зачастую идет фокусирование на второстепенных задачах планирования рутинных действий, что ведет к неблагоприятным последствиям (многозадачность, информационная перегрузка, перенапряжение, стресс и ухудшение здоровья).

Актуальной проблемой является автоматизация процесса принятия решений. Разработка направлена на создание наиболее удобных условий для организации времени пользователя и повышения его эффективности при планировании различных задач.

Теория принятия решений – область исследования, содержащая методы математики, статистики, экономики, менеджмента и психологии с целью изучения закономерностей выбора людьми путей решения проблем и задач, а также способов достижения желаемого результата. Система поддержки принятия решений (сокр. СППР) – это автоматизированная система, создаваемая с целью помощи принимающим решение людям в сложных условиях для достаточно полного и объективного анализа. Такие системы появились в результате объединения систем с управлением и систем управления базами данных.

СППР предназначены для поддержки принятия решения при решении многокритериальных задач в сложных информационных средах. Итоги принятых решений оцениваются одновременно по многим критериям. Информационная сложность в данном случае опреде-

ляется тем, что необходимо учитывать большой объем данных, а его обработка без современных технических средств невозможна.

В целом системы поддержки принятия решений способны решить две задачи:

- задача оптимизации (выбор лучшего решения из множества допустимых);
- задача ранжирования (сортировка допустимых решений по оценке критериев).

В этих задачах первым шагом должен быть выбор множества критериев, по которым будет необходимо оценить все возможные допустимые решения. Допустимые решения также называют альтернативами. СППР может помочь пользователю с выбором необходимых критериев.

СППР классифицируются по множеству признаков. Их можно разделить на три вида в зависимости от взаимодействия с пользователем:

- пассивные (не предлагают конкретного решения, помогают в процессе выбора);
- активные (принимают участие в поиске оптимального решения);
- кооперативные (осуществляют непосредственно взаимодействие с пользователем).

Также СППР можно классифицировать по способу поддержки принятия решений:

- модельно-ориентированные (для работы необходим доступ к статистике);
- основанные на коммуникациях (поддерживают коммуникацию двух пользователей, работающих над одними и теми же задачами);
- ориентированные на данные (для работы необходимы как внутренние, так и внешние данные);
- ориентированные на документы (работают с любой информацией в любом электронном формате);
- ориентированные на знания (работают на основе фактов).

Для работы системы поддержки принятия решений могут использоваться различные методы поддержки принятия решений:

- информационный поиск;
- интеллектуальный анализ данных;
- поиск знаний в базах данных;
- рассуждение на основе прецедентов;
- имитационное моделирование;
- эволюционные вычисления и генетические алгоритмы;
- нейронные сети;
- ситуационный анализ;
- когнитивное моделирование.

Информационный поиск – это поиск неструктурированной информации. Сначала информационно-поисковые системы (или системы информационного автоматизированного поиска) использовались только для управления информацией в научной документации. Однако широкое распространение такие системы получили с появлением сети интернет.

Поиск информации заключается в выявлении закономерности в неструктурированном тексте, который посвящен указанной интересующей пользователя теме. Процесс поиска – это определенный набор последовательных операций, которые осуществляют сбор, обработку и вывод интересующей пользователя информации.

Процесс поиска информации можно разделить на четыре шага:

- 1) построение запроса на получение информации;
- 2) определение набора источников данных, содержащего нужную информацию;
- 3) сбор информации из всех источников определенного на предыдущем этапе набора;
- 4) анализ полученной информации.

Полнотекстовый поиск осуществляется по всему предоставленному документам целиком. В качестве примера может выступать любой интернет-поисковик. Обычно данный поиск для ускорения процесса сбора информации использует предварительно сгенерированные индексы.

Поиск по метаданным – это поиск по определенным параметрам документа, которые поддерживаются системой.

Поиск по изображению – это поиск по содержанию изображения. Система поиска определяет содержимое картинки, и в качестве результатов поиска выдает изображения, похожие на исходное.

Интеллектуальный анализ данных (ИАД, англ.) – направление в области искусственного интеллекта. Точного перевода данного термина нет, но дословным переводом является «добыча данных».

ИАД – это поиск в исходных данных неких закономерностей, связей, которые нельзя обнаружить невооруженным глазом. Такие закономерности могут помочь в любой сфере человеческой деятельности при процессе принятия решений.

Рассуждение на основе прецедентов – это поиск решения возникающих новых проблем на основе решенных старых подобных проблем. Примером может служить любая отрасль деятельности человека. Например, автосервис. Механики ремонтируют автомобиль с проблемой, которую уже решали некоторое количество раз, соответственно, решение по ремонту, принятое и оказавшееся верным для предыдущего автомобиля, может также оказаться верным и для нового автомобиля с идентичной проблемой.

Таким образом, можно утверждать, что данный метод применим в повседневной жизни человека, и любые рассуждения могут быть основаны на личном опыте человека.

Имитационное моделирование подразумевает под собой такое моделирование реальных физических процессов, при котором модель максимально точно отображает поведение объекта в реальной жизни. По результатам использования данного метода для данной модели возможно получить наиболее полную и устойчивую статистику.

Эволюционные вычисления и генетические алгоритмы – это алгоритмы, которые реализуют моделирование реального жизненного процесса, такого как, например, естественный отбор.

Генетические алгоритмы – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи.

Эволюционные алгоритмы – направление в искусственном интеллекте (раздел эволюционного моделирования), которое использует и моделирует процессы естественного отбора, например, наследование и мутация, для поиска решений задач оптимизации. При этом используются методы комбинирования, случайного подбора и пр.

Нейронная сеть – это математическая модель биологической нейронной сети. В понятии информационных технологий – это системы, предназначенные для обработки данных. Представляют из себя математическую модель, которая максимально точно имитирует структуру

человеческой нервной системы, а следовательно, такая модель должна быть способна к обучению, прогнозированию, обработке информации и прочим подобным возможностям.

Для работы нейронной сети не нужна заранее спроектированная модель. Нейронная сеть обладает способностью самостоятельно построить последнюю на основе исходной информации. На данный момент нейронные сети применяются везде, где необходимо решение задач обработки, прогнозирования и прочее, и тех задач, для которых невозможно определить конкретный эффективный алгоритм решения.

**Ситуационный анализ.** Результаты ситуационного анализа могут быть использованы в разработке различных планов, как стратегических, так и планов маркетинга. Стоит отметить, что ситуационный анализ применим как для разных отраслей бизнеса, так и для всей организации в целом.

**Когнитивное моделирование** – это такое моделирование, при котором имеет место процесс нахождения оптимальных решений или прогнозирования событий при помощи выявления определенных факторов, который по разным признакам (количественно, качественно) будут оценивать текущую ситуацию. Чаще всего когнитивное моделирование осуществляется группой людей.

Данный метод предназначен для принятия решения в недостаточно хорошо определенных ситуациях и основан на формировании субъективных оценок экспертов о текущей ситуации. Такая методология включает в себя:

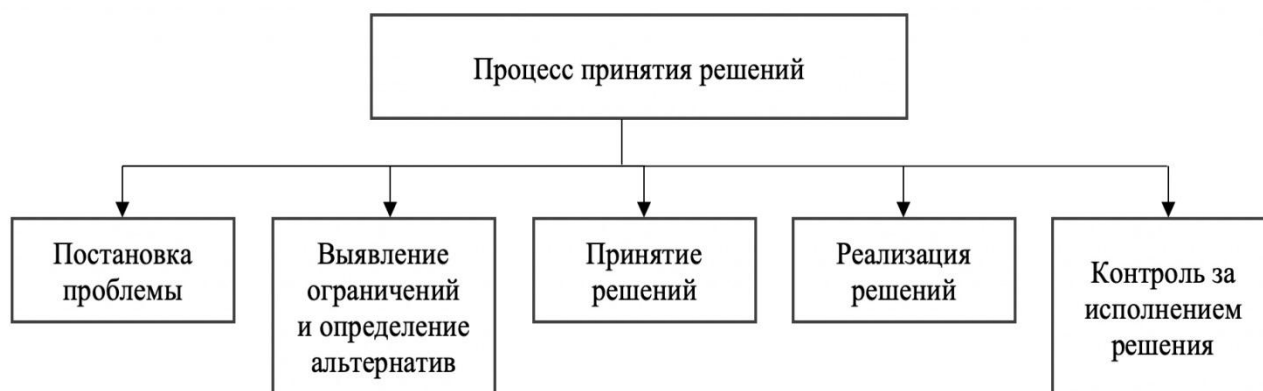
- структурирование текущей ситуации;
- анализ текущей ситуации.

Если в работе системы поддержки принятия решения задействованы методы искусственного интеллекта, то такие системы называют интеллектуальными системами поддержки принятия решений. Самые близкие к таким системам являются экспертные и автоматизированные системы управления.

Процесс принятия решений – это такой процесс, результатом которого должен стать выбор оптимального варианта действия при решении той или иной проблемы.

В основном данный процесс заключается в формировании определенного набора альтернативных вариантов действий и выбора, в конечном итоге, лучшего из них в зависимости от из оценок по установленным критериям.

Процесс принятия решения – процедура, включающая в себя определенные этапы. Данные этапы представлены на рисунке.



**Процесс принятия решений**



Интеллектуальный анализ данных – это процесс обнаружения пригодных для использования данных в их крупных наборах. В интеллектуальном анализе данных применяются методы математического анализа для выявления тенденций и закономерностей, которые существуют в исходных данных. Обычно такие закономерности нельзя обнаружить при обычном просмотре данных. Связи могут быть чрезвычайно сложны из-за чрезмерного объема исходных данных.

Технологии интеллектуального анализа данных появились благодаря увеличению объема хранимой информации до огромных размеров. Стало невозможным работать с данными, используя стандартные средства, так как структура данных и технические средства работы с ней постоянно меняются. А при таких изменениях велик риск либо потери, либо искажения данных. Однако существует способ избежать таких последствий путём создания информационного хранилища данных.

В хранилищах данных используется следующий алгоритм: все данные сжимаются, используя при этом найденные в процессе интеллектуального анализа данных закономерности и связи. Подход с созданием хранилищ данных не будет зависеть от времени или постоянного изменения структуры данных.

Определение хранилища данных можно сформулировать следующим образом: это такой набор данных, который можно охарактеризовать как интегрированный и предметно-ориентированный, который используется в процессах поддержки принятия решений.

Предметно-ориентированность в данном случае значит, что сгенерированные разными людьми отчеты будут основаны на одних и тех же данных.

Привязанность ко времени – все данные привязаны к какому-либо определенному моменту времени.

Все данные, которые были внесены в хранилище, не подвергаются модификации. Хранилище данных поддерживает только добавление все новых и новых данных.

Как правило, реальные базы данных проектируются таким образом, что для них не учитывается потребность в дальнейшем извлечении данных. Извлечение данных из баз является, по сути, машинным обучением.

Интеллектуальный анализ данных подразумевает наличие определенных интеллектуальных средств. Наиболее распространенные из них:

- нейронные сети;
- деревья решений;
- индуктивные выводы;
- рассуждение на основе прецедентов;
- нечеткие логические выводы;
- генетические алгоритмы;
- логическая регрессия;
- эволюционное программирование;
- визуализация данных.

Все перечисленные средства могут быть использованы как по одному, так и в комбинации. В настоящее время на практике чаще всего используют не один метод интеллектуального анализа данных, а их комбинацию, это позволяет решать сложные составные задачи, получая при этом максимально оптимальные решения.

Использование системы поддержки принятия решений и метода интеллектуального анализа данных в логике работы современных сервисов поможет реализовать необходимый функционал для обеспечения поддержки принятия решений пользователя при планировании

жизнедеятельности и определении приоритетов событий, что позволит исключить человеческий фактор при организации и принятии решений. Использование метода интеллектуального анализа данных позволит производить расчеты в соответствующих модулях быстро и точно, а по их результатам сформировать рекомендации человеку принятия наиболее эффективного решения.

Работа выполнена за счет средств гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №14830ГУ/2019 от 13.12.2019).

### **Библиографический список**

5. **Бертран, М.** «Объектно-ориентированное конструирование программных систем» [Текст] / М. Бертран; Под.ред. В. Биллинг : – изд. Русская Федерация, 2005. – 1204 с.
6. **Баргесян, А.А.** Методы и модели анализа данных: OLAP и DataMining / А.А. Баргесян, И.И. Холод, М.Д. Тесс, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
7. **Tariq, A., Rafi K.** Intelligent Decision Support Systems – A Framework. – India, 2011.
8. **Merkert, J., Mueller M., Hubl M.** A Survey of the Application of Machine Learning in Decision Support Systems. – ECIS, 2015.
9. Knowledge Discovery in Databases: An Overview / W. Frawley, G. Piatetsky-Shapiro, C. Matheus : AI Magazine, 1992. – 228 p.

**A.D. Sukhova, Y.S. Yegorov, I.A. Mozolin**

### **REVIEW AND SELECTION OF METHODS FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR INTELLIGENT DECISION-MAKING SUPPORT IN PRIORITIZING EVENTS BASED ON GEOLOCATION DATA**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The work is devoted to the research and selection of decision support methods and data mining methods for developing technology for intelligent decision support in determining the priorities of events based on geolocation data. The technology will allow providing decision support to the user when forming routes and organizing time.

**Keywords:** intellectual decisionmaking support, decision support system, data mining, conceptual design of information systems, intellectualization, automation, geolocation.

А.Д. Сухова, Ю.С. Егоров, И.А. Мозолин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРИОРИТЕТОВ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
ДАННЫХ ГЕОЛОКАЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Работа посвящена исследованию и анализу современных информационных средств, используемых при проектировании графического интерфейса пользователя интеллектуальной системы поддержки принятия решений при определении приоритетов событий на основе данных геолокации. Технология позволит обеспечить поддержку принятия решений пользователю при формировании маршрутов и организации времени, что позволит исключить человеческий фактор при организации некоторых процессов жизнедеятельности.

**Ключевые слова:** интеллектуальная поддержка принятия решений, геолокация, СППР, автоматизация, графический интерфейс пользователя, GUI, userexperience, UX, userinterface, UI, UX/UI проектирование.

Принятие взвешенных и эффективных решений – одна из главных задач, стоящих перед современным человеком. Теория принятия решений – область исследования, содержащая методы математики, статистики, экономики, менеджмента и психологии с целью изучения закономерностей выбора людьми путей решения проблем и задач, а также способов достижения желаемого результата.

На данный момент разработаны стандартные программные средства, направленные на повышение производительности человека. Современные мобильные сервисы решают общие типизированные проблемы, но не учитывают персональные факторы, приоритеты для оценки и анализа, принятия эффективного решения. Человек, как правило, самостоятельно анализирует ситуацию, текущую информацию, условие неопределенности для формирования альтернатив. Таким образом, идет фокусирование на второстепенных задачах планирования, организации процесса жизнедеятельности. Во многих случаях наблюдается парадокс, когда больший выбор может привести к худшему решению или, вообще, к отказу принять решение. Многие ученые, включая Шину Аенгара и Марка Леппера, публиковали исследования этого явления. Вследствие субъективности выбор зачастую оказывается неэффективным, что ведет к неблагоприятным последствиям.

Актуальной проблемой является автоматизация процесса принятия решений. Разработка направлена на создание наиболее удобных условий для организации времени пользователя и повышения его эффективности при планировании различных задач.

Использование алгоритма на основе комбинаторной оптимизации в логике работы современных сервисов [1] поможет реализовать необходимый функционал для обеспечения поддержки пользователю принятия решений при планировании жизнедеятельности и определении приоритетов событий. Применение метода ветвей и границ для решения задачи комби-

наторной оптимизации – задачи коммивояжера – позволит производить расчеты в соответствующих модулях мобильного приложения быстро и точно, а по их результатам сформировать рекомендации человеку для принятия наиболее эффективного решения [2].

Задача статьи состоит в исследовании и анализе современных средств при проектировании графического интерфейса пользователя (GUI) мобильного приложения с применением автоматизированного алгоритма поддержки принятия решений.

UX (англ. user experience) – дословно означает «опыт пользователя». В более широком смысле это понятие включает в себя весь опыт, который получает пользователь при взаимодействии с информационной системой.

UX проектирование отвечает за функциональность, адаптивность продукта и то, какие эмоции, ощущения он вызывает у пользователей. Чем проще интерфейс, тем проще пользователю получить результат и совершить целевое действие.

Некоторые люди считают, что UX – это только про посещение сайта или работу с приложением. На деле же опыт пользователя этим не ограничивается. Например, если клиент оставил заявку, но не получил смс с подтверждением или звонок от менеджера, – это симптомы плохого UX. Если же пользователь легко и без преград сделал заказ, оплатил сервис или купил товар, – это положительный UX.

Поскольку впечатления пользователей абстрактны, в UX дизайне важно изучать привычки людей, разрабатывать прототипы поведения и проводить тестирования.

По сути, UX дизайнер – это инженер-маркетолог, который исследует опыт пользователей: изучает аналитику, продумывает логические связи между элементами интерфейса и их расположение, составляет техническое задание для редакторов. И на основе исследования разрабатывает наиболее эффективный прототип.

UI (англ. userinterface) переводится как «пользовательский интерфейс». Он может быть не только графическим, но и тактильным, голосовым, звуковым (аудио-). Будет рассмотрен только графический интерфейс, так как дизайнеры в основном работают с ним.

UI дизайн включает в себя работу над графической частью интерфейса: анимацией, иллюстрациями, кнопками, меню, слайдерами, фотографиями и шрифтами.

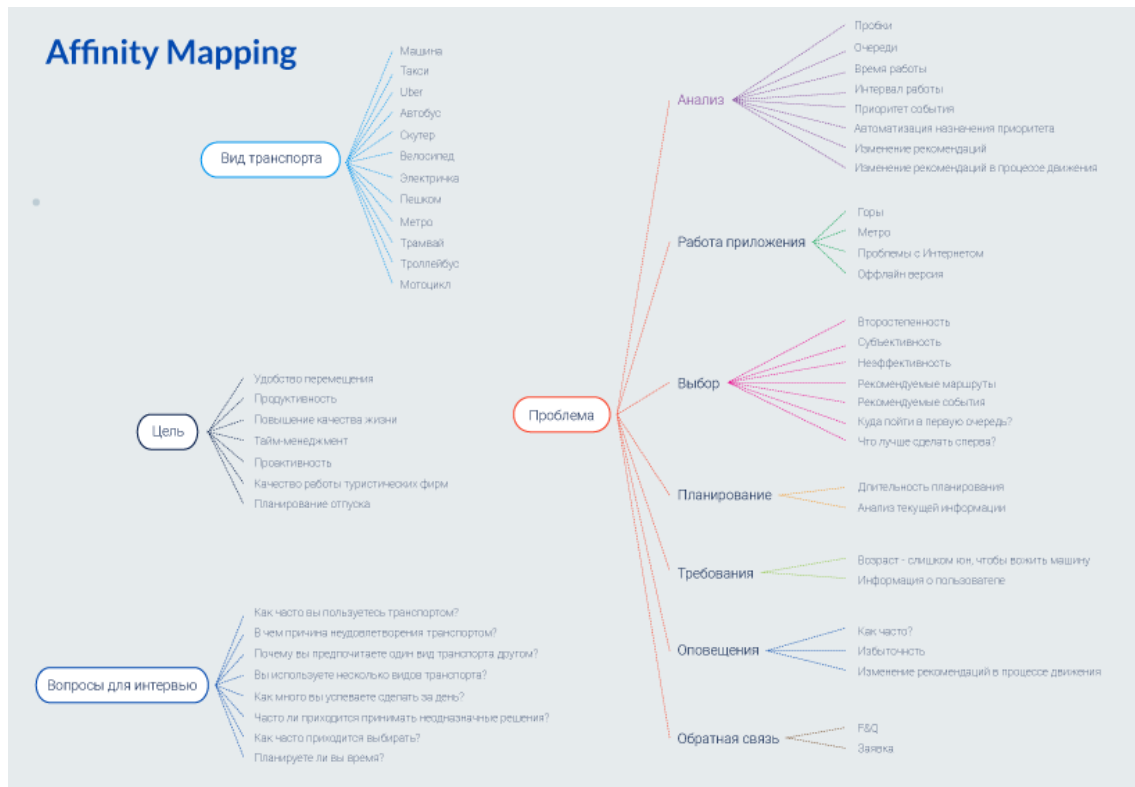
UI дизайнер определяет цветовую палитру и расположение объектов в интерфейсе: удобно ли попасть пальцем по кнопке «Заказать», правильно ли работает выпадающее меню, удобно ли заполнять форму, хорошо ли читается текст со смартфона, какое сообщение выдает сайт при том или ином действии. Для этого необходимо грамотно организовать элементы графического интерфейса пользователя и выдержать единый стиль и логику их взаимодействия.

В прошлом «UX» мышление было инновационным подходом в дизайне. Сейчас требования к графическому интерфейсу и визуализации повышаются – «UX/UI» проектирования уже недостаточно. Возник термин «VX». «VX» (англ. «view experience» – опыт зрителя) – визуализация интерфейса пользователя с помощью современных средств анимации и видео [3]. С точки зрения методов «UX», «UI» и «VX» существует ряд стандартных требований к созданию графического интерфейса пользователя. Работа над созданием интерфейса начинается с проведения анализа и исследования предметной области и целевой аудитории, планирования разработки, а и затем прототипирования.

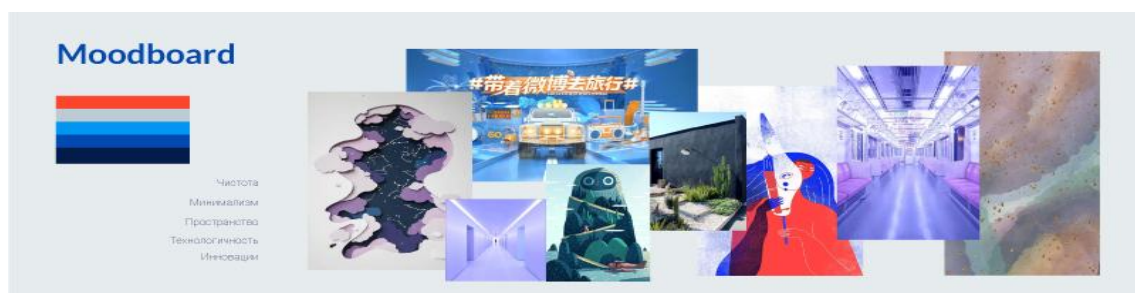
«Affinitydiagram» (англ. – диаграмма определения) – инструмент управления и планирования, используемый для организации идей и данных в процессе мозгового штурма. Диаграм-

ма определения помогает группировать большое количество идей, основываясь на их естественной взаимосвязи [4]. Применение такого подхода требует знаний проведения мозгового штурма. На рис. 1 приведена диаграмма определения относительно разрабатываемого интерфейса мобильного приложения.

«Moodboard» (англ. «доска настроения») – материальная или электронная доска (пространство) для закрепления источников вдохновения относительно определенного проекта. На доску помещается всё, что так или иначе вдохновляет и вызывает ассоциации в рамках работы над продуктом: фотографии, видео, иллюстрации, цитаты и т.д. «Moodboard» относительно данного проекта изображена на рис. 2.



**Рисунок 1. Диаграмма определения**



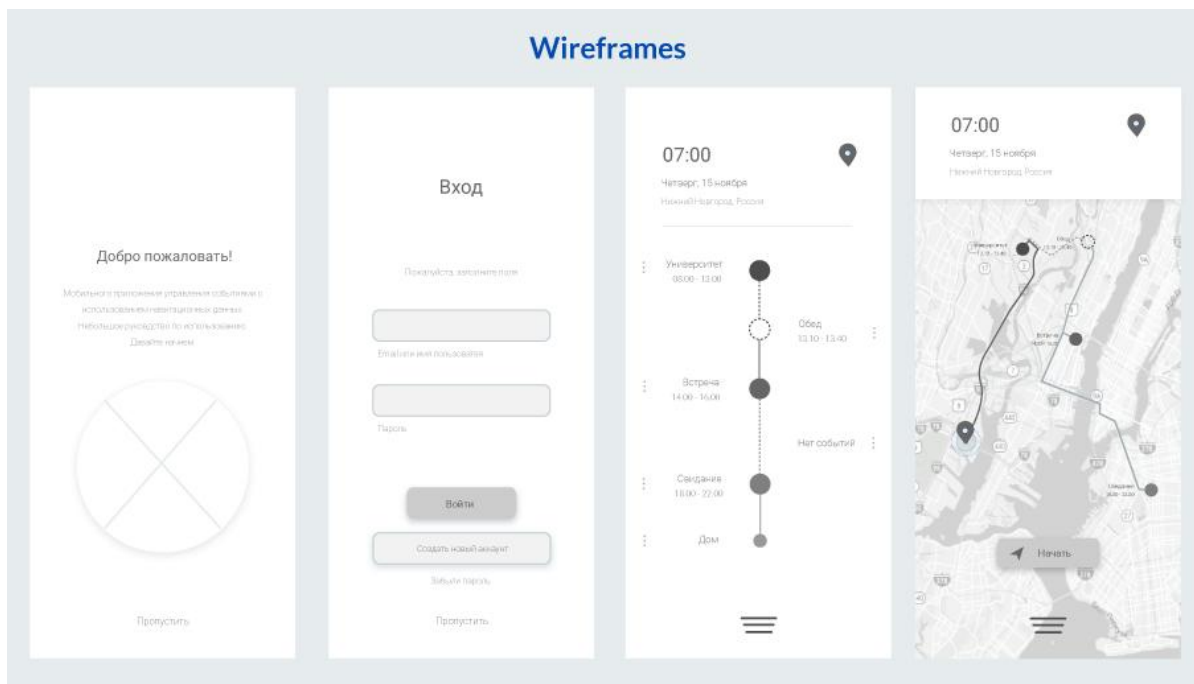
**Рисунок 2. Доска настроения**

«User Flow» (англ. «пользовательские сценарии»)– переход пользователей от одного сценария взаимодействия с интерфейсом к другому, пользовательский маршрут (рис. 3). Изначально использовались только блок-схемы, но со временем стали применяться различные визуальные элементы – варфреймы, скетчи и визуализации жестов.



**Рисунок 3. Пользовательские сценарии**

«Wireframes» (англ. «каркасы») – организация функционала конечного продукта в виде структуры с представлением элементов интерфейса и навигации, их взаимодействия друг с другом. Как правило, в «wireframes» не используется типографика, цвет и другие графические элементы оформления, так как основное внимание уделяется функциональности, поведению и содержанию. Прототипы GUI мобильного приложения изображены на рис.4.

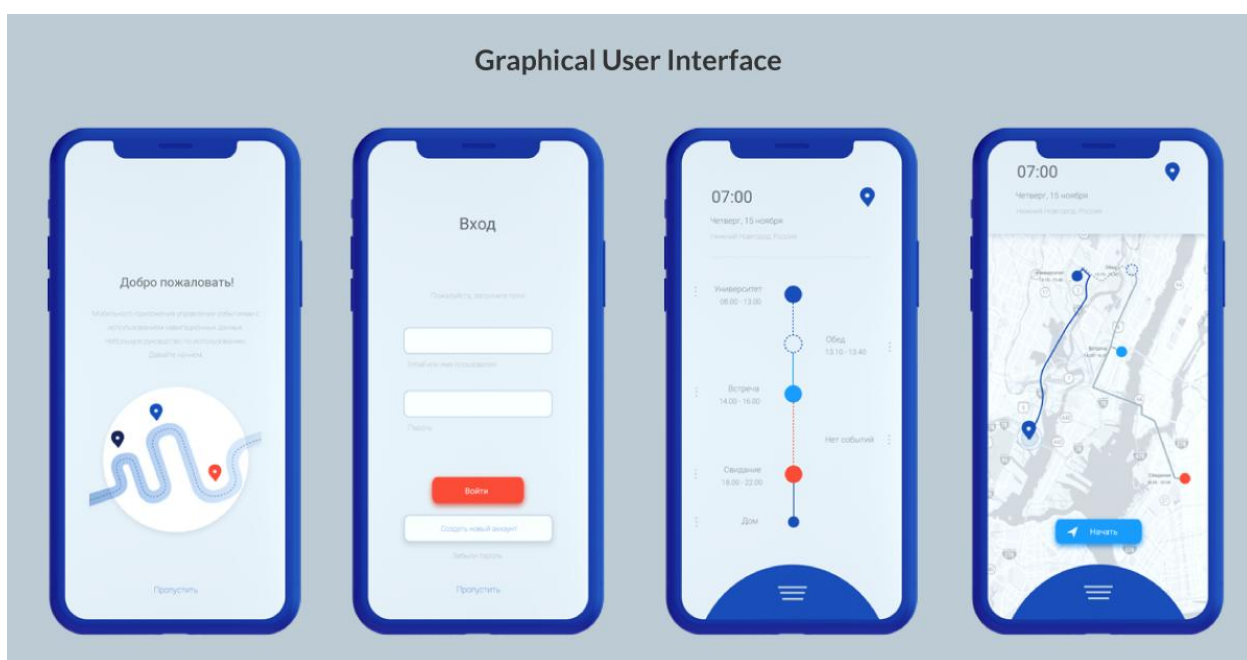


**Рисунок 4. Прототипы графического интерфейса пользователя**

После передачи UX проектировщиком прототипов интерфейса UI дизайнеру следует дальнейшая стилизация. За последний год инструмент «Figma» полностью заменил программы «Sketch» для дизайна интерфейсов и «Zeplin» для верстки из рабочего процесса разработчиков. «Figma» – онлайн-сервис для разработки интерфейсов и прототипирования с возможностью организации совместной работы в режиме реального времени. «Figma» объединила лучшие качества от «Sketch», «Zeplin» и «InVision» в одном продукте. Основные преимущества программы:

1. Организация файлов. Все данные хранятся в облаке и изменения непрерывно сохраняются.
2. Командная работа. В «Figma» можно в режиме реального времени работать над одним файлом одновременно с другими членами команды. Для подключения к работе нужен только браузер.
3. Работа с макетами для разработчика. В «Figma» создана индивидуальная настройка прав: разработчику или другому человеку назначается статус, например, «read-only», чтобы не произошло случайных изменений.
4. Комментарии. Для обсуждения макетов не обязательно вставать с рабочего места – обратная связь обсуждается и комментируется в программе.
5. Контроль версий. В «Figma» осуществляется простой контроль версий: видно, кто и когда вносил изменения, можете отменить шаги до ранней версии макета и перезаписать или создать копию этой версии.
6. Редактор кривых. В «Figma» – один из лучших редакторов кривых. Точки можно бесконечно соединять с другими, что дает возможность делать сложные фигуры. Удаление точки на кривой не приводит к разрыву линии и исчезновению заливки – соседние точки компенсируют прежнюю форму.

Интерфейс мобильного приложения представлен на рис. 5.



**Рисунок 5. Графический интерфейс пользователя**

Использование метода комбинаторной оптимизации в логике работы современных сервисов поможет реализовать необходимый функционал для обеспечения поддержки принятия решений пользователю при планировании, например, логистики на производственном предприятии, и определении приоритетов событий, что позволит исключить человеческий фактор при организации жизнедеятельности. Алгоритм можно реализовать, например, в работе мобильного приложения управления событиями с применением навигационных данных. В статье подробно описаны современные технологии разработки графического интерфейса пользователя мобильного приложения. С их помощью можно создать интерфейс, отвечающий

основным правилам UX и UI проектирования (например, эргономичность, интуитивность) и потребностям пользователей.

Работа выполнена за счет средств гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №14830ГУ/2019 от 13.12.2019).

### **Библиографический список**

1. **Сухова, А.Д.** Использование современных информационных технологий в проектировании графического интерфейса системы поддержки принятия решений при определении приоритетов событий / А.Д. Сухова, Ю.С. Егоров // Материалы 29-ой Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям «КОГРАФ-2019». - Нижний Новгород, НГТУ, 2019.

2. **Сухова, А.Д.** Поддержка принятия решений при определении приоритетов событий с применением комбинаторной оптимизации / А.Д. Сухова, Ю.С. Егоров, И.А. Мозолин // Материалы XVII Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (НКП-2019). – Москва, МГППУ, 2019. С. 145-146.

3. **Lhomme, Y.** Like UX before, the VX wave is coming. – 2018. – [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/thinkmojo/like-ux-before-the-vx-wave-is-coming-79a445a50fa6> (дата обращения: 20.10.2019).

4. **Stockwell, A.** Going Guerrilla: How to Fit UX Research into Any Timeframe. – 2017. – [Электронный ресурс]. URL: <https://uxmastery.com/guerrilla-ux-research/> (дата обращения: 20.10.2019).

**A.D. Sukhova, Y.S. Yegorov, I.A. Mozolin**

### **USE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN DESIGN THE GRAPHIC INTERFACE OF THE INTELLIGENT SYSTEM OF DECISION- MAKING SUPPORT WHEN DETERMINING THE EVENT PRIORITIES BASED ON GEOLOCATION DATA**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The work is devoted to the research and analysis of modern information tools used in the design of the graphical user interface of the intelligent decision support system when determining the priorities of events based on geolocation data. The technology will provide support for decision-making to the user in the formation of routes and the organization of time, which will eliminate the human factor in the organization of certain life processes.

**Keywords:** intellectual decision-making support, geolocation, DSS, automation, graphical user interface, GUI, user experience, UX, user interface, UI, UX/UI design.



С.Д. Николаев, В.Г. Сухоревров

## РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ПЕРЕВОДА НА РЕЗЕРВ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОЙ РАБОТЕ ОСНОВНОГО КАНАЛА СВЯЗИ В КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Н.Новгород

Рассмотрена задача борьбы с кратковременными сбоями на каналах связи в корпоративных сетях, предложен способ сохранения работоспособности сети путем автоматического переключения на резервный канал с использованием нескольких приоритетов для каналов связи и атрибутов «community» протокола маршрутизации iBGP.

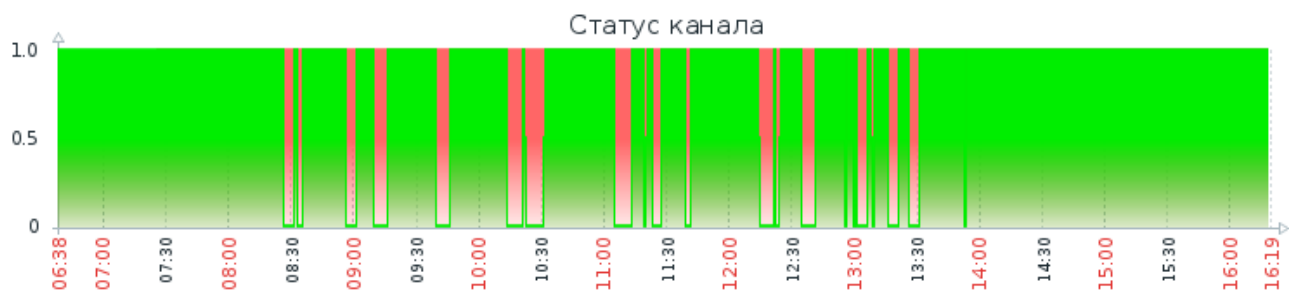
**Ключевые слова:** корпоративные сети, основные и резервные каналы связи, протокол маршрутизации BGP, атрибуты «community» и «local preference».

В современных корпоративных сетях с центральным ядром и подключенным к нему множеством объектов различной степени важности, как правило, используется протокол BGP (Border Gateway Protocol) для обеспечения связности объектов с центральным ядром [1]. При этом для надежности используются, кроме основного (приоритетного) канала связи, и резервные каналы. Для обеспечения определенности пути входящего в сторону удаленных объектов трафика принято использовать атрибут «community» протокола BGP [2].

Для автоматизации перехода на резервный канал принято использовать встроенный в оборудование функционал тестирования каналов совместно с функционалом автоматического изменения конфигурации [3].

Решения без использования функционала тестирования каналов совместно с функционалом перестроением конфигурации работают для случаев полного отказа основного канала или его деградации, когда маршрутная информация не передается по каналу, переключение осуществляется с помощью перестроения динамической маршрутизации. Если же основной канал работает нестабильно, то есть кратковременно выходит из строя и восстанавливается в течение некоторого времени, то такие решения оказываются неэффективными, поскольку ни один протокол динамической маршрутизации не содержит компонент динамического мониторинга каналов связи для такого рода сбоев. Возникает проблема периодических обрывов связи на время самого кратковременного сбоя на канале, далее на время, пока перестраивается маршрутизация с основного канала на резервный, и, наконец, после кратковременного сбоя перестроение маршрутизации обратно на основной канал. Возникающие периодические пропадания связи на время сбоя и перестроения маршрутизации оказывают негативное влияние на сервис. На практике, без внедрения автоматизации обнаружения и переключения при таком сбое, требуется вмешательство инженера, принудительно переводящего на резерв любым доступным способом вручную.

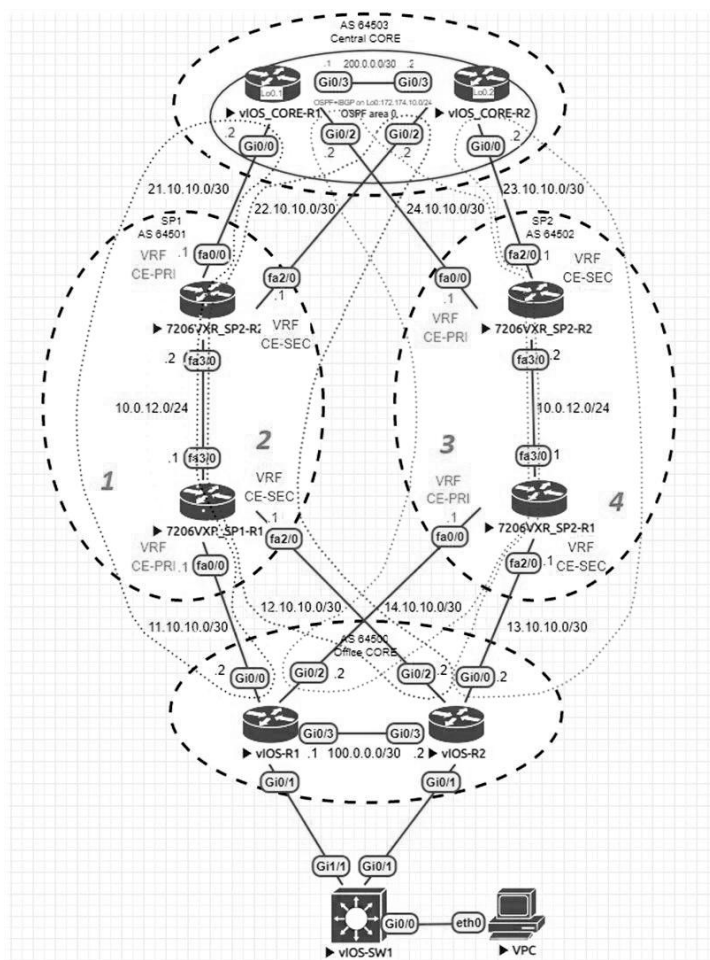
На рис.1 приведено графическое отображение во времени статуса состояния канала и его кратковременных сбоев, показанных в виде вертикальных линий.



**Рисунок 1. Временная диаграмма статуса канала с кратковременными сбоями**

В статье рассматривается способ реализации автоматизированного принудительного перехода на резерв, позволяющий организовать практически автономное управление маршрутизацией для такого рода неисправностей. Разработана концепция динамического мониторинга состояния каналов с помощью нескольких возможных значений атрибута «community» на один канал в зависимости от его состояния совместно с общеизвестными способами автоматизации.

На рис. 2 приведена топология рассматриваемого фрагмента корпоративной сети, состоящего из центрального ядра сети и объекта сети, связанных между собой каналами связи, арендуемых у двух провайдеров.



**Рисунок 2. Пример топологии фрагмента корпоративной сети**

В топологии реализовано по 2 L3 VPN канала от каждого из провайдеров. Всего четыре канала, их нумерация отмечена жирными цифрами с курсивом. Границы каналов обозначены точечным пунктиром. Предполагается, что канальная инфраструктура, так же, как и инфраструктура провайдеров, не пересекаются. Однако в работе для упрощения топологии каналы в рамках одного провайдера разнесены между виртуальными маршрутизаторами VRF (Virtual Routing and Forwarding instance) в рамках физических маршрутизаторов провайдеров. С каждого маршрутизатора ядра и объекта организованы стыки с каждым виртуальным стыковым маршрутизатором обоих провайдеров. Топология при реальном использовании может быть заменена на использование четырех каналов разных провайдеров.

Маршрутизаторы объекта и центрального ядра корпоративной сети связаны между собой одним каналом также для упрощения топологии и понимания схемы. Для обеспечения связности ядра и объекта используется один из распространенных вариантов – пиринг по протоколу BGP с провайдером на каждом из стыков [2].

Логика выбора между каналами следующая:

Определять, через какой канал связи работать объекту, определяет сам объект, передавая по каналу на ядро префикс своей подсети с определенным “выигрышным” атрибутом «community» большего значения. На центральном ядре принятому с таким атрибутом маршруту присваивается вышестоящий атрибут «local preference», определяющий точку выхода трафика в подсеть объекта из автономной системы центрального ядра в соответствии со значением атрибута «community». То есть ядро, принявшее префикс подсети с таким “выигрышным” атрибутом, направляет трафик в эту подсеть через тот канал, из которого был принят “выигрышный” атрибут «community».

Исходя из описанной проблемы и доступного функционала сетевого оборудования разработано следующее решение проблемы автоматического принудительного перевода на резерв при периодических кратковременных сбоях. За основу, как описано ранее, принят известный метод определения путей трафика с помощью атрибутов «local preference» и «community», но в отличие от большинства методов [2], одному каналу соответствует не одно значение атрибута, а несколько, меняющихся автоматически в зависимости от состояния канала.

Логика работы метода описана в виде блок-схемы, приведенной на рис.3, отражающей принцип работы метода и логику перевода на резерв.

Основным считаем канал 1, далее в порядке убывания. При кратковременном или полном выходе канала из строя, когда тот не соответствует параметрам автоматического тестирования (down), скрипт перестроения конфигурации [3] реагирует, присваивая каналу низкий приоритет из группы значений на время сбоя.

При восстановлении (down->up) скрипт перестроения конфигурации присваивает приоритет среднего значения из группы для каналов, на которых был сбой. Объект при этом продолжает работать через другой работающий штатно канал, на котором не было сбоев, с высшим текущим приоритетом (up, never down).

В этом и состоит решение проблемы принудительного перевода на резерв при нестабильной работе одного из каналов. То есть приоритет у канала, на котором был сбой, становится ниже, чем у всех остальных исправно работающих каналов, даже при его восстановлении. Так если на канале возникают периодические сбои, приоритет, соответствующий группе после сбоя, не даст маршрутизации на удаленном объекте перестроиться обратно после кратковременного сбоя на нестабильный канал.

Допустим и реализуем вариант автоматизированного возврата скриптом высших значений приоритета по таймеру или в определенное время [3], например, в нерабочие часы объекта, когда перестроение маршрутизации не окажет влияния на сервис. То есть каналы, на кото-

рых сбой автоматическим тестированием более не фиксируется, получают высший приоритет, а проблемным каналам, по результатам автоматического тестирования, скриптами будет присвоен соответствующий низкий или средний приоритет. Таким образом, достигается практически полностью автономное управление маршрутизацией, не требующее вмешательства инженеров для осуществления перевода на другой канал. Остается задача только мониторинга состояния каналов связи и своевременного их восстановления совместно с провайдером в случае обнаружения сбоев.

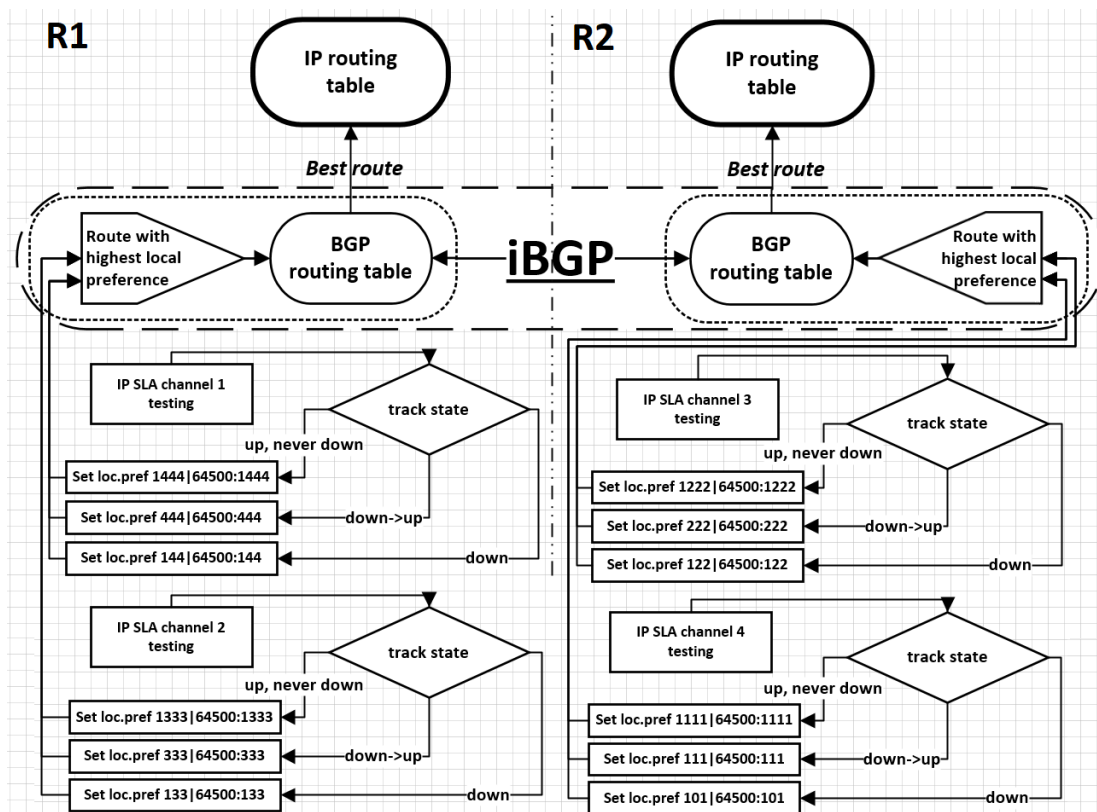


Рисунок 3. Блок-схема, отображающая логику автоматического перевода на резерв

Следует отметить, что внедрение такой концепции не исключает всех рисков. Например, если на всех каналах был или наблюдается сбой, то маршрутизация перестроится на основной канал в соответствии с логикой работы автоматизации. В таком случае инженеру необходимо вручную протестировать каналы и осуществить перевод, выбрав наилучший канал из всех возможных, предварительно отключив автоматику присвоения приоритетов, после необходимо начать совместную работу с провайдерами по восстановлению каналов связи.

В соответствии с описанным выше механизмом решения проблемы нестабильности каналов, была проведена практическая настройка сетевого оборудования для основного канала, которая подтвердила работоспособность метода.

На маршрутизаторах объекта настраивается автоматическое ip SLA тестирование каналов совместно с Enhanced Object Tracking (track) [3], где track – функция отслеживания состояния канала. Тестирование основано на проверке маршрутизатором объекта icmp-ответов от интерфейса центрального узла на стыке с провайдером, организующим канал. Для корректной работы тестирования необходимо на каждом маршрутизаторе объекта, в соответствии с организацией стыковых подсетей каналов, настроить входящие prefix-list [2],[4]. Это делается для обеспечения корректной работы механизмов тестирования путём невозможности

приёма маршрутизаторами объекта префиксов стыковых подсетей каналов, не имеющих отношения к конкретному тестируемому. То есть, чтобы при выходе одного канала из строя пакеты тестирования для этого канала не доходили до целевого тестируемого интерфейса центрального ядра через другой канал.

На удаленном объекте, в зависимости от состояния track, каждому eBGP-соседу изначально вручную, а при дальнейшей работе скриптами автоматизации (в данной работе используется Cisco Embedded Event Manager) [3], настраиваются исходящие route-map, в которых атрибут «community» соответствует состоянию каналов и его приоритету по убыванию. На основе значения этого атрибута узел центрального ядра, используя входящий route-map, обрабатывающий все возможные варианты «community», присваивает приоритет каналам в сторону удаленного объекта [2], [4].

Таким образом, пути входящего и исходящего трафика однозначно определены для каждого из каналовобразующих BGP-соседей для всех возможных состояний каналов и меняются динамически в зависимости от их состояний.

Проведенное тестирование в среде виртуализации EVEng показало жизнеспособность концепции и практическую реализуемость метода. Логика реализуема на оборудовании большинства вендоров, а значит, разработанное решение или использование логики перевода на резерв совместно с иным функционалом в зависимости от решаемых задач, является пригодным для внедрения в существующие корпоративные сети.

#### **Библиографический список**

1. <https://tools.ietf.org/html/rfc4271> – RFC 4271: A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4), IETF, Network Working Group Y. Rekhter, Ed., Request for Comments: 4271 T. Li, Ed., The Internet Society, 2006
2. [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/26634-bgp-toc.html](https://www.cisco.com/c/ru_ru/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/26634-bgp-toc.html) - Практические примеры BGP, cisco.com, последнее обновление на момент выхода статьи: 30 октября 2008.
3. Embedded Event Manager Configuration Guide, Cisco IOS Release 15S, Cisco Press, 2014.
4. Cisco Press IP Routing: BGP Configuration Guide, Cisco IOS Release 15M&T, Cisco Press, 2013.

**S. D. Nikolaev, V. G. Sukhorebrov**

#### **DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR FORCED TRANSFER TO A RESERVE IN CASE OF UNSTABLE OPERATION OF THE MAIN COMMUNICATION CHANNEL IN CORPORATE NETWORKS**

The problem of dealing with short-term failures on communication channels in corporate networks is considered a method for maintaining network health by automatically switching to a backup channel using several priorities for communication channels and the "community" attributes of the iBGP routing Protocol is proposed.

**Keywords:** Corporate networks, primary and backup communication channels, BGP routing, "community" and "local preference" attributes.

А.Д.Сюваткин

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ  
НА СРЕДНЮЮ ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Приведены результаты сравнительного анализа влияния импульсных помех на среднюю вероятность ошибок приема фазоманипулированных сигналов.

**Ключевые слова:** импульсная помеха, средняя вероятность ошибок, отношение сигнал/помеха.

Различные виды помех оказывают и различную эффективность воздействия на достоверность принимаемого сигнала. Параметры помехи являются мерой эффективности их воздействия. В частности, в литературе рассматривают влияние помехи через некоторые интегральные свойства помехи. Например, учитывают математическое ожидание помехи, ее дисперсию, амплитуду, мощность помехи в полосе принимаемых частот. Также часто проводят анализ воздействия помех через отношения энергии одного бита к энергии теплового шума  $E_s/N_0$  и отношение мощности принятого сигнала к мощности шума помехи  $P_s/P_z$ .

Импульсная помеха может по длительности занимать время как менее длительности одного бита, так и время многих бит. При малой длительности импульсной помехи ее на частотной оси можно представлять как реализацию широкополосного гауссовского шума, спектральная плотность которого покрывает всю (или значительную) часть полосы принимаемого полезного сигнала. При длительностях импульсной помехи менее длительности битового интервала и надлежащем отношении сигнал/шум еще сохраняется возможность определять при фазовой манипуляции переданный бит (например, корреляционными методами). Если поражен участок принятого сигнала содержащий несколько бит, то могут быть неправильно определены несколько бит. В этом случае может помочь лишь применение систем передачи с избыточным кодированием, позволяющим обнаруживать и (возможно) исправлять обнаруженные ошибки. Как и в любой системе цифровой передачи, всегда существует вероятность ошибки принятого сигнала (бита). Для определения таких вероятностей ошибки применяют функцию вероятностей. Весьма распространенным является определение средней вероятности ошибки (СВО) на бит информации. При различных видах помех и систем передачи эта функция может быть представлена в различных вариациях.

Примем следующие условия: будем полагать, что импульсная помеха является аддитивной, носит прерывистый характер и является нестационарной помехой с изменяющимся во времени спектральной плотностью мощности. Для исследования влияния этой помехи будем рассматривать класс импульсных помех, длительность которых не превышает длительности битового интервала, частота их повторения низкая. Это определяет, что средняя спектральная плотность помехи низкая. Также положим, что совокупная мощность помехи на входе приемника определяется суммой мощности помехи  $G_z$  и собственного шума приемника  $N_0$ .

Для случая с двоичными фазоманипулированными сигналами среднюю вероятность ошибки можно определить из выражения [4]:

$$P_E = \frac{1}{2} \rho \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{E_s}{N_0 + G_z} \right)^{1/2} \right] + \frac{1}{2} (1 - \rho) \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{E_s}{N_0} \right)^{1/2} \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  – скважность импульсных помех.

В современных приемных устройствах на входе применяются малошумящие усилители. Поэтому можно принять, что собственный шум приемника  $N_0$  вносит пренебрежительно малый вклад и им можно пренебречь. В таком случае важным параметром определения СВО будет отношение мощностей сигнала и шума  $\frac{P_s}{P_z}$ . Как показано в [1] формулу (1) в этом случае можно упростить:

$$P_E = \frac{1}{2} \rho \cdot \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{N_0}{E_s} + \frac{P_z}{2\rho K_s P_s} \right)^{1/2} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $K_s$  – коэффициент расширения спектра сигнала в случае применения фазоманипулированных широкополосных сигналов с расширенным спектром (ФМШПС). Для случая сигналов без расширения спектра примем  $K_s = 1$ . Определим зависимость средней вероятности ошибки для вида модуляции BPSK от соотношения сигнал/шум в диапазоне его изменения от +10 дБ до -30 дБ. Для определенности примем, что  $\frac{E_s}{N_0} = 15 \text{ дБ}$ .

Скважность  $\rho = 1$  для непрерывного гауссовского шума и  $\rho = 0,1$  для сравнительно редких и непродолжительных импульсных помех. Результаты вычислений приведены на рис. 1.

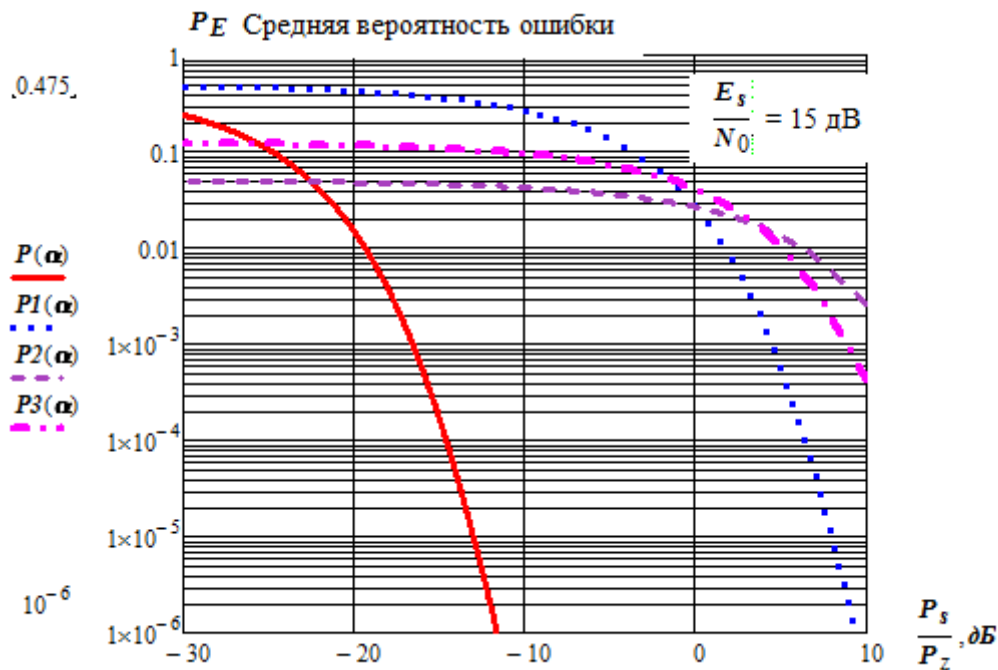


Рисунок 1. Зависимость вероятности ошибки от величины соотношения сигнал/помеха

Здесь для упрощения обозначено  $\alpha = \frac{P_s}{P_z}$  – изменяемое в расчетах отношение мощности сигнала к мощности шума. Зависимость  $P1(\alpha)$  показывает (для сравнения) зависимость СВО для случая воздействия непрерывного гауссовского шума, а кривые  $P2(\alpha)$  и  $P3(\alpha)$  зависи-

мость СВО при воздействии импульсных помех со скважностью  $\rho = 0,1$  и  $\rho = 0,25$  соответственно. Из этих графиков видно, что при воздействии непрерывного гауссовского шума вероятность ошибки сравнительно мала ( $< 10^{-3}$ ) при превышении уровня полезного сигнала над помехой 5-6 дБ. Если же помеха импульсная, то СВО хуже  $10^{-3}$  даже для превышения мощности сигнала над мощностью помехи более 10 дБ. Также видно, что вероятность ошибки при импульсных помехах имеет весьма значимую величину ( $\sim 0,1$ ), мало зависящую от отношения сигнал/шум при его значении ниже 0 дБ. Причем, при воздействии импульсных помех большей скважности, средняя вероятность ошибки тоже увеличивается. Это можно объяснить тем, что импульсы создают помехи в широком диапазоне частот и величина таких помех при высокой скважности уже не зависит от соотношения сигнал/ помеха, так как определяющими становятся тепловые шумы. По мере увеличения скважности помех их влияние становится подобным влиянию тепловых шумов.

Для сравнения на этом же графике приведена зависимость СВО (кривая  $P(\alpha)$ ) от непрерывного гауссовского шума при использовании сигналов с расширенным спектром с коэффициентом расширения  $K_s = 128$ , как это принято в системе сотовой связи стандарта CDMA. Видно, что применение сигналов с расширенным спектром обеспечивает заметно меньшие значения СВО и поэтому такие сигналы предпочтительны при малых отношениях сигнал/шум.

Результаты исследований показывают, что при воздействии импульсных помех значение СВО заметно зависит от скважности импульсных помех и доли времени битового интервала, пораженного помехой. Также подтверждено, что применение сигналов с расширенным спектром позволяет существенно уменьшать величину СВО даже при воздействии импульсных помех, но не превышающих по длительности битовый интервал.

Критерием выбора порога решающего устройства при априорно неизвестной статистике взаимной нестабильности начальных фаз принятых колебаний и опорных колебаний, но в предположении, что нестабильность не превышает половины разности фаз манипулированных посылок (в нашем случае нестабильность не выше  $45^\circ$ ) могут служить следующие соображения.

При точной и стабильной разности начальных фаз, критерием для решающего устройства выбора правильного принятого сигнала является условие, что на выходе одного из корреляторов напряжение  $u > 0$ . При нестабильности начальных фаз критерием будет служить максимальное положительное значение напряжения на выходе одного из корреляторов. Превышение такого порога будет означать для решающего устройства (РУ), что принятый сигнал совпадает по фазе с тем или иным опорным колебанием из базы опорных сигналов.

Гораздо более надежный прием информации при наличии сильных импульсных помех обеспечивают системы с применением сигналов с расширенным спектром. Это вполне объяснимо тем, что их спектр в приемнике сужается, а спектр помехи расширяется и в полосу частот полезного сигнала попадает малая часть энергии импульсной помехи.

Средняя вероятность ошибки зависит не только от соотношения мощностей сигнала и шума в канале связи, но и от соотношения энергии бита в принятом сигнале к энергии шумов приемного тракта. Уменьшение отношения энергии бита к энергии шума происходит за счет «выбивания» участка битового интервала импульсом помехи. Расчет, полученный из (2), показывает, что при уменьшении энергии принятого бита приводит к высоким значениям СВО.

Зависимость СВО от отношения  $\frac{E_s}{N_0}$  приведена на рис. 2.



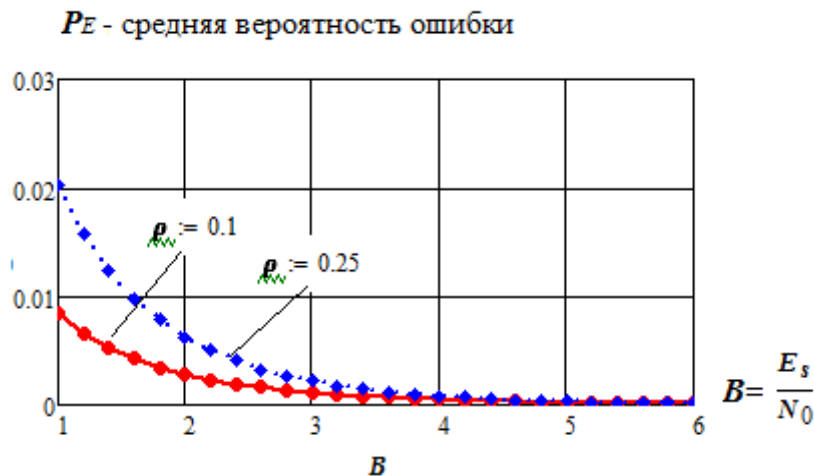


Рисунок 2. Зависимость СВО от соотношения  $\frac{E_s}{N_0}$

Как видно из графиков, при  $E_s/N_0 \geq 5$  величина СВО будет допустимо мала и будет определяться скорее отношением мощностей сигнала и шума. Также видно, увеличение скважности импульсных помех (или частоты их появления), приводит к существенному увеличению СВО, что вполне ожидаемо на практике.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

**Борисов, В.И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов [и др.] - М.: «Радио и связь», 2003. – 638 с.

**A.D. Syuvatkin**

### THE RESULTS OF COMPARATION

Presented the results of pulse interference on the mean probability of phasemanipulated signal reception errors.

**Key words:** pulse interference, the mean probability reception errors.

Ю.М.Туляков<sup>1,2</sup>, М.В.Ерютов<sup>2</sup>, А.Е. Шахов<sup>1</sup>

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ (СООБЩЕНИЙ) В СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ ОТ 2G ДО 5G

Волго-Вятский филиал Московского технического университета связи и информатики,  
г. Нижний Новгород<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород<sup>2</sup>

Дается оценка для режимов адресной, многоадресной, вещательной и широковещательной передачи данных в системах и сетях сотовой наземной радиосвязи. Определяется каналообразующая технология для вещательного и широковещательного режимов передачи данных (сообщений). Характеризуется возможность использования мультимедийных услуг для этих режимов. Исследуются варианты расширения возможностей широковещательной передачи в сетях 2G, и даются рекомендации для организации широковещательной передачи *экстренных* сообщений во взаимодействующих сетях различных поколений.

**Ключевые слова:** сети сотовой радиосвязи, вещательная и широковещательная передачи, сообщения, данные, логические, транспортные и физические каналы. мультимедийные услуги.

### Введение

Одним из бурно развивающихся видов связи является наземная сотовая радиосвязь. Особенно это можно наблюдать с ее переходом на цифровые методы формирования и передачи сигналов, то есть, начиная с 2G (второго) поколения и далее переход к 3G, 4G и в перспективе к 5G. Общеизвестно, каков существенный рост дополнительных услуг (в частности по передаче данных - информации) достигается с переходом на более высокий уровень поколения таких систем связи. И, тем не менее, количественное сопоставление пользователей сотовой связи не позволяет категорически исключить сегодняшнее использование начальных поколений цифровых таких систем (сетей).

Поэтому, при оценке широковещательной передачи данных (сообщений), в частности которая особенно важна для оповещения населения о разного рода чрезвычайных ситуациях, необходимо проанализировать возможности такой передачи для сотовой связи различных поколений.

### Анализ широковещательной передачи в системах 2G, 2,5G, 2,75G

Сети и системы 2G, 2,5G, 2,75G сотовой связи в основном базируются на стандарте GSM. 2G - рассчитана на голосовой трафик, с возможностью передачи коротких сообщений -SMS. В 2,5G, 2,75G добавлена возможность передачи данных за счет использования и объединения трафиковых каналов с максимальным числом объединяемых каналов равным восьми. (В 2,5G- GPRS технология, В 2,75G - EDGE технология).

Организацию связи в таких системах можно представить с помощью рис.1. Основой формирования каналов связи является TDMA (временное разделение каналов). ВО - временные окна, которых восемь в каждом кадре. В начальном окне ВО№0 на «главной» радиочас-

тоте (на которую настроены абонентские станции (АС) в режиме ожидания связи) базовой станции (БС) организуются каналы управления на основе мультикадров управления. В окнах этого мультикадра организуются каналы F,S,B,C, (синхронизации по частоте, по тактам, вызова и т.д.).

В мультикадрах управления организуется широковещательная передача. Такие мультикадры разбиваются на четыре группы по десять кадров в каждой группе. Для передачи широковещательных сообщений четыре кадра в первой группе.

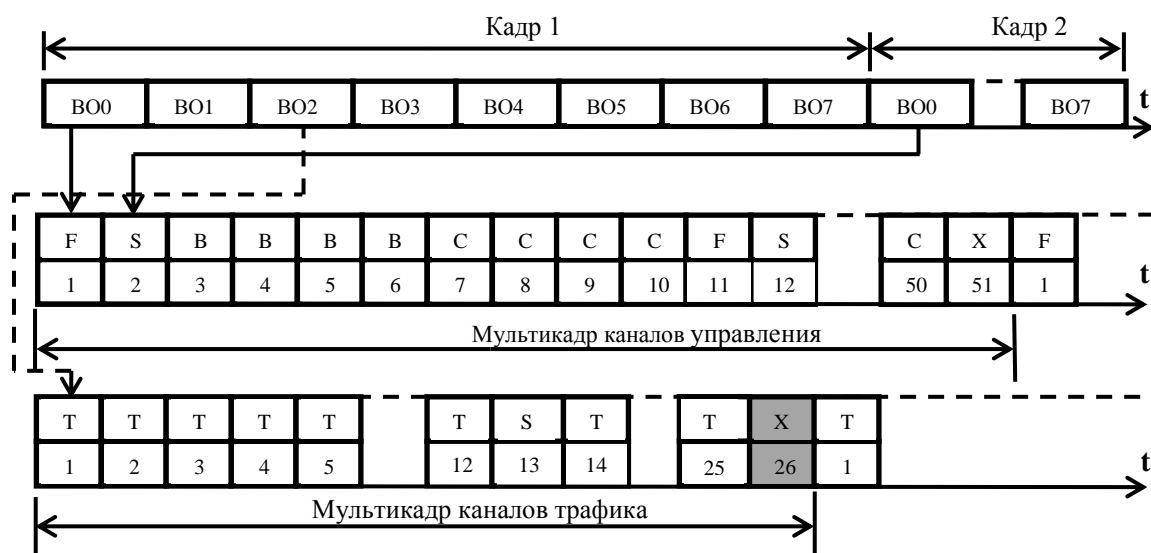


Рисунок 1. Организацию каналов связи в GSM технологии

В широковещательной передаче широко используется технология *Cell Broadcast* (CB). Особенностью CB является то, что благодаря выделенным местам в мультикадре управления для доставки SMS сообщений, используется служебный (выделенный) канал **Broadcast Channel** (BCH), который не загружает остальные основные и служебные каналы.

Заметим, что широковещательные сообщения SMS - CB, в отличие от адресной или многоадресной SMS передачи, передаются без подтверждения в определённые заранее оговоренные или заданные географические зоны.

Разговорные (трафиковые) каналы на рис.1 обозначены T1, T2 и т.д. Из них формируются мультикадры каналов трафика. При разговоре SMS адресная передача может осуществляться в служебном 13-м BO в S - канале «управления мощностью», то есть заменяя команду управления мощностью на SMS сообщение. Такой канал рассматривается как «совмещенный» с каналом трафика. Поскольку при разговоре используется канал трафика -T, то широковещательные сообщения SMS - CB не могут приниматься АС. Чтобы сообщения SMS - CB были получены АС, надо дождаться окончания переговоров АС. Неизвестность времени этого окончания переговоров для множества АС требует для получения всеми АС многократного повторения передачи SMS - CB. И, тем не менее, такая особенность и неопределенность доставки сообщений требует применения специальных мер. Например, можно предложить в экстренных случаях прерывать все разговорные связи и осуществлять передачу SMS - CB.

Другим заманчивым вариантом передачи SMS - CB является использование в трафиковом мультикадре 26-го X - незадействованного таймслота - BO X (на рис.1 см. затемненное временное окно).

Давая оценку объемам передаваемых широковещательных сообщений, следует указать следующее. Одиночное SMS-СВ сообщение в GSM может нести до 82 байт текста (93 символа в 7-битной кодировке) или бинарной информации и может быть склеено в единое сообщение с еще 14 такими же сообщениями. Это возможно благодаря тому, что в заголовке каждого сообщения имеется уникальный номер и порядковый номер единичного сообщения в серии. Скорость передачи SMS-сообщений может составлять [1, 2] от 0,38 кБит/с в канале совмещенном с каналом трафика до 0,782 кБит/с в выделенном канале, и соответственно с символьной скоростью передачи - для латиницы от 54,3 до 118 и для кириллицы от 23,75 до 48,8, символ/с.

Передачу SMS-СВ инициирует специальная платформа Cell Broadcasting Entity (СВЕ). Эта платформа передает сообщение в CBC (Cell Broadcast Center). СВЕ определяет тип контента (текст/двоичный код), канал, ареал распространения сообщения (сота/группа сот/вся сеть), период времени, в течение которого сообщение будет транслироваться, частоту его повторения и форматирует сообщение разбиением его на стандартные SMS-СВ. CBC присваивает сообщению идентификатор и отправляет его на контроллеры базовых станций (BSC) для передачи сообщения на соответствующие базовые станции для трансляции. Базовая станция передает сообщение в одном из слотов до тех пор, пока не получит от CBC через BSC сообщения об удалении сообщения.

### **Анализ широковещательной передачи в системах 3G.**

В отличие от систем GSM в 3G с технологией WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access - широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов) добавлен транспортный уровень формирования каналов (между логическим и физическим уровнями). Создание этого дополнительного уровня (подобно модели взаимодействия открытых систем) явилось одним из условий реализации универсальной системы мобильной связи -UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), сочетающая в себе возможность работы как в режимах «коммутации каналов» типа 2G и «коммутации пакетов данных» в основном для взаимодействия с интернетом.

Анализ формирования каналов для широковещательной передачи (для нисходящего направления – к АС) CellBroadcast дан в [2,3]. Отметим лишь итоговые результаты анализа этой передачи: канал. CellBroadcast формируется на отдельном физическом канале (чаще всего совместно с каналом РСН (Paging Channel - канал вызова), но может быть и выделенным), скорость передачи сообщений 1-30 кбит/сек при скорости передачи элемента сигнала 3,84 Мчип/сек. Заметим, что 1 бит информации преобразуется в 8 чипов.

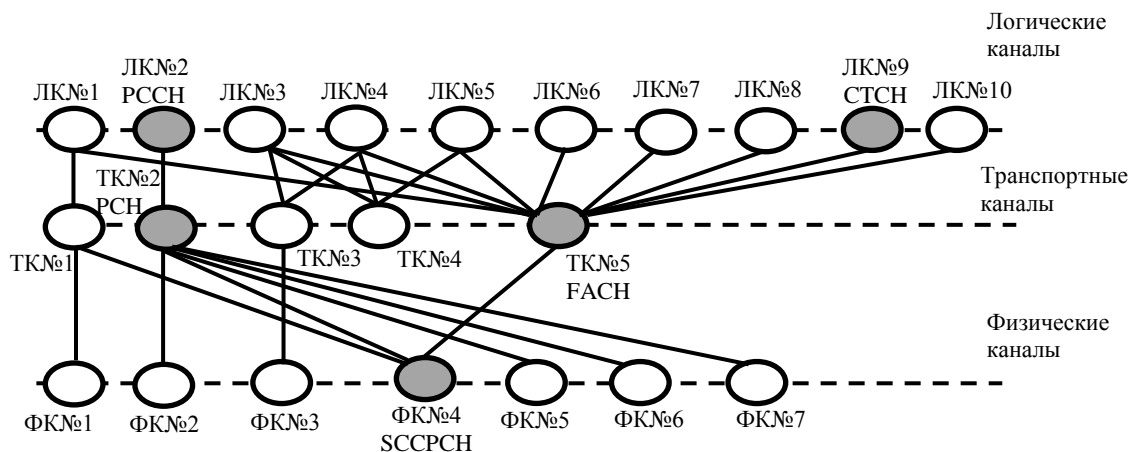
Дополнительно отметим, что для обеспечения вещательной передачи в 3G на логическом уровне был введен канал DCSCN (Downlink Control Shared Channel), который отображается в DSCH (Downlink Shared Channel) на транспортном уровне и в PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) на физическом уровне. Такие каналы можно использовать для передачи мультимедийной информации *группе абонентов*.

Как и в GSM в WCDMA (UMTS) для широковещательной передачи доступна технология Cell Broadcast. За отправку Cell Broadcast сообщения отвечает протокол ВМС (Broadcast and Multicast Control) канала СТСН (Common Traffic Channel - общий канал трафика). Сообщения отправляются не непрерывно, а с использованием прерывистой передачи (DRX - Discontinuous Reception), чтобы CBS (Cell Broadcast System) указала, в каком порядке должны передаваться фрагменты сообщений. После этого канал СТСН отображается на транспортный канал FACH (Forward Access Channel – канал прямого доступа). Задача канала FACH доставить информацию к АС. Для передачи кадров может использоваться, как упоми-

налось выше, также вызывной канал PCN (Paging Channel) в качестве широковещательного канала коротких сообщений. На физическом уровне для передачи кадров используется канал SCCPCH (Secondary Common Control Physical Channel – вторичный общий физический канал управления), который предназначен для доставки информации каналов FACH и PCN.

Для наглядности на рис.2 иллюстрируется взаимодействие каналов на логическом (ЛК), транспортном (ТК) и физическом (ФК) уровнях для организации вещания, где указаны (выделены) следующие каналы:

- PCCH (Paging Control Channel) (ЛК№2) - вызывной управляющий канал предназначен для передачи информации поискового вызова и широковещательного вызова;
- STCH (ЛК№9) -общий канал трафика предназначен для передачи данных для группы пользователей;
- FACH (ТК№5) - канал прямого доступа предназначен для управления мощностью передачи, смены скорости передачи (битовой скорости);
- PCN (ТК№2) - вызывной канал предназначен для вещания на всей территории одной соты;
- SCCPCH (ФК№4) - вторичный общий физический канал управления, который используется для доставки информации каналов FACH и PCN.



**Рисунок 2. Отображение физических, логических, транспортных каналов в 3G системах для нисходящего направления**

Для других каналов на рис. 2 указана лишь их нумерация без конкретизации назначения - на логическом уровне ЛК№1, ЛК№3-ЛК№8, ЛК №10, на транспортном уровне ТК№1, ТК№3, ТК№4, на физическом уровне ФК№1- ФК№3, ФК№5- ФК№7.

Очевидным условием использования дополнительно введенных возможностей технологии WCDMA является необходимость наличия у абонента АС [мобильной станции (UE – User Equipment)], поддерживающей работу 3G сотовой сети.

### **Оценка широковещательной передачи сообщений (данных) в 4G**

Развитие сотовой связи, относящейся к поколению 4G, получило в технологии LTE (Long Term Evolution - долгосрочная эволюция), которую более точно можно классифицировать как 3,9G [4]. Это развитие заключается в повышении скорости и объема передаваемых данных (информации) за счет полного перехода к пакетной передаче и внедрения на физическом уровне технологии OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing – модуляция с ортого-

нальным частотным разделением спектра). Безусловно, эта технология открывает большие возможности в предоставлении мультимедийных услугах и в том числе организации передачи мультимедийных сообщений и мультимедийного вещания и в том числе телевещания.

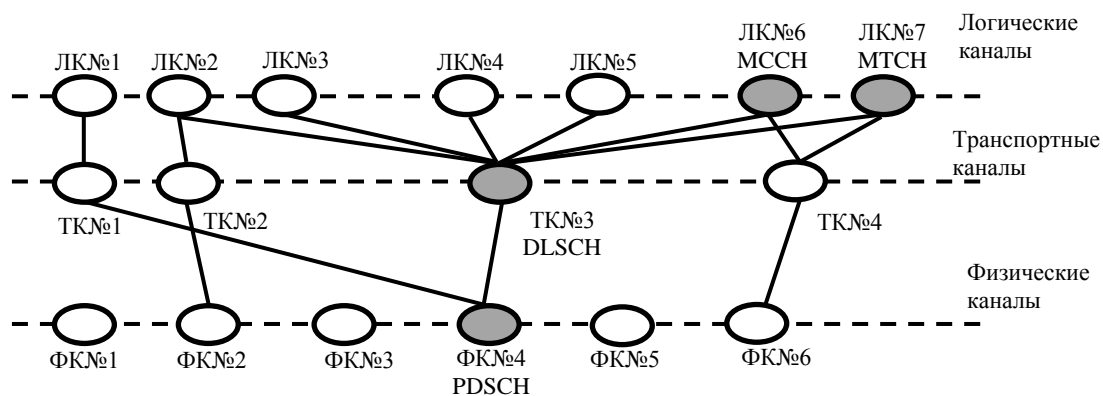
**Мультимедийные сообщения** можно рассматривать как усовершенствование услуги коротких сообщений (SMS, Short Message Service), когда наряду с текстовой информацией передается изображение и звук. При этом отличительными особенностями такой услуги являются ограниченный объем данных (в отличие, например, от потоковых услуг) и то, что она выполняется не в реальном времени [4].

Сопоставляя передачу мультимедийных сообщений с мультимедийным вещанием, следует отметить следующее. Передача мультимедийных сообщений реализует двухточечную «точка-точка» (PTP, point-to-point) модель организации связи в отличие от модели «точка — много точек» (PTM, point-to-multipoint) вещательных услуг, когда пакеты данных от одного источника передаются одновременно нескольким пользователям, объединенным в специально организованную вещательную группу.

Безусловно, реализация услуг мультимедийного вещания и передачи мультимедийных сообщений возможна с абонентскими мобильными станциями (UE), способными поддерживать используемые в сети эти мультимедийные услуги.

Оценивая сетевую организацию сетей 3G и 4G с мультимедийными услугами, следует отметить [4], что эти сети сохраняют взаимодействие с сетями 2G (GSM) с SMS передачей, рассмотренной выше. Работа между этими видами сетей осуществляется, как правило, на основе почтовых протоколов.

Типы каналов и их взаимодействие для широковещательной передачи (в нисходящем направлении – к AC) 4G (LTE) показаны в выделенном виде на рис. 3.



**Рисунок 3. Отображение физических, логических, транспортных каналов в LTE для нисходящего направления**

*Логические каналы (ЛК):*

- МССН (Multicast Control Channel) (ЛК№6) - групповой управляющий канал для передачи групповой служебной информации. Используется для передачи служебной информации при приеме канала МТСН;

- МТСН (Multicast Traffic Channel) (ЛК№7) - групповой трафиковый канал для передачи трафика для выделенной группы пользовательских терминалов, также используется для передачи услуги мультимедийного вещания.

*Транспортный канал (ТК):* DLSCN (Downlink Shared Channel) (ТК№3) - нисходящий совместный – транспортный канал, который используется для адаптации скорости передачи, планирования передачи во временной и частотной областях, а также для автоматического запроса повторной передачи не принятых пакетов.

*Физический канал (ФК):* PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) (ФК№4) - физический нисходящий совместный канал, используемый для передачи информации каналов DLSCN и РСН.

Другие каналы для нисходящего направления на рис.3. представлены без конкретизации их назначения с указанием только их нумерации: ЛК№1- ЛК№5; ТК№1, ТК№2, ТК№4; ФК№1- ФК№3,- ФК№5, ФК№6.

Из рис. 3 следует, что услуги мультимедийного вещания передаются в управляющем канале МССН (где могут передаваться параметры физического канала, информация о доступе и т.д.), и групповом трафиковом канале МТСН, по которому передаётся пользовательская информация. Возможны два режима предоставления мультимедийных вещательных услуг: обычное вещание (broadcast mode) и групповое вещание (multicast mode).

В сетях LTE возможна либо *односотовая* и *многосотовая передача* вещательных мультимедийных услуг [4]. При *односотовой передаче* данные — индивидуальный трафик — передаются по транспортному нисходящему совместному каналу DLSCN,

*Многосотовая передача* выделенной услуги группового мультимедийного вещания реализуется посредством одновременной передачи идентичных радиосигналов на территории нескольких сот. В этом случае логические каналы МТСН и МССН обеспечивают передачу информации типа «точка — много точек». Такой режим передачи принято называть одночастотной групповой вещательной сетью MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network).

### **О перспективах широковещательных услуг в 5G**

В сетях **5G** с планируемыми скоростями передачи данных, превосходящими скорости сетей **3G** и **4G**, возможности вещания могут быть улучшены. Здесь подразумевается использование таких новых технологий как eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) и FeMBMS (Further evolved MBMS) [5].

Технология eMBMS была введена уже в стандарте LTE и позволила осуществлять смешанный режим вещания, при котором 60% подкадров (6 из 10) могут быть использованы для вещания в одночастотной сети. В FeMBMS при смешанном режиме передачи приоритет у вещания был повышен до 80%, то есть 8 из 10 подкадров используются для вещания. При этом увеличенный размер защитного интервала (циклический префикс) в технологии FeMBMS (200 мкс) позволил бы разносить станции на большее расстояние, по сравнению с технологией eMBMS, в которой максимальное расстояние между станциями не превышает 5 км. Также в FeMBMS доступен специальный режим, а именно отдельный вещательный режим, в котором вещание не совмещено с услугами одноадресной передачи.

Также одним из главных преимуществ технологии FeMBMS по сравнению с MBMS должно стать введение режима работы без обратного канала (receive-only mode), который допускает прием сервисов FeMBMS без SIM-карты. Начиная с 2014 года и по нынешний день активно проводятся тестирования сетей LTE и 5G для реализации технологий eMBMS и FeMBMS.

## Выводы

Определены варианты реализации вещательной передачи данных в сотовых сетях наземной радиосвязи различных поколений. С развитием таких сетей, начиная с **3G**, повысились возможности вещания за счет внедрения мультимедийных услуг. При применении этих новых возможностей необходимо учитывать возможные варианты вещания и их различие. Для этого нужна конкретизация понятия этих вариантов, с разъяснением различной терминологии их обозначений. Существует передача «точка-точка», которую можно трактовать как «адресная передача». Другой вариант передачи «точка-много точек», которую можно рассматривать как «многоадресную передачу» и можно назвать «вещательной» передачей. Третий вариант, который рассчитан на передачу данных (сообщений) всем абонентам сети или в определенной географической зоне. Используя «точечную» терминологию, это вариант можно назвать «точка - все точки» и именовать передачу как «широковещательную». На основании этих указанных различий все вышерассмотренные варианты передачи данных могут быть конкретизированы для сетей сотовой связи различных поколений.

Безусловным условием приема мультимедийного *вещания* в сетях **3G - 5G** является наличие у абонентов АС [мобильных станций (UE – User Equipment)], поддерживающих режимы этих сетей. Если у абонентов АС предназначены только для работы в **2G**, то для возможности приема *широковещательных* сообщений такими абонентами необходимо в сотовой сети также сохранение (поддержка) режимов **2G**. Как было показано, что в современных «комбинированных» сотовых сетях поддерживаются режимы связи всех поколений (5G-в перспективе). Дополнительно показаны возможности совершенствования передачи-приема SMS сообщений в **2G**.

Для доставки-передачи *чрезвычайных широковещательных сообщений* (для всех абонентов) предлагается *приоритетный режим с прерыванием всех других режимов работы сети* сотовой связи (переговоров, передачи текущих данных).

Дополнительно следует отметить ставшие популярными в настоящее время такие Интернет - сервисы, как WhatsApp и Viber для массовой рассылки информации [6]. Существует специальный сервис WhatsApp Business API, который предоставляет возможность локального оповещения о разного рода сервисах. С позиции широковещательной и особенно экстренной передачи недостатком такой рассылки является то, что прием этой рассылки может быть принудительно выключенным абонентом на АС.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

## Библиографический список

1. **Туляков, Ю.М.** Обобщенная оценка передачи данных в системах подвижной связи / Ю.М. Туляков, В.В. Абдалов, Е.В. Сорокина // Электросвязь. – 2009 - №1 - С. 37-43.
2. **Туляков, Ю.М.** Обобщенный анализ особенностей применения современных средств подвижной связи для оповещения населения. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «КомТех-2014» / Ю.М. Туляков, Д.Е. Шкаров, А.А. Калашников // Журнал Известия ЮФУ. Технические науки.-2014.-№4: Таганрог, С. 43-49
3. **Туляков, Ю.М.** Анализ широковещательной передачи данных в современных сотовых системах подвижной наземной радиосвязи / Ю.М. Туляков, Д.Е. Шкаров, А.А. Калашников // Журнал Т-Comm, №1: Москва – 2011. – С. 29 – 33.



4. Гельгор, А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 204 с.
5. <https://telesputnik.ru/materials/tekhnika-i-tekhnologii/article/testovye-proekty-po-organizatsii-veshchaniya-v-5g-setyakh/>.
6. <https://vc.ru/flood/43152-oficialnye-rassylki-v-whatsapp-kak-eto-rabotaet>.

Yu.M. Tulyakov<sup>1,2</sup>, M.V. Yeryutov<sup>2</sup>, A.E. Shakhov<sup>1</sup>

## ANALYSIS OF OPTIONS FOR IMPLEMENTATION OF BROADCAST DATA TRANSMISSION (MESSAGES) IN CELL RADIO FROM 2G TO 5G

Volga-Vyatka branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Nizhny Novgorod<sup>1</sup>, Nizhny Novgorod State Technica<sup>1</sup>, University named after R.E. Alekseeva<sup>2</sup>

**Purpose:** Evaluation of development options for broadcast data transmission in terrestrial cellular radio networks of various generations.

**Methodology:** On the basis of an analytical assessment of the formation of channels in cellular communications of various generations, the options for the implementation and improvement of broadcast and broadcast data transmission in terrestrial radio communication networks with cellular construction are determined.

**Value:** In modern conditions, when cellular networks of various generations are operated, an analytical assessment of the implementation options and differences in broadcast data transmission in cellular terrestrial radio networks 2G, 3G, 4G and 5G has made it possible to determine the possibility and necessity of interaction between all such networks. This is especially important when transmitting emergency messages about emergencies.

**Research value:** The research results presented in this article can be considered a contribution to the development of the principles of the technology of network interaction of cellular radio communication systems of various generations in the implementation of broadcast data (messages) transmission.

**Key words:** cellular radio communication networks, broadcasting and broadcasting, messages, data, logical, transport and physical channels. multimedia services.

Ю.М.Туляков,<sup>1,2</sup> А.В. Пронин<sup>2,3</sup>

## К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СВЯЗИ В КАЧЕСТВЕ ОДНОГО ИЗ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ СВЯЗИ

Волго-Вятский филиал Московского технического университета связи и информатики,  
г. Нижний Новгород<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород<sup>2</sup>,  
АО «Конструкторское бюро «Кунцево», г. Нижний Новгород<sup>3</sup>

В технике электрической и радиосвязи используются такие параметры как устойчивость и живучесть сети связи. При оценке качества радиосвязи введен и используется параметр надежности связи по времени и по зоне действия радиосвязи. Этот параметр особенно важен для систем подвижной связи и в том числе сотовой связи. Поскольку при существующих оценках устойчивости сети связи учитывается только помехоустойчивость, без учета надежности связи, возникает необходимость использования надежности связи в качестве одного из параметров оценки устойчивости сети связи. В статье определяются методики оценки надежности радиосвязи и их совместное использование для определения устойчивости сети связи.

**Ключевые слова:** сеть и система радиосвязи, помехоустойчивость, флуктуации уровня радиосигналов, надежность связи, живучесть, устойчивость сети связи.

### Введение

Одними из основных параметров работы сетей связи являются их живучесть и устойчивость. В связи с бурным развитием подвижной радиосвязи введен и используется параметр надежность связи по зоне действия сети связи. Вопрос использования этого параметра для оценки устойчивости сетей связи с учетом их живучести требует специальной дополнительной оценки.

### Использование понятия надежности применительно к средствам связи

Надежность системы (сети) электросвязи [1,2]— свойство системы (сети) электросвязи сохранять во времени в установленных пределах значения определенных параметров, характеризующих способность системы (сети) выполнять требуемые функции в заданных условиях применения и технического обслуживания. При этом надо различать аппаратурную надежность и надежность связи.

Аппаратурная надежность оценивается разного вида наработками на отказ аппаратуры, сроком ее службы и другими подобными аппаратурными параметрами. (С параметрами аппаратурной надежности можно ознакомиться, например, в [3]).

Надежность связи, которая характеризует канал связи по его способности сохранять требуемое качество передачи информации, определяемое заданной помехоустойчивостью пере-

даваемых сигналов - созданием необходимого отношения сигнал/помехав течении заданного интервала времени и заданных условиях действия системы. При этом подразумевается, что аппаратура работает исправно.

При использовании в канале связи проводных или волоконно-оптических линий связь можно считать «стационарной», когда основные параметры канала - затухания уровня электросигнала и величины помех-шумов практически не меняются (являются детерминированными) и могут быть или рассчитаны, или измерены, надежность связи может быть определена и спрогнозирована несложными методами ее оценки. Например, для достижения требуемого отношения сигнал/шум линия может разбиваться на участки с включением в них дополнительных усилителей. И при исключении форс-мажорных ситуаций – типа обрыва линии по каким-то либо причинам, надежность связи может в основном определяться аппаратурной надежностью.

При использовании беспроводных линий (на основе радиосигналов – электромагнитных волн) в каналах связи, именуемых как «каналы радиосвязи», как правило, уровни радиосигналов и помех могут меняться во времени и по зоне действия радиосистемы, вследствие чего задача оценки надежности связи (радиосвязи) значительно усложняется [4]. Учитывая популярность и перспективность систем (сетей) радиосвязи (в частности подвижной и в том числе сотовой радиосвязи), дадим оценку определения надежности такого вида связи.

### **Надежность радиосвязи**

Для современных систем (сетей) радиосвязи и особенно подвижной связи уровень сигналов может меняться не только во времени, но и по зоне действия системы (то есть возникают его изменения в зависимости от места нахождения и при перемещениях в этой зоне). Эти изменения имеют детерминированный характер – уменьшение (ослабление) при удалении от радиопередатчика и случайный характер – за счет переотражения лучей распространения от различных предметов (например, зданий) или движущихся объектов. Надежность связи учитывает эти изменения уровня радиосигналов, причем главным образом случайные. Таким образом, надежность связи должна оцениваться не только по времени, но и по зоне действия системы (сети) связи - пространственной (территориальной) надежностью. И в том, и в другом случае надежность связи будет определяться условием соблюдения заданной помехоустойчивости – созданием необходимого отношения сигнал/помеха, удовлетворяющего допустимой вероятности ошибки принимаемых сигналов.

Изменения (и в том числе флуктуации) уровня радиосигнала (например, по электрической составляющей электромагнитного поля) в зоне действия радиосвязи определяются характеристиками распространения радиоволн. Возможны также и изменения в разных точках зоны уровней помех. Используя требования к вероятности ошибки приема сигналов - к отношению сигнал/помеха, можно определить необходимый минимально допустимый (пороговый) уровень сигнала  $E_{co}$  в зоне действия системы. Зная  $E_{co}$ , надежность связи может быть оценена вероятностью  $p$  превышения этого порогового уровня уровнем сигнала в канале (или их равенства). При известных плотностях распределения вероятностей  $W(E)$  уровня сигнала надежность будет определяться (например, в процентах) интегральной функцией

$$S_{\%} = p(E \geq E_{co}) \cdot 100 = 100 \int_{E_{co}}^{\infty} W(E) dE, \% \quad (1)$$

Для определения величин  $E$  и  $E_{co}$  рассмотрим характеристики распространения радиоволн и возможные влияния радиопомех.

### **Влияние характеристик распространения электромагнитных волн, на надежность радиосвязи**

В технике радиосвязи могут использоваться электромагнитные волны (ЭМВ) различных диапазонов. В настоящее время наибольшее применение получили (в основном из-за бурного развития подвижной наземной связи) ЭМВ диапазонов ОВЧ (очень высоких частот - 30 - 300 МГц) и УВЧ (ультравысоких частот - 300 - 3000 МГц). Также наметилась перспектива использования диапазона СВЧ (сверхвысоких частот - 3 - 30 ГГц) и более высоких частот. Характеристики распространения ЭМВ СВЧ и более высоких частот могут отличаться от характеристик ОВЧ и СВЧ, но основная методика их определения во многом совпадает.

Существует ряд известных моделей оценки распространения радиоволн ОВЧ и УВЧ в условиях города, таких как [5,6] модели Окамура, Окамура - Хата, Бардина - Дымовича, Международного союза по электросвязи (МСЭ) и других, идея которых сводится к прогнозу среднего (медианного) уровня электромагнитного поля. Оценка этого уровня обычно производится или по напряженности электрической составляющей электромагнитного поля или по его мощности. В качестве примера представим методику такой оценки по мощности.

Прогнозирование уровня радиосигнала в общем виде сводится к определению усредненной медианной мощности сигнала (УММС) (величина, которая определяется для 50% времени наблюдения и 50% точек приема, находящихся на расстоянии  $R$ ) в точке приема

$$P_{\text{ПРМ}} = P_{\text{ПРД}} \cdot D - a_{\text{М}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где:  $P_{\text{ПРД}} \cdot D$  – излучаемая мощность радиопередатчика базовой станции (БС) в дБ, например, относительно 1 мВт,  $P_{\text{ПРД}}$  – мощность передатчика, подводимая к антенне,  $D$  – коэффициент усиления антенны,  $a_{\text{М}}$  – величина ослабления сигнала, зависящая от  $R$ , частоты сигнала, высоты подвеса антенн БС и абонентской станции (АС), особенностей распространения радиоволн, например, застройки города, открытая местность и т.д.

Расчет величины  $a_{\text{М}}$  осуществляется по эмпирическим формулам или с использованием специально рассчитанных графиков соответствующей модели. В обобщенном виде ослабление (потери) уровня поля в зависимости от расстояния  $R$  [8] можно описать выражением

$$a_{\text{М}} = 10n \lg R + K, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где  $n$ -показатель экспоненты потерь и  $K$  - параметр сдвига, зависящий от  $f$ ,  $h_{\text{БС}}$  и  $h_{\text{АС}}$ . Каждая модель имеет свой набор значений  $n$  и  $K$ , которые в свою очередь определяются особенностями распространения радиоволн - крупный город, пригород и т.д.

Введя величину, определяющую случайные изменения уровня сигнала -  $\Delta P$ , и подставив (3) в (2), получим выражение для прогнозирования уровня радиосигнала, учитывающее не только его затухания, но и случайные флуктуации (уменьшения)

$$P_{\text{ГР}} = (P_{\text{ГРД}} \cdot D) \text{дБ} - (10n \lg R + K) - \Delta P, \text{дБ.} \quad (4)$$

Учет случайной величины  $\Delta P$  позволяет определить или задать требуемую **надежность связи**  $S_{\%}$  в зоне действия радиосистемы. Для этого надо знать характеристики этой случайной величины-функции и параметры ее распределения  $W(E)$  [см.(1)] или по мощности  $W(P)$ . При этом должно учитываться флуктуации, как по времени, так и по территории на оцениваемом расстоянии  $R$ . Как показывают экспериментальные исследования [4,8], эти флуктуации имеют одинаковый структурный вид, «медленный характер», и поэтому обычно производится территориальная оценка, позволяющая характеризовать *территориальную надежность связи*.

Заметим, что надежность связи  $S_{\%}$  определяется для заданного расстояния -  $R$ , как правило, на границе зоны действия радиосистемы -  $R_{\text{ГР}}$ . Очевидно, что значение надежности будут изменяться в зависимости от  $R$ , и средняя надежность  $S_{\% \text{ср}}$ , по всей зоне будет отличаться (будет больше) от надежности для  $R_{\text{ГР}}$ . Такие зависимости и взаимосвязь  $S_{\% \text{ср}} = \mathbf{F}(S_{\%})$ , а также оценка надежности по площади зоны действия радиосистемы определены в [4,8].

Относительно требуемой величины  $E_{\text{со}}$  следует указать, что она определяется из требуемой помехоустойчивости с учетом (оценкой) наличия радиопомех, значение которых может меняться по зоне действия систем и особенно при их проникновении в помещения зданий [8].

### **Применение надежности связи как параметра оценки устойчивости живучести системы (сети) связи**

Кроме надежности связи существуют понятия устойчивости и живучести систем (сетей) связи [9]. **Устойчивость** – способность системы (сети) связи выполнять заданные функции в установленном объеме с требуемым уровнем качества в течении определенного времени или в произвольный момент времени при воздействии различных дестабилизирующих факторов. Устойчивость (У) сети связи характеризуется **живучестью** (Ж), **помехоустойчивостью** (ПУ) и **надежностью** (Н):

$$У = f(Ж, ПУ, Н) \quad (5)$$

**Живучесть** — свойство объекта сохранять работоспособность при отказе отдельных функциональных узлов. Живучесть сети связи характеризует ее свойство сохранения способности устойчиво функционировать при воздействии на нее дестабилизирующих факторов, существующих вне сети и приводящих к разрушению или значительным повреждениям ее элементов (линий, станций и узлов связи). Все дестабилизирующие факторы разделяются на два класса: стихийные (грозы, землетрясения, разливы рек и т.п.) и преднамеренные (диверсии, террористические акты и др.).

При оценке живучести учитываются следующие ее показатели: *объектовую (элементную) живучесть*, характеризующую свойство сохранять работоспособность с заданным качеством отдельного объекта (элемента) в сети связи; *структурную живучесть* сети связи, определяющую свойство сети сохранять связность сети при массовом разрушении ее отдельных элементов – узлов, линий или целых участков сети; *функциональную живучесть*, характеризующую функциональные ограничения, определяемые структурной живучестью. Это уменьшение производительности сети (снижение достоверности, своевременности передачи и другое) в результате выхода из строя одного или нескольких из ее элементов.

Критерием оценки живучести сети служит вероятность выживания сети связи  $P_{\text{важ.сс}}$ . Для иллюстрации такого критерия в качестве примера можно привести оценку «направлению связи» - частью сети, представляющей собой совокупность (определенное количество –  $i$ ) линий связи между двумя пунктами (узлами связи). Количественно направление связи оценивается вероятностью выживания или вероятностью разрушения

$$P_{\text{выж.нс}} + P_{\text{раз.нс}} = 1 \quad (6)$$

Под вероятностью выживания направления связи понимается [9] вероятность того, что хотя бы одна линия связи на этом направлении не будет выведена из строя. Под вероятностью полного разрушения направления связи понимается вероятность того, что все линии (элементы) на этом направлении будут выведены из строя. Тогда с учетом (7), вероятность выживания направления связи будет определяться

$$P_{\text{выж.нс}} = \prod_{i=1}^l (1 - p_{\text{раз.}i}) , \quad (7)$$

где  $p_{\text{раз.}i}$  - вероятность разрушения  $i$ -го элемента (линии, станции, узла) на направлении связи;  $l$  - количество элементов связи на направлении связи.

Такая оценка может производиться и по площади территории занимаемой элементами направления связи. Для этого должны учитываться типы размещения элементов, варианты построения сети связи и их вероятности разрушения.

Для повышения живучести сетей связи применяются специальные варианты построения сетей с фиксированным построением и адаптивно, в зависимости от возможных на нее воздействий меняющейся структурой, организацией обходных направлений и резервных каналов связи по территориально разнесенным трассам, рассредоточением на местности узлов связи, пунктов управления и их элементов, организацией периодической смены позиций подвижных узлов связи, и т.п.

Следующим параметром, определяющим устойчивость сети связи [см. выражение (5)], является **надежность сети связи-Н**. Определение надежности сети связи дано выше в начале данного раздела. Можно лишь добавить следующее. Понятие «надежность» включают в себя **техническую** и **эксплуатационную** надежность. Под технической надежностью понимают способность средств и комплексов сети связи устойчиво функционировать с сохранением в период эксплуатации значений технических характеристик (показателей) в требуемых пределах. Эксплуатационная надежность сети связи определяется способностью ее элементов обеспечивать требуемые показатели качества в заданный период при соблюдении правил

эксплуатации обслуживающим персоналом. В соответствии с этим расчет надежности может производиться двумя видами:

- априорно – расчетом ожидаемой (прогнозируемой) надежности сети связи в период планирования ее по назначению;
- апостериорно – расчетом надежности сети связи по данным эксплуатации после завершения (или в процессе) использования по назначению.

Эти расчеты производятся на основе надежностных характеристик элементов сети и в том числе их зависимости от времени эксплуатации. При этом для оценки устойчивости сети используется подход, который позволяет оценить эффективность восстановления техники связи с учетом времени доставки поврежденной техники к месту ремонта и ее ремонта через коэффициент технической готовности:

$$K_{\text{гот}} = \frac{\bar{T}_o}{\bar{T}_o + \bar{T}_в}, \quad (8)$$

где  $\bar{T}_o, \bar{T}_в$  – среднее время исправной работы до отказа (или время наработки на отказ) и среднее время восстановления соответственно. Основные значения этих величин для различных видов средств связи определены (см. например, в [9]). В качестве примера дадим оценку для радиостанций средней мощности, для которых  $\bar{T}_o = 600$  ч и  $\bar{T}_в = 25$  мин = 0,42 ч, Коэффициент технической готовности для таких радиостанций определится

$$K_{\text{гот}} = \frac{600}{600 + 0,42} = 0,9993.$$

Как видно, даже для аппаратуры, обладающей сравнительно низкой надежностью, коэффициент технической готовности (надежности) довольно высокий по сравнению с требуемой устойчивостью направлений связи, значения которой приводятся в таблице [9].

#### Требуемая устойчивость направлений связи по группам важности

Группа важности направлений связи	Коэффициент готовности	Среднее время простоя, мин
I	0,95	10-15
II	0,9	15-20
III	0,85	20-30

Типовые оценки технической надежности средств связи [9] показывают, что *техническая надежность оказывает незначительное влияние на общую устойчивость сети связи*, так как одновременный выход из строя всех средств связи, а значит и направлений связи, маловероятен. При нарушении связи с некоторыми узлами сеть связи продолжает выполнять свои функции, хотя и не в полном объеме.

Третьим параметром, определяющим *устойчивость* сети связи [см. выражение (5)], является *помехоустойчивость - ПУ*. В общем виде помехоустойчивость можно характеризовать и использовать для определения основных энергетических величин канала связи в следующем виде. Задается требуемая ошибка принимаемых сигналов (например, элементарного сигнала) –  $p_1$ , при которой осуществляется связь с заданным качеством (речь идет о цифровой передаче сигналов, при аналоговой передаче может задаваться величина среднеквадратической ошибки). Желательно, чтобы реальная вероятность ошибки  $p_{1 \text{ реал}} \leq p_1$ .

В зависимости от вида сигналов (например, вида модуляции) –  $M$  и условий передачи сигналов [например, возможных изменений («быстрых» флуктуаций) сигнала] –  $\Delta C$  по существующим методам оценки помехоустойчивости определяется требуемое отношение мощность сигнала/мощность помехи  $(P_c/P_{\text{пом}})_{\text{дБ}} = \rho_{\text{дБ}} = F(M, \Delta C)$ .

Затем при известных уровнях (мощности) помех  $P_{\text{помдБ}}$  находится необходимый уровень принимаемого сигнала  $P_c = P_{\text{ПР дБ}} = \rho_{\text{дБ}} + P_{\text{пом дБ}}$ , дБ.

При известных характеристиках распространения (затуханий) сигнала  $a_M$  и флуктуациях его уровня  $\Delta P$  [см. (3,4)] определяется требуемая мощность передачи сигналов

$$P_{\text{ПРД}} \cdot D = P_{\text{ПР дБ}} + a_M + \Delta P = P_{\text{ПР дБ}} + (10n \lg R + K) + \Delta P, \text{ дБ.} \quad (9)$$

Использование *помехоустойчивости* как одного из параметров, определяющего *устойчивость сети связи* [см. соотношение (6=5)], подразумевает организацию связи с требуемым качеством, которое может быть нарушено при каких-либо внешних воздействиях на систему (сеть) связи. При отсутствии этих воздействий заданная помехоустойчивость должна сохраняться во всей зоне действия сети связи, что особенно касается подвижной радиосвязи. *Надежность связи* именно и характеризует такое сохранение помехоустойчивости.

Поэтому данная ранее *оценка надежности связи* на примере подвижной радиосвязи, как *параметра устойчивости связи*, позволяет заключить, что *надежность связи* является самостоятельной величиной, независимой от технической (аппаратурной) надежности и должна учитываться при живучести системы (сети) связи.

### Заключение

Проведена оценка методики определения надежности связи по зоне действия радиосистем (пространственной надежности), для радиосигналов, распространение которых подвержено случайным изменениям их уровня. Определена взаимосвязь надежности связи с устойчивостью и живучестью сетей связи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

### Библиографический список

1. "Правила технической эксплуатации первичных сетей взаимовязанной сети связи российской федерации. Книга 1. Основные принципы построения и организации технической эксплуатации". (Утв. Приказом Госкомсвязи РФ от 19.10.1998 N 187).
2. **ГОСТ 27.002-89** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. **Шимарев, В.Ю.** Надежность технических систем: учебник для студ. высш.уч. заведений/ В.Ю. Шимарев. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 304с.
4. **Туляков, Ю.М.** Пространственная надежность прохождения радиосигналов со сложной многолучевой структурой распространения в условиях города (на улицах и при проникновении в помещения) // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №5, часть 1, 2010. - С.75-84.



5. **Ли, У.** Техника подвижных систем связи: Пер. с англ./ Под ред. Пышкина И.М. – М.: Радио и связь, 1985. – 395 с.
6. **Маковеева, М.М.** Системы связи с подвижными объектами: учеб. пособие для вузов / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
7. **Милютин, Е.Р.** Повышение точности расчета ослабления поля с помощью калибровки и цифровых карт местности / Е.Р. Милютин, Г.О. Василенко //Электросвязь. 2004.- № 2– С.38-40.
8. **Туляков, Ю.М.** Системы персонального радиовызова / Ю.М, Туляков. – М.: Радио и связь, 1988–168 с.
9. Основы построения систем и сетей передачи информации. Учебн. пособие для вузов/ В.В. Ломовицкий, А.И. Михайлов, К.В. Шестак, В.М. Щекотихин; пол ред. В.М. Щекотихина – М.: Горячая линия-Телеком, 2005.-382.

**Yu .M. Tulyakov<sup>1,2</sup>, A.V. Pronin<sup>2,3</sup>,**

**TO THE QUESTION OF USE OF COMMUNICATION RELIABILITY AS ONE  
OF THE PARAMETERS FOR ASSESSING THE STABILITY  
OF A COMMUNICATION NETWORK**

Volga-Vyatka branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics,  
Nizhny Novgorod<sup>1</sup>, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva<sup>2</sup>,  
JSC "Design Bureau" Kuntsevo ", Nizhny Novgorod<sup>3</sup>

In the electrical and radio technology, parameters such as stability and survivability of the communication network are used. When assessing the quality of radio communications, a parameter of reliability of communication in time and in the radio coverage area has been introduced and used. This parameter is especially important for mobile communication systems, including cellular communications. Since the existing estimates of the stability of the communication network take into account only noise immunity, without taking into account the reliability of communication, it becomes necessary to use the reliability of communication as one of the parameters for assessing the stability of a communication network. The article defines the methods for assessing the reliability of radio communications and survivability and their joint use to determine the stability of a communication network.

**Keywords:** network and radio communication system, noise immunity, fluctuations in the level of radio signals, reliability of communication, survivability, stability of a communication network

Х.А. Шамасна, Н.Г. Андре

## РОЛЬ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается состав, основные направления развития и применения промышленного интернета вещей. Выделены возможности и задачи аналитики больших данных, формируемых в системах промышленного интернета вещей.

**Ключевые слова:** промышленный интернет вещей, мониторинг, аналитика, большие данные.

В настоящее время интернет вещей (IoT) представляет собой один из самых быстрорастущих сегментов информационно-телекоммуникационных технологий, которые привлекают большие объемы частных и государственных инвестиций [1].

Индустриальный интернет или промышленный интернет вещей (IIoT) представляет систему объединенных компьютерных сетей и подключенных промышленных (производственных) объектов со встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном режиме, без участия человека. Внедрение таких систем способно кардинально перестроить экономические и производственные процессы, исключить человека из заметной части технологических операций и обеспечить рост экономики. Например, с помощью IIoT множество устройств энергосистемы могут обмениваться данными в режиме реального времени, которые затем оперативно доставляются потребителям и поставщикам коммунальных услуг.

Выделяют [2] несколько общих факторов, которые влияют на выбор в пользу внедрения интернета вещей производителями из самых различных отраслей промышленности: сокращение издержек и повышение эффективности производства; обеспечение непрерывности производства; оптимизация бизнес-процессов; качественная аналитика и новый уровень работы с данными. Многие высокотехнологичные компании достигли значительного снижения затрат и сумели повысить свою прибыль за счет использования относительно простых методов интеллектуального анализа данных индустриального интернета вещей. При этом внедрение любых средств автоматизации, в том числе и технологий интернета вещей, оправдывается в той мере, которая определяется экономическим эффектом по сравнению с принятыми формами производства и бизнес-процессов. Соответствующий перечень показателей эффективности в промышленности [3] включает:

- сокращение производственного цикла выпуска продукции;
- улучшение энергоэффективности и снижение эксплуатационных расходов;
- улучшение планирования и сокращение сроков подготовки производства;
- повышение времени бесперебойной работы оборудования и сокращение его простоев;
- рост качества выпускаемой продукции и снижение числа рекламаций клиентов.

С функциональной точки зрения в архитектуре интернет вещей обычно выделяют [1] несколько уровней: оконечные устройства (средства идентификации, датчики, исполнительные устройства, носимая электроника), транспортный уровень (гетерогенная телекоммуникационная среда, включающая проводные и беспроводные сети) и уровень обработки данных

(интеллектуальные платформы, осуществляющие сбор, хранение, обработку, формирование решений и управляющих воздействий).

На нижнем уровне происходит сбор данных с датчиков и передача данных. Соответствующее аппаратное и программное обеспечение специфичны для рассматриваемой индустрии, поскольку требуют сопряжения с инженерным оборудованием (станками, турбинами, и т.п.). На следующем уровне происходит хранение данных, их предобработка приведение к единому формату, построение предсказательных моделей. В этом случае соответствующее программное обеспечение и необходимый для решения задач набор методов интеллектуального анализа данных будут мало зависеть от специфики индустриального приложения, поскольку требования к реализации соответствующих алгоритмов предсказательной аналитики в данном случае могут быть в значительной степени унифицированы. Третий уровень обеспечивает визуализацию результатов предсказательной аналитики и повышает эффективность принятия решений оператором системы. В данном случае реализация программного обеспечения может значительно зависеть от специфики системы управления жизненным циклом изделия.

Таким образом, концепция IoT предполагает установку датчиков, исполнительных механизмов, контроллеров и человеко-машинных интерфейсов на основное оборудование. Затем осуществляется сбор данных, после обработки которых может быть получена объективная и точная информация о состоянии предприятия, позволяющая автоматизировать процесс формирования обоснованных и эффективных решений. При обработке огромного массива разнородных данных важной задачей становится их фильтрация, аналитическая обработка и адекватная интерпретация. В настоящее время на рынке доступен ряд аналитических платформ, предназначенных для сбора, хранения и анализа данных о технологических процессах и событиях в реальном времени. Однако эти платформы ещё не позволяют полностью решать все возникающие задачи аналитики больших данных промышленного интернета вещей в различных предметных областях и отраслях промышленности.

Существующие в настоящее время системы мониторинга позволяют регистрировать большие потоки данных мониторинга, например, около  $10^3$  наблюдений/мс для теплоэлектростанции,  $10^4$  наблюдений/мс для завода металлопроката, 500 Гб за полет авиалайнера [1]. Однако огромные объемы, накапливаемых данных (bigdata) принципиально не могут быть обработаны операторами, а реализованные процедуры анализа данных позволяют рассчитывать обычно лишь стандартные статистики, не позволяющие решать задачи поддержки принятия сложных оптимизационных решений. На сегодня значительная часть данных может сохраняться, но не обрабатывается и полноценно не анализируется. В связи с тем, что эффективность обработки больших массивов данных, накапливаемых в различных системах мониторинга, пока не столь высока, представляется весьма актуальной разработка методов и технологий интеллектуального анализа данных, адаптированных к задачам и специфике промышленного интернета вещей, с учетом особенностей предметной области и предоставляемых сервисов.

Решения в области межмашинного взаимодействия (machine-to-machine, M2M), такие как телеметрия или наблюдения за состоянием производственных объектов, существуют достаточно давно и активно используются в различных отраслях, а именно, в машиностроении, транспорте, энергетике, добыче полезных ископаемых, торговле и логистике. Среди проектов, реализованных с участием коллектива сотрудников НГТУ, следует отметить систему комплексного мониторинга состояния магистрального газопровода, включающую подсистему обработки данных, прогнозирования и поддержки принятия решений, включая «Что-Если» анализ [4].

Процесс перехода от М2М к ПоТ подразумевает, что информация, полученная в ходе интеллектуального анализа данных, позволит быстрее и надежнее принимать решения, влиять на процессы без привлечения человека. Именно аналитика большого количества данных, которые создаются различными устройствами, выводит оптимизацию процесса на другой уровень. Аналитическая система в составе ПоТ проводит анализ данных и понимает, какое действие нужно предпринять. Большое количество рутинных процессов (например, мониторинг данных с объекта и осуществление действий на основании этих данных) может происходить автоматически и существенно влиять на производительность и оптимизацию операционной деятельности [5].

Эффект «больших данных» (Bigdata), накапливаемых в таких платформах ПоТ, и применение технологий машинного обучения (ML) позволяет в автоматизированном режиме настраивать алгоритмы управления по мере накопления исторических данных наблюдения, что принципиально невозможно в традиционных информационно изолированных АСУ. Таким образом, реализация концепции ПоТ позволяет перейти от обработки данных от одного объекта управления к обработке множества реализаций, формируемых для ансамбля объектов управления. Накопленный опыт [1] показывает, что переход на концепцию ПоТ позволяет оперативно реализовывать сложные сквозные полностью автоматизированные бизнес-процессы.

Одно из распространенных и эффективных применений ПоТ представляет предиктивное (предсказательное) техническое обслуживание. Предсказательное техническое обслуживание реализует один из способов управления техническим состоянием на основе прогнозирования [6]. Для построения предиктора находят всё большее использование методы машинного обучения, которые применяются к накопленным данным мониторинга о функционировании технических объектов. Процесс построения предиктивных моделей включает этапы формирования признаков, построения (обучения) модели, например, с помощью градиентного бустинга на основе деревьев решений, выбор (настройку) гиперпараметров метода машинного обучения, верификацию модели и т.п.

Основываясь на методах проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем [7], разработанных нейросетевых алгоритмах распознавания образов [8], способе и процедурах аналитической обработки информации [9], авторами поставлена и решается задача разработки системы поддержки принятия решений и аналитической обработки данных в промышленном интернете вещей. Внедрение ПоТ предоставляет возможность использования и анализа ансамбля реализаций, формируемых от совокупности наблюдаемых технических систем. Согласованная обработка такого ансамбля реализаций позволяет сравнивать и отбирать более эффективные процедуры прогнозирования и классификации, что способствует интеллектуализации системы распознавания образов и поддержки принятия решений [10].

Развитие методов обработки, анализа и преобразования данных в информацию и затем в знания (пирамида DIKW) предполагает, наряду со стандартизацией интерфейсов, однозначную интерпретацию понятий «данные», «информация» и «знания». Так, «данные» определяются как зафиксированный набор фактов, а «информация» как ответ, устраняющий неопределённость в источнике. Известные попытки стандартизировать представление знаний с помощью формальных языков, таких как RDF, OWL, пока так и не привели к общепринятым стандартам главным образом из-за массивности представлений исходных фактов, невозможностью работать с противоречивыми фактами и недостаточным быстродействием систем вывода. Любые данные должны сопровождаться метаинформацией об источнике получения, способе сбора и уровне точности, что поможет решить проблему достоверности данных ор-

ганизационными методами и избежать необходимости дорогостоящего использования дополнительных методов оценки достоверности.

При обработке информации она проходит через различные уровни абстракции. Таким образом, можно сформулировать задачи, связанные с проблемой структурированности. Необходимо создавать такие обработчики данных, которые автоматически отвечают на возможные вопросы пользователей, например, «есть ли на этой видеозаписи целевой объект?» или «сообщается ли в настоящей статье важная тематическая информация?». Реализацию наборов таких автоматических распознавателей можно назвать первичным уровнем интеллектуализации больших данных. Именно на этом этапе свои успехи продемонстрировали искусственные нейронные сети [8], которые к настоящему времени позволяют решать многие задачи распознавания на уровне, превосходящем человеческий.

Автоматизация извлечения знаний представляет следующий более высокий уровень интеллектуализации обработки больших данных. При этом знания понимаются как закономерности и причинно-следственные связи, позволяющие прогнозировать будущие состояния технических систем по известным предыдущим состояниям. Поэтому можно предположить, что системы обработки данных будут развиваться в сторону автоматизации извлечения, применения и представления знаний.

Проблема исследования и разработки системы интеллектуальной обработки больших данных заключается в том, что реализация интеллектуальных информационных систем представляет собой достаточно длительный и трудоемкий процесс, который еще полностью не отработан и основан на постоянном обновлении решений, влечет использование неординарных подходов, методов, технологий и средств, всё ещё в значительной мере определяется талантом и опытом ее разработчиков. Кроме того, важную роль играет выбор наилучшего комплекса средств разработки, что представляет задачу отдельного исследования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. Перспективные рынки и технологии интернета вещей: публичный аналитический доклад. – М.: ООО«Лайм», 2019. – 272 с.
2. Исследование IoT 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://iotas.ru/files/documents/wg/pdf>
3. Industrial Internet of Things – IoT. Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс].
4. URL:<http://www.tadviser.ru/index.php/>
5. **Милов, В.Р.** Поддержка принятия решений при мониторинге технического состояния магистральных газопроводов / В.Р. Милов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. № 3. С. 37-42.
6. **Москаленко, Т.А.** Архитектуры промышленного интернета вещей / Т.А. Москаленко, Р.В. Киричек, А.С. Бородин // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. С. 49-56.
7. **Милов, В.Р.** Способ управления техническим состоянием на основе прогнозирования / В.Р. Милов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 2. С. 5-11.
8. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.

9. **Баранов, В.Г.** Нейросетевые алгоритмы распознавания образов / В.Г. Баранов, В.В. Кондратьев, В.Р. Милов, Ю.Х. Зарипова // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. № 11. С. 20-27.

10. **Баранов, В.Г.** Способы аналитической обработки информации для системы поддержки принятия решений / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, Б.А. Суслов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 2. С. 12-15.

11. **Баранов, В.Г.** Интеллектуализация системы распознавания образов на основе сравнения эффективности методов классификации / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, Ю.Х. Зарипова, А.Ю. Эпштейн // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 2. С. 35-39.

**H.A. Shamasna, N.G. Andre**

## **THE ROLE OF BIG DATA ANALYTICS IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The composition, the main directions of development and application of the industrial Internet of things are considered. The capabilities and tasks of big data analytics generated in the systems of the industrial Internet of things are highlighted.

**Keywords:** Industrial Internet of Things, monitoring, analytics, big data.

С.В. Шахтанов

## ИСПРАВЛЕНИЕ ОШИБОК КОДОВОГО ВЕКТОРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,  
г. Княгинино

Рассматриваются вопросы обмена данными на крупных центрах обработки данных (ЦОД) в условиях воздействия деструктивных факторов с сохранением заданных параметров надёжности и достоверности при применении методов исправления ошибок кодового вектора для увеличения скорости передачи. В качестве среды передачи предусматриваются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), позволяющие обеспечить скорость до сотен гигабит в секунду. В качестве решения задачи предлагается применение на одномодовых и многомодовых ВОЛС модуляции оптического сигнала РМ-4. Увеличение достоверности при воздействии помех возможно введением принципа исправления ошибок методом упреждения FEC (Forward Error Correction) на основе кодов Рида-Соломона (РС) с использованием мягких решений символа (МРС) и перестановочного декодирования (ПД).

На основе предлагаемой методики даётся оценка использования принципов обработки сигналов, которые позволяют, кроме повышения надёжности и достоверности, обеспечить маскирование сигнала для защиты от спуфинга, получить энергетический выигрыш кода (ЭВК) для увеличения дальности связи и сократить время обработки данных с выравниванием времени обработки разных кодовых векторов, что снижает возможность тайминговых атак. Метод комплексной обработки кодового вектора в реальных условиях с использованием всего пакета описываемых принципов, позволяет предложить варианты развития процесса по увеличению оперативности обмена данными в ЦОД, что в конечном итоге повышает достоверность, увеличивает дальность связи, сокращает время обработки пакета данных и позволяет обеспечить защиту от спуфинговых и тайминговых атак.

**Ключевые слова:** мягкое декодирование, двоичные коды, отношение сигнал/шум, когнитивная карта, эталонная матрица.

### Введение

Рост скорости обмена данными сегодня особенно актуален в условиях создания крупных ЦОД общегосударственного и ведомственного масштабов. Требуемые скорости в сотни гигабит в секунду достижимы только на ВОЛС с когерентной передачей сигнала [1]. Это даёт возможность кроме волнового мультиплексирования WDM применять и пространственное мультиплексирование, что уже сулит экономический эффект за счёт сокращения необходимых физических линий связи. Когерентные сети позволяют применение сложных многоуровневых видов модуляции, которые дают возможность кратно увеличить скорость обмена, но критичны к уровню шумов в канале связи [1, 2]. Примером удачного внедрения многоуровневого кодирования служит внедрение технологии xDSL на медных линиях связи абонентского доступа, где по линиям с расчётной частотой передачи сигнала в единицы килогерц, стал возможен обмен на частоте до 10 мегагерц.

Одной из сложностей построения когерентных сетей является фазовый шум передающего лазера, который приводит к искажению векторной диаграммы на приёмном конце и затрудняет однозначное распознавание элементов кодового вектора.

В отличие от классических методов декодирования, рассматриваемый метод исправления ошибок FEC использует коды РС совместно с МРС и ПД на основе уже заполненной КК с возможными вариантами истинных комбинаций. Это даёт возможность в реальной обстановке исключить процесс производства вычислений и исправления ошибок для каждого нового кодового вектора, воспользовавшись готовым результатом из КК. Проведённые исследования результатов вычислений возможных комбинаций показали, что они носят циклический характер исходя из свойств групповых кодов, в силу чего требуемый объём памяти КК значительно уменьшается.

### Объект исследования

Предлагается рассмотреть поставленную задачу обмена информацией на ЦОД с максимальным исключением влияния деструктивных факторов, включая помехи, спуффинг и тайминговые атаки на основе кодов РС, относящихся к коротким помехоустойчивым блоковым кодам. Выбор решения определяется тем, что класс непрерывных кодов в условиях перспективной для ЦОД квантовой криптографии априори оставляет канал возможной дешифровки при анализе времени обработки пакетов данных [1]. При применении блоковых кодов время обработки различных кодовых векторов на основе ПД и КК становится взаимно соизмеримым.

Определение оптимального соотношения информационных  $k$  и избыточных символов  $r$  кодового вектора определяется как:  $r = n - k$ , где  $n$  – длина кодового вектора и в конечном итоге является компромиссом между скоростью обмена и его достоверностью. Кроме того может иметь место появление комбинаций из числа  $n$ , которые приводят к образованию невырожденных матриц, когда необходимо производить замену символов из числа  $r$  [4]. Следовательно, при процедуре ПД, заведомо необходимо производить проверку матриц на вырожденность, что в итоге сократит время обработки кодового вектора в декодере.

### Методы

Использование для декодирования МРС даёт возможность на получение ЭВК  $D_s$  согласно выражению  $D_s = 10 \lg(Rd_{\min})$  дБ, где  $R$  – относительная скорость кода, а  $d_{\min}$  – метрика Хэмминга. В случае жёстких решений  $D_s = 0$ , поскольку  $d_{\min} = 2$  и декодер не может исправлять ошибки [6]. При реализации МРС сравнение одинаковых позиций  $\lambda_i = \overline{0,7}$  позволяет сделать выбор символа с большей оценкой надёжности, что равноценно повышению  $d_{\min}$  на единицу. При выработке МРС в каналах с неизвестными параметрами используются свойства стирающего канала связи с широким интервалом стирания  $\Phi$  :

$$\lambda_i(z) = \left\lfloor \left\lfloor \frac{\lambda_{\max}}{\Phi \sqrt{E_b}} \times z_i \right\rfloor \right\rfloor, \text{ при } 0 \leq z_i \leq \Phi \sqrt{E_b}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  – максимальное значение МРС принятое в системе,  $\sqrt{E_b}$  – математическое ожидание принимаемых сигналов. Обычно  $0 \leq \Phi < 1$ , а  $z_i$  – текущее значение сигнала. Во время проведения машинного эксперимента было определено, что для двоичных кодов даже при низких отношениях сигнал/шум (С/Ш) в принятом кодовом векторе с использованием модуляции РАМ-4, больше половины символов имеют высокие значения МРС. В ходе единичного эксперимента интервал испытания включал в себя не менее  $10^6$  комбинаций, передававшихся по каналу связи с аддитивным белым гауссовским шумом. Результаты формирования МРС при различных отношениях С/Ш для вектора длины  $n = 15$  показаны на рис. 1 – 2.



Параметр  $\omega$  указывает на долю конкретной оценки  $\lambda_i$  в векторе длиной  $n=15$  за весь интервал испытания. Анализ результатов моделирования показывает, что максимум для оценки  $\lambda_i = 7$  по мере увеличения отношения сигнал/шум смещается вправо, что говорит о повышении потенциальной эффективности ПД и соответствует объективной реальности.

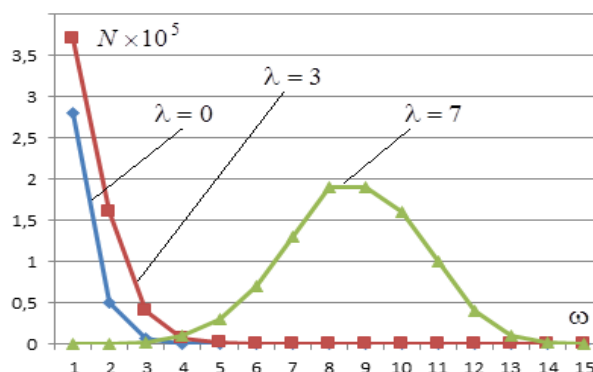


Рисунок 1. Частота появления SDI в кодировом векторе длины  $n=15$  при  $h=3$  дБ

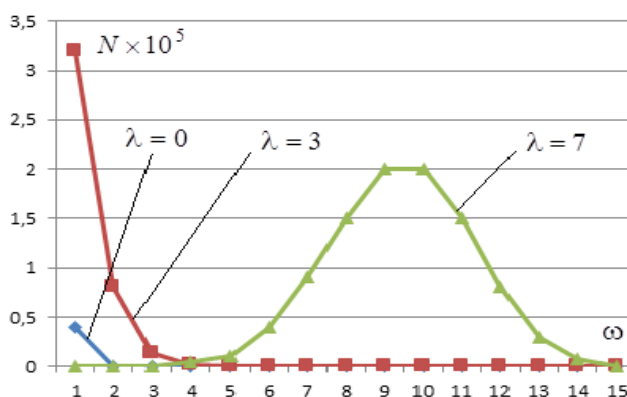


Рисунок 2. Частота появления SDI в кодировом векторе длины  $n=15$  при  $h=7$  дБ

При использовании недвоичных кодов для повышения спектральной эффективности ВОЛС имеется возможность применения сложных видов модуляции. При этом методы ПД сохраняют свои преимущества, однако выработка МРС получается более сложной [6, 7]. Для анализа применим метод сравнения гистограмм, построенных на основе правила (1) при известном значении лучшей  $\lambda_{\max}$

При анализе метода нижняя граница принималась равной нулю, а верхняя граница единице в условиях дополнительного нормирования оценки. Этот фактор является отрицательным, так как  $H_s(i) \geq H_d(i)$  всегда, где  $H_d(i)$  – текущая гистограмма.

$$[\lambda_{cr}(H_s, H_d)] = \sum_i \min(H_s(i), H_d(i)) = \sum_i H_d(i) \quad (2)$$

На верхней границе критерия гистограммы совпадают достаточно хорошо. Учитывая простоту реализации, в работе проведено имитационное моделирование процесса получения МРС на основе этого критерия с получением статистических данных для различных коэффициентов ошибок.

В ходе имитационного моделирования системы формирования МРС по методу пересечений для получения представительной выборки передавалось не менее  $10^6$  недвоичных сим-

волов из поля  $GF(2^4)$  или  $GF(2^8)$  с использованием амплитудной модуляции при различных отношениях  $C/\text{Ш}$ . [4, 5] Оценку надёжности недвоичного символа в поле  $GF(2^n)$  удобно производить по совокупности  $\lambda_i$ , где  $i = \overline{1, n}$ , в формате коэффициента правдоподобия

$$K_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_{\max}}. \quad (3)$$

При этом всегда выполняется условие  $0 \leq K_{np} \leq 1$ , что позволяет использовать его в вычислительном процессе без специальной нормировки как в случае попытки использования критерия пересечения гистограмм (2). Простота вычислительного процесса при оценке  $K_{np}$  очевидна, так как знаменатель в выражении (3) для данной системы является постоянным числом. В ходе исследований для поиска МРС использовалось выражение (3). Частота  $F$  появления различных оценок для параметра  $K_{np}$  при использовании различных степеней расширения двоичного поля  $n$  представлена на рис. 3. Для удобства чтения гистограмм на указанных рисунках по оси абсцисс введён поправочный коэффициент, равный 10.

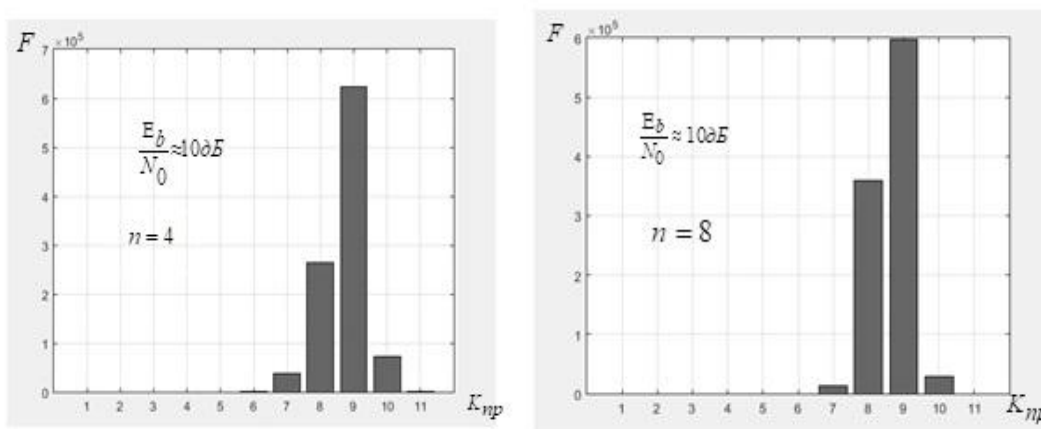
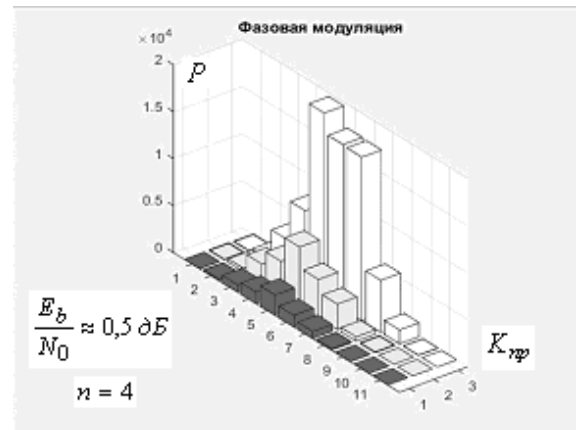
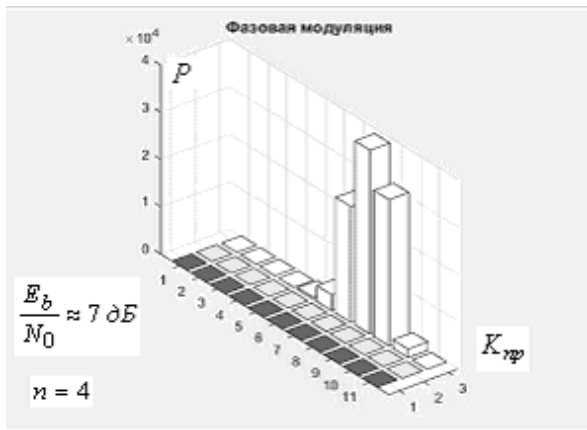


Рисунок 3. Частота показателей  $K_{np}$  для различных длин недвоичных символов

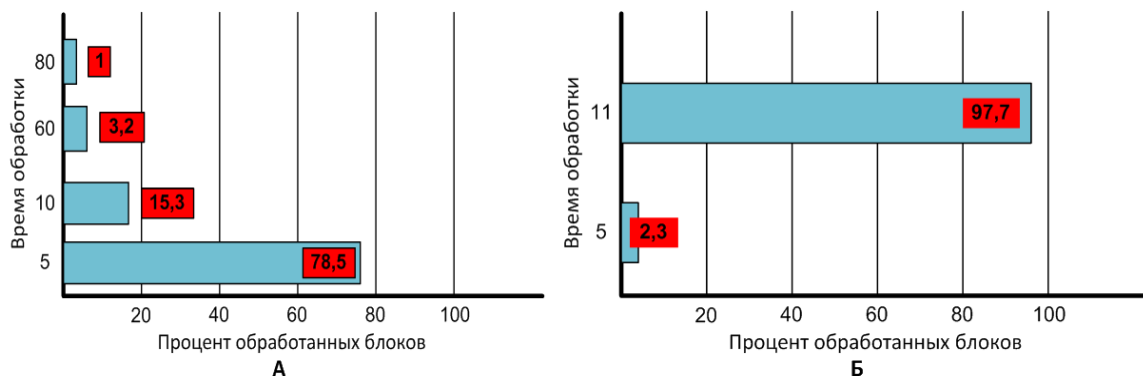
### Анализ результатов

Коды РС в системах обмена данными могут использоваться самостоятельно или в составе произведения кодов (каскадных конструкциях) на внешней ступени декодирования. Как правило, в качестве внутреннего кода в таких конструкциях используется код с проверкой на чётность. Тогда гистограммы когнитивной карты декодера на этапе формирования мягких решений должны учитывать статистику возникновения нечётных или чётных ошибок. Нечётные ошибки будут выявлены на внутренней ступени декодирования, и на этой основе сформированы стёртые позиции, которым однозначно присваивается наименьший индекс МРС. Чётные ошибки таким декодером не будут выявлены вообще. На рис. 4 представлены гистограммы при условии проверки символов кода РС на чётность внутренним декодером. Первый ряд показывает частоту появления чётных ошибок (левый ряд гистограмм), а средний ряд гистограмм указывает на появление нечётных ошибок. Правый ряд соответствует безошибочной фиксации символов кода РС. Именно чётные ошибки проявляются в качестве ошибочных недвоичных символов на второй ступени декодирования.



**Рисунок 4. Гистограммы оценки ошибочных решений приёма двоичного символа**

Данные ошибки необходимо исправлять на внешней ступени декодирования. На примере кодов РС видно, что перестановочное декодирование каскадных кодов приводит к снижению вычислительной сложности декодера за счёт образования детерминированных структур в вычислительном процессе декодирования. Это позволяет тратить на получение окончательного результата от 28% до 40% арифметических операций меньше в расширенном поле Галуа относительно классических методов декодирования [8]. Применение когнитивных процедур даёт дополнительный выигрыш в процедуре снижения вычислительной сложности декодера. На рис. 5 показаны временные соотношения для процедуры декодирования без использования и с использованием КК.



**Рисунок 5. Разброс временных затрат при декодировании кодов РС без использования КК, (А) и с её использованием (Б)**

В таблице приведён пример заполнения КК для кода РС (7, 3, 5). В верхней части таблицы показаны эталонные матрицы, которые преобразуются за счёт перестановки их столбцов и строк в зависимости от показателей МРС и соответствующего этим простановкам типа ярлыка КК. Следовательно, на каждую операцию требуется всегда одинаковое число операций, равное числу длины кодового вектора и одинаковое время соответственно.

**Образец таблицы ярлыков когнитивной карты для кода РС (7, 3, 5)**

$G_{сис}^1$	$G_{сис}^2$	$G_{сис}^3$	$G_{сис}^4$	$G_{сис}^5$
123 – 4567 – 1	124 – 3567 – 2	125 – 3467 – 3	126 – 3457 – 4	127 – 3456 – 1
123 – 4567	124 – 5673	125 – 6734	126 – 7345	712 – 3456

134 – 2567 – 1 341 – 2567	135 – 2467 – 5 135 – 6724	136 – 2457 – 5 613 – 4572	137 – 2456 – 2 713 – 4562	145 – 2367 – 3 451 – 2367
146 – 2357 – 5 461 – 2357	147 – 2356 – 3 714 – 5623	156 – 2347 – 2 561 – 2347	157 – 2346 – 4 715 – 6234	167 – 2345 – 1 671 – 2345
234 – 1567 – 1 234 – 5671	235 – 1467 – 2 235 – 6714	236 – 1457 – 3 236 – 7145	237 – 1456 – 4 237 – 1456	245 – 1367 – 4 452 – 3671
246 – 1357 – 5 246 – 7135	247 – 1356 – 5 724 – 5613	256 – 1347 – 3 562 – 3471	257 – 1346 – 5 572 – 3461	267 – 1345 – 2 672 – 3451
345 – 1267 – 1 345 – 6712	346 – 1257 – 2 346 – 7125	347 – 1256 – 3 347 – 1256	356 – 1247 – 4 563 – 4712	357 – 1246 – 5 357 – 1246
367 – 1245 – 3 673 – 4512	456 – 1237 – 1 456 – 7123	457 – 1236 – 2 457 – 1236	467 – 1235 – 4 674 – 5123	567 – 1234 – 1 567 – 1234

Схемы декодирования кодов РС до настоящего времени представляют собой довольно сложную вычислительную задачу. Типовая схема декодирования, получившая название авторегрессионного спектрального метода декодирования, состоит из следующих шагов:

- вычисление синдрома ошибки (синдромный декодер);
- построение полинома локаторов ошибок, посредством сложно реализуемого алгоритма АБМ или простого, но медленного алгоритма Евклида;
- нахождение корней данного полинома переборным методом, выполняемым обычно полным перебором возможных значений (алгоритм Ченя);
- определение характера ошибки, сводящееся к построению битовой маски, вычисляемой на основе обращения алгоритма Форни или любого другого алгоритма обращения матрицы;
- исправление ошибочных символов путём наложения битовой маски на информационное слово и последовательного инвертирования всех искажённых битов.

### Выводы

При наличии большого числа ошибок в кодовом векторе, классические методы декодирования не эффективны из-за низкой скорости обработки данных в процедуре подбора полинома ошибок. Метод ПД на основе двоичных кодов с применением КК для быстрых матричных преобразований в системе поиска эквивалентных кодов позволяет значительно снизить сложность реализации декодера при кратном снижении времени на обработку кодового вектора. Комплексное применение метода, кроме снижения общего времени декодирования при сохранении заданных требований по надёжности и достоверности, даёт энергетический выигрыш в канале связи, обеспечивает его зашумление без применения средств шифрования и производит обработку разных пакетов за одинаковые промежутки времени, обеспечивая защиту от дешифровки по таймингу. Выявлены закономерности циклических свойств групповых кодов РС, позволяющие значительно сократить объём памяти КК декодера.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-47-730011.*

### Библиографический список

1. **Гладких, А.А.** Методы согласования когерентных сетей с вычислительными возможностями кодеков /А.А. Гладких, Д.В. Мишин, Н.Ю. Чилихин, Р.З. Ибрагимов // Доклады XVI

Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях». - Уфа: УГАТУ, 2018. - Т. 2 - С. 40-41

2. **Гладких, А.А.** Концепция когнитивной обработки данных в системе перестановочного декодирования недвоичного избыточного кода / А.А. Гладких, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Электросвязь. – 2018. – № 9. – С. 69–74.

3. **Гладких, А.А.** Система быстрых матричных преобразований в процедуре формирования эквивалентных избыточных кодов / А.А. Гладких, Ал Тамими Таква Флайиих Хасан // Радиотехника. – 2017. – №6. – С. 41–44.

4. **Гладких, А.А.** Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. – № 8. – 2017, С. 52–56.

5. **Шахтанов, С.В.** Перестановочное декодирование недвоичных избыточных кодов // Вестник НГИЭИ – 2017. - №8, С. 7-14.

6. **Гладких, А.А.** Минимизация объёма памяти когнитивной карты декодера в системе поиска эквивалентных кодов / А.А. Гладких, Н.А. Пчелин, С.В. Шахтанов // Радиотехника.- № 6. – 2018, С. 38-41.

7. **Сорокин, И.А.** Применение итеративных преобразований при декодировании блочных кодов / И.А. Сорокин // Вестник НГИЭИ – 2017. - №2, С. 13-24.

8. **Gladkikh, A.A.** Development of Network Training Complexes Using Fuzzy Models and Noise-Resistant Coding / A.A. Gladkikh, Al. K. Volkov, An. K. Volkov, S.V. Shakhtanov // International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019) "Advances in Engineering Research" – Irkutsk, IRNTU, 2018, p.p. 188-191.

**S.V. Shakhtanov**

## **CORRECTION OF ERRORS OF THE CODE VECTOR BASED ON THE METHOD OF RESETTING DECODING**

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino

**Purpose of work:** The issues of data exchange at large data processing centers (DPCs) under the influence of destructive factors while preserving the specified parameters of reliability and reliability when applying methods for correcting code vector errors to increase the transmission speed are considered. As the transmission medium, fiber-optic communication lines (FOCL) are provided, allowing for speeds up to hundreds of gigabits per second.

**Methodology:** As a solution to the problem, it is proposed to use PAM-4 optical signal modulation on single-mode and multimode FOCLs. Increasing the reliability under the influence of interference is possible by introducing the FEC (Forward Error Correction) error correction principle based on Reed-Solomon (PC) codes using soft symbol solutions (MPC) and permutation decoding (PD).

**Results:** Based on the proposed methodology, an assessment is made of the use of signal processing principles that, in addition to increasing reliability and reliability, provide signal masking to protect against spoofing, obtain an energy code gain (EEC) to increase the communication range, and reduce data processing time with equalized processing time different code vectors, which reduces the possibility of timing attacks.

**Conclusions:** The method of complex processing of the code vector in real conditions using the entire package of the described principles allows us to offer options for the development of the process to increase the efficiency of data exchange in the data center, which ultimately increases reliability, increases the communication range, reduces the processing time of the data packet and allows protection from spoofing and timing attacks.

**Keywords:** soft decoding, non-binary codes, signal-to-noise ratio, cognitive map, reference matrix.

## Секция 2. Информационное обеспечение систем автоматизации промышленных объектов

УДК 004.896

А.А. Азарченков, М.С. Любимов, В.И. Лушков

### АЛГОРИТМ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСНЫМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Брянский государственный технический университет

Создание полностью автономного транспортного средства на сегодняшний день является одной из актуальных тем для исследований. Многие компании, в том числе и в нашей стране, заинтересованы в создании такой системы, которая способна осуществлять беспилотное движение по дорогам общего пользования наравне с другими участниками дорожного движения. Данная система должна решать обширный набор задач, одной из которых является движение в рамках дорожной разметки. В статье рассматриваются основные способы решения этой задачи, а также подробно описывается один из них. Для реализации алгоритма был собран обучающий набор данных, тестовый колесный робот, обучена нейронная сеть, которая определяет угол поворота рулевого колеса. Алгоритм реализован с использованием макета городской инфраструктуры.

**Ключевые слова:** сверточная нейронная сеть, компьютерное зрение, сегментация, распознавание дорожной разметки, OpenCV, TensorFlow.

#### Введение

В настоящее время происходит активное внедрение искусственного интеллекта в различные аспекты жизни общества. Искусственный интеллект позволяет не только улучшить качество жизни, но и берет на себя задачи, которые выполнялись людьми до этого. Одной из таких задач является управление транспортным средством. Тем не менее данная задача, особенно если речь идет об автомобилях, очень сложна и требует быстрого принятия решения, опираясь на множество факторов.

Анализируя процесс управления транспортным средством, мы можем выделить ряд отдельных задач, таких как распознавание дорожных знаков, светофоров, других объектов, составление маршрута движения, осуществление маневров, прогнозирование траектории других участников дорожного движения и т.д. В рамках данной статьи было принято решение рассмотреть задачу управления транспортным средством, опираясь на дорожную разметку. Условно его можно разделить на распознавание разметки, которое происходит в явном или неявном виде, а также принятие решения о необходимом угле поворота рулевого колеса, в зависимости от результата, полученного на предыдущем этапе.

Инженерный аспект данной задачи не будет затронут, однако сам алгоритм был протестирован с помощью собранного макета городской среды и колесного робота [1]. При проектировании макета городской инфраструктуры преследовалась задача создания модели, приближенной к реальному участку дороги, с точки зрения задач, стоящих перед искусственным

интеллектом. Так как этап тестирования концепций будущих алгоритмов является особенно важным, в связи с опасностью проведения тестов на реальных автомобилях, бортовой компьютер расположен не на колесном роботе, а установлен отдельно. Это позволяет проводить тесты алгоритмов высокой вычислительной сложности.

### **Описание популярных подходов к распознаванию дорожной разметки**

Существуют различные подходы к решению задачи управления беспилотным транспортным средством по линиям разметки. Первая группа основана на алгоритмах компьютерного зрения [5-6]. В рамках этих алгоритмов происходит явный процесс распознавания дорожной разметки теми или иными приемами компьютерного зрения. Зачастую эти приемы основаны на распознавании кривых, вдоль которых изменяется яркость на изображении. Такими прямыми и являются контрастные линии разметки. Для этих целей можно использовать детектор границ Канни [7]. Дальнейшая задача сводится к определению необходимого угла поворота беспилотного транспортного средства. Данный подход был также реализован с использованием макета дорожной инфраструктуры [3].

Данный подход обладает рядом недостатков, основным из которых является то, что даже кратковременное отсутствие разметки, связанное с её качеством или погодными условиями, приводит к невозможности движения транспортного средства. Кроме того, влияние внешней среды усложняет процесс распознавания.

Следующая группа алгоритмов основана на нейросетевом подходе. Для каждого из них большую роль играет обучающая выборка. В случае, если обучающая выборка не охватывает все ситуации или типы объектов, возможные на дороге, алгоритм может действовать неверно. Например, задачу определения линий разметки можно решить с помощью сверточной нейронной сети [8]. Одним из возможных решений является определение полосы с помощью сегментации изображения алгоритмами компьютерного зрения [9]. Сегментированная дорога передается на вход нейронной сети, которая определяет один из 5 заранее заданных углов отклонения рулевого колеса [4]. Данный способ включает в себя как алгоритмы компьютерного зрения, так и нейросетевые алгоритмы. Недостаток заключается в том, что операция сегментации имеет большую вычислительную сложность и так же подвержена ошибкам, из-за которых сегмент может быть выделен неверно.

Один из вариантов минимизации ошибок сегментации заключается в использовании для этих целей нейронной сети [10]. В данном примере [11] происходит сегментация дорожной полосы, после чего происходит определение угла поворота рулевого колеса. Также одним из вариантов решения задачи является использование end-to-end нейронных сетей [12]. Так принято называть нейронные сети, которым для входных данных не требуется никаких обработок и на выходном слое нейронная сеть возвращает необходимую информацию.

### **Алгоритм определения угла поворота с помощью end-to-end нейронной сети**

В основе реализованной нейронной сети лежит следующая архитектура (рис.2). На вход нейронной сети подается необработанное изображение с камеры в разрешении 66x200. На выходе нейронная сеть возвращает угол поворота рулевого колеса в радианах.

В отличие от первоначальной архитектуры в сеть были добавлены слои исключения (Dropout) [13]. Они осуществляют отсеивание части изображений на определенном слое нейронной сети, что позволяет уменьшить проблему переобучения нейронной сети. Кроме того, в

рамках обучения использовалась аугментация данных, что позволяет разнообразить обучающую выборку. Пример изображения, прошедшего аугментацию (рис.1.).

В качестве метрики нейронной сети использовалось среднее отклонение, полученного нейронной сетью угла от оптимального (рис. 3.). Обучение сети происходило на обучающей выборке размером 770 изображений и занимало 6000 эпох. Изменения функции потерь показаны на рис. 4. Итоговое среднее отклонение нейронной сети составило порядка 6 градусов от отклонения в обучающей выборке.

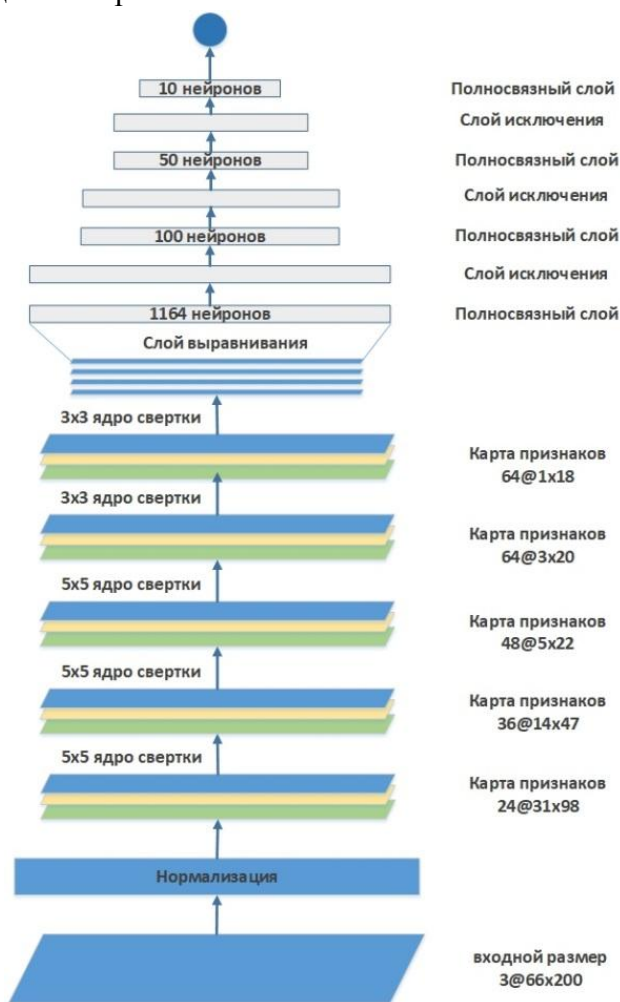


Рисунок 1. Архитектура нейронной сети



Рисунок 2. Изображения, прошедшие аугментацию

### Внедрение алгоритма

Для реализации алгоритма был собран беспилотный колесный робот под управлением одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 (рис. 5). Для создания датасета вначале осуществля-

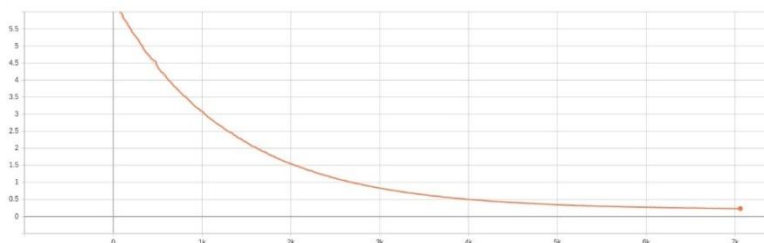


лась запись видео с камеры колесного робота при помощи удаленного управления. Затем для каждого кадра определялся угол поворота рулевого колеса. Было принято решение определять этот угол по следующей формуле:

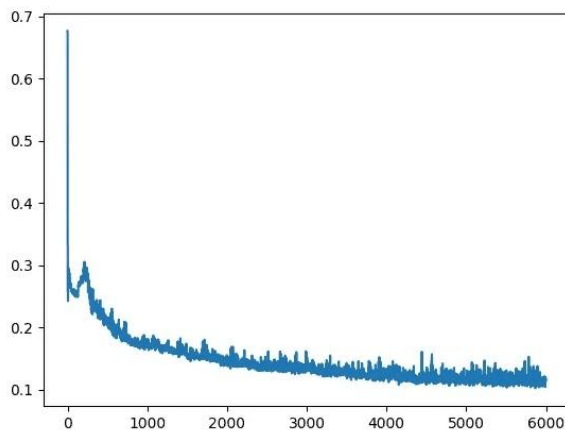
$$angle = \arctan\left(\frac{Ay - By}{Ax - Bx}\right) * 180/\pi \quad (1)$$

где точка  $A$  – центр машины  $B$ - точка, к которой должна стремиться машина. Это позволяет реализовать плавное подруливание на прямых участках и в тоже время получить большую величину угла на поворотах.

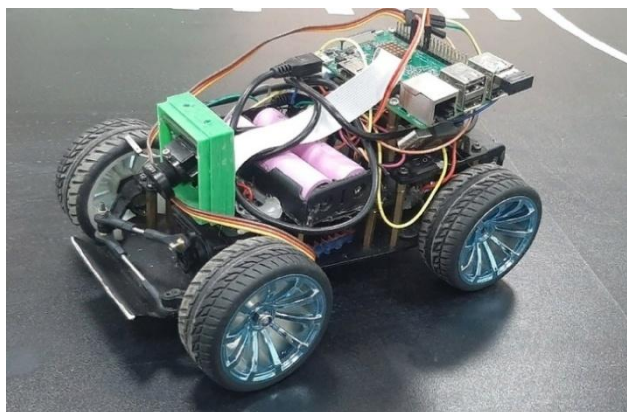
В реализации проекта было принято решения проводить вычисления не удаленно, а на борту колесного робота. Для этого на одноплатный компьютер была установлена специальная версия фреймворка машинного обучения tensorflow.



**Рисунок 3. Изменения функции потерь**



**Рисунок 4. Изменение точности нейронной сети**



**Рисунок 5. Беспилотный колесный робот**

## Заключение

В результате был произведен анализ методов управления беспилотными транспортными средствами вдоль линий разметки, был написан алгоритм решения этой задачи с использованием нейронной сети. Данный Алгоритм был протестирован на модели беспилотного колесного робота, способного автономно передвигаться вдоль линий разметки. Реализованный подход отличается своим быстродействием, относительно остальных алгоритмов. Однако end-to-end принцип усложняет возможность движения беспилотного транспортного средства на сложных участках, таких как, например, перекрестки. Тем не менее данный алгоритм в большей степени подходит для реализации в виде отдельной системы, например, в различных устройствах помощи водителю, таких как контроль полосы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00844.*

## Библиографический список

1. **Любимов, М.С.** Модель четырех колесного робота / А.А. Азарченков, М.С. Любимов, В.И. Лушков – Научные исследования и разработки молодых ученых. Сборник материалов XVII Международной молодежной научно-практической конференции. / Под общей редакцией С.С. Чернова. 2017 – 154-156 с.
2. **Lyubimov, M.S** The control system of the wheeled robot using a convolutional neural network/ Lyubimov M.S.,Lushkov V.I., Azarchenkov A.A. // International Conference «Scientific research of the scocountries:Synergy and integration»–Beijing, 2018–240-248 p.
3. **Лушков, В.И.** Описание алгоритма прямолинейного движения колёсного робота / Азарченков А.А., Любимов М.С., Лушков В.И. «21 век: фундаментальная наука и технологии» Материалы XV международной научно-практической конференции USA 2018 – 67-70 с.
4. **Lyubimov, M.S** The control system of the wheeled robot using a convolutional neural network/ Lyubimov M.S.,Lushkov V.I., Azarchenkov A.A. // International Conference «Scientific research of the sco countries: Synergy and integration» – Beijing,2018– 40-248 p.
5. **Yuanyuan, Li** «Lane Detection Based on Connection of Various Feature Extraction Methods»/ Mingfa Li, Yuanyuan Li, Min Jiang, August 2018Advances in Multimedia 2018(5):1-13.
6. **Moveh, Samue** ,«Development of Edge-Based Lane Detection Algorithm using Image Processing»/ MovehSamue, Maziah Mohamad, Shaharil Mad Saad, Mohamed Hussein, Jan. 2018, International Journal on Informatics Visualization, vol. 2, no. 1, , pp. 19 – 22.
7. **Wojciech, Mokrzycki**, « New version of canny edge detection algorithm»/ Wojciech, Mokrzycki, Jan. 2012, ICCVG, Chapter: I, Publisher: Springer, Editors: Bolcet all, pp.533-540.
8. **Donghoon Chang**, «Multi-lane Detection Using Instance Segmentation and Attentive Voting »/ DonghoonChang, VinjohnChirakkal ,ShubhamGoswami, 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2019) Oct. 15~18, 2019; ICC Jeju, Jeju, Korea.
9. **Hui, Kong**, «General road detection from a single image »/ Hui Kong, Jean-Yves Audibert, Jean Pon, Aug. 2010,IEEE Transactions on Image Processing, Volume: 19, Issue: 8, p.2211 - 2220.
10. **Annika, Meyer**,« Deep Semantic Lane Segmentation for Mapless Driving»/ Annika Meyer, N. Ole Salscheider<sup>1</sup>, Piotr F. Orzechowski<sup>1</sup>, Christoph Stiller, 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) Madrid, Spain.
11. **Michael, Person**, «Real Time Road Lane Segmentation and Tracking System »/ Michael Person,Mathew Jensen, Anthony O. Smith, 31th Florida Conference on Recent Advances in Robotics May 10-11, 2018, University of Central Florida, Orlando, Florida.

12. **Mariusz, Bojarski**, «End to End Learning for Self-Driving Cars»/ MariuszBojarski, Davide Del Testa, 2016 Journal, arXiv preprint arXiv:1604.07316.

13. **Nitish Srivastava**, «Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting»/ Nitish Srivastava,Geoffrey Hinton,Alex Krizhevsky. June 2014, Journal of Machine Learning Research 15.

**A.A. Azarchenkov, M.S. Lyubimov, V.I. Lushkov**

## **ALGORITHM FOR UNMANNED CONTROL OF A WHEELED ROBOT USING A NEURAL NETWORK**

Bryansk State Technical University

**Purpose:** This article is devoted to the analysis of existing methods for driving unmanned vehicles along road marking lines, implementing an end-to-end neural network to solve this problem. Implementation included data collection, training of a neural network, installing of a neural network on an unmanned wheeled robot

**Design/methodology/approach:**The methodology consists of using elements of the neural network training from beginning to end for subsequent application of the output data to control the wheel robot, as well as analyzing the accuracy of the output data and the computational complexity of the algorithm.

**Findings:**The use of the end-to-end method for a neural network turned out to be effective for solving a specific problem, which is confirmed by the high accuracy of the output parameter, as well as the speed of the algorithm.

**Research limitations/implications:**This research opens further prospects for both studying new modifications of this family of algorithms and for applying the current implementation of the algorithms to existing practical optimization problems.

**Originality/value:**The implementation of the algorithm showed good results when implementing the system. The resulting algorithm can be used in conditions of insufficient computing resources.

**Keywords:** convolutional neural network, computer vision, segmentation, recognition of road markings, OpenCV, TensorFlow.

Е. С. Важдаета

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ВКЛЮЧЕННЫХ В СОСТАВ КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ «КРЕМНИЙ»**

Филиал Российского федерального ядерного центра – всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова»

В статье описывается комплекс автоматизированных систем «Кремний»: цель его создания, назначение и задачи. Рассматривается принцип взаимодействия информационных систем, включенных в состав комплекса автоматизированных систем «Кремний». Приведены результаты функционирования систем, а также данные о проводимых испытаниях.

**Ключевые слова:** кристалльное производство, комплекс систем, информационная система, программное обеспечение, функциональное взаимодействие, планирование производства, управление производством.

### **Введение**

Целью создания комплекса автоматизированных систем «Кремний» (далее – КАС «Кремний») является разработка эффективного инструментария автоматизации производства современной радиационно-стойкой элементной базы.

КАС «Кремний» предназначен для информационной поддержки кристалльного и сборочного производства изделий микроэлектроники: кристалльного производства изделий микронной микроэлектроники, кристалльного производства изделий субмикронной микроэлектроники и сборочного производства микросхем в «Отраслевом центре твердотельной радиационно-стойкой микроэлектроники».

КАС «Кремний» обеспечивает организацию и управление производством изделий микроэлектроники кристалльного и сборочного производств на современном уровне путем увеличения эффективности информационного обмена между участниками производственного процесса.

Основными задачами, которые решает КАС «Кремний» являются:

- мониторинг и контроль процесса изготовления изделий микроэлектроники в едином информационном пространстве;
- оперативное и долгосрочное (до одного года) планирование процессов изготовления изделий микроэлектроники;
- прослеживаемость процессов изготовления партий микросхем с микронными и субмикронными проектными нормами;
- информационная поддержка процессов изготовления партий пластин с микронными и субмикронными топологическими нормами, процессов изготовления изделий микроэлектроники в сборочном производстве;
- мониторинг и контроль выполнения технического обслуживания технологического, контрольного, измерительного, испытательного и вспомогательного оборудования в кристалльном и сборочном производствах;

- мониторинг ресурсов, необходимых для изготовления изделий микроэлектроники в кристалльном и сборочном производствах;
- автоматизированная обработка логистической информации в кристалльном производстве с целью учета, хранения, распределения и обеспечения прослеживаемости объектов учета.

### Структура КАС «Кремний»

КАС «Кремний» представляет собой комплекс автоматизированных информационных систем, обеспечивающий информационную поддержку процесса изготовления микросхем с микронными и субмикронными топологическими нормами, и включает в себя следующие системы:

- автоматизированную информационную систему обеспечения информационной поддержки кристалльного производства изделий субмикронной микроэлектроники (АИС «Субмикрон»);
- автоматизированную информационную систему обеспечения информационной поддержки кристалльного производства изделий микронной микроэлектроники (АИС «Микрон»);
- автоматизированную информационную систему обеспечения информационной поддержки сборочного производства изделий микроэлектроники (АИС «Сборка»);
- автоматизированную информационную систему обеспечения календарного планирования процессов изготовления изделий микроэлектроники (АИС «Ока-план»);
- комплект информационной поддержки конструирования программного обеспечения (Комплект «Конструктор ПО»).

Программное обеспечение (ПО) КАС «Кремний» представляет совокупность программ, обеспечивающих функционирование всех систем, входящих в состав КАС «Кремний». Это ПО включает в себя:

- общее ПО, включающее в себя операционные системы. Общее ПО не привязано к конкретному объекту автоматизации, закупается и поставляется так же, как и технические средства;
- специальное ПО - это программы, разработанные или приобретенные для реализации функций КАС «Кремний»;
- инструментальное ПО (система программирования), обеспечивающее разработку новых программ для компьютера на языке программирования.

Для обеспечения функционирования КАС «Кремний» используется следующее общее программное обеспечение:

- СУБД Oracle 10g;
- СУБД Microsoft SQL Server 2005;
- ОС Microsoft Windows 2003 Server Standard Edition Service Pack2;
- ОС Microsoft Windows 7 и выше.

КАС «Кремний» состоит из взаимодействующих между собой автоматизированных информационных систем (АИС). АИС, в свою очередь, состоят из программных модулей (или одного модуля), которые реализуют законченный набор функций.

Разработка ПО КАС «Кремний» проводится на языке C#.

Взаимодействие между СУБД Oracle и Microsoft SQL Server осуществляется программным образом.

КАС «Кремний» представляет из себя систему, объединенную локальной сетью, и включает в себя автоматизированные рабочие места (АРМ) в количестве соответствующем структурам производственных подразделений.

### Функциональное взаимодействие в КАС «Кремний»

Функциональное взаимодействие автоматизированных систем, входящих в КАС «Кремний», представлено на рис. 1.

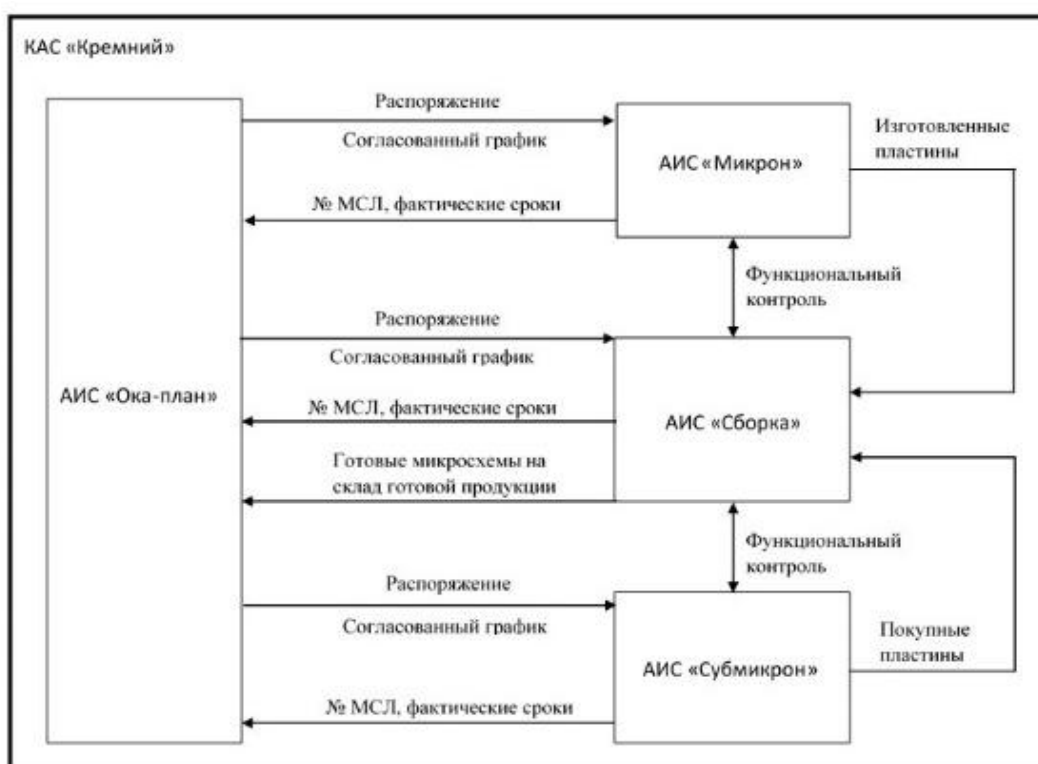


Рисунок 1. Схема функционального взаимодействия систем в КАС «Кремний»

Взаимодействие между информационными системами в КАС «Кремний» осуществляется следующим образом.

1. В АИС «Ока-план», исходя из утвержденного годового номенклатурного плана, выполняется расчет партий, в результате которого определяется: какое количество партий с заданным количеством пластин необходимо запустить в производство для изготовления требуемого количества микросхем. Далее для каждой партии выполняется планирование с учетом ранее запущенных в производство партий пластин, загрузки оборудования в производствах. В результате планирования формируется плановый график изготовления партий.

2. Плановый график в электронном виде отправляется на согласование в микронное (АИС «Микрон») или субмикронное (АИС «Субмикрон»), или сборочное (АИС «Сборка») производства.

3. После согласования планового графика в АИС «Ока-план» готовится распоряжение на запуск партии пластин в производство, которое отправляется в соответствующее производство.

4. После получения распоряжения в микронном или субмикронном производствах осуществляется запуск изготовления партии с учетом согласованного планового графика изготовления и в АИС «Ока-план» передается номер маршрутно-сопроводительного листа.

5. По мере изготовления партии в АИС «Микрон» или АИС «Субмикрон» формируется и отправляется в АИС «Ока-план» информация о процессе изготовления, включающая в себя фактические сроки выполненных операций и количественные данные после выполнения операции.

6. В процессе изготовления пластин на кристальном производстве осуществляется автоматическое формирование маршрутно-сопроводительных листов для выполнения функционального контроля и получения электронных карт пластин. Результаты функционального контроля в режиме «он-лайн» доступны в производстве, которое направило эту партию (АИС «Микрон» или АИС «Субмикрон»).

7. По окончании изготовления партии в микронном или субмикронном производствах в АИС «Ока-план» выполняются расчет и планирование партий для сборочного производства. Далее осуществляется процедура согласования графика через АИС «Сборка» и подготовки распоряжений в сборочное производство на запуск процесса сборки микросхем.

8. После получения партии пластин в сборочном производстве осуществляется резка пластин на кристаллы и сборка микросхем.

9. После завершения процесса сборки микросхем в АИС «Ока-план» формируются данные о готовых микросхемах. После этого микросхемы передаются на склад готовой продукции.

### **Результаты функционирования КАС «Кремний»**

С помощью функционирования системы КАС «Кремний» осуществлен запуск изготовления следующих микросхем:

- в микронном производстве – серийных, опытных, макетных и экспериментальных микросхем;
- в субмикронном производстве – микросхем с покупными пластинами (пластинами с кристаллами заказных элементов).

### **Выводы**

Разработка программного и информационного обеспечения КАС «Кремний» проводилась с целью создания комплекса автоматизированных систем для управления данными кристального и сборочного производства.

КАС «Кремний» связывает воедино верхний уровни управления планирования и технологический цикл управления производством БИС и СБИС в единый информационный комплекс. Получая информацию непосредственно с производственного уровня, КАС «Кремний» обеспечивает:

- возможность контролировать процесс выполнения производственного плана;
- возможность собирать и передавать в систему планирования актуальные данные о состоянии кристального и сборочного производств;

- осуществлять поставку готовой продукции по заключенным договорам.

Обеспечение прослеживаемости процесса изготовления партий пластин кристального производства и микросхем сборочного производства с использованием технологии штрихового кодирования позволяет снизить время на выполнение технологических операций за счет устранения «ручного» ввода информации о фактах перемещения партий пластин, микросхем и выполнения технологических операций, а также повысить актуальность данных и подконтрольность производственного процесса.

В III квартале 2019 года были проведены предварительные испытания всех систем из состава КАС «Кремний» по отдельности и КАС «Кремний» в целом. В настоящее время система КАС «Кремний» находится в опытной эксплуатации.

### Библиографический список

1. **Фленов, М.Е.** Библия С# / М.Е. Фленов. – БХВ-Петербург, 2016. – 544 с.: ил.
2. **Васильев, А. С#.** Объектно-ориентированное программирование: учебный курс / А.С. Васильев. – СПб.: Питер, 2012. – 320 с.: ил.
3. **Дейт, К.Дж.** SQL и реляционная теория. Как грамотно писать код на SQL/ К.Дж. Дейт. – М.: Символ-плюс, 2016

**E.S. Vazhdaeva**

### INTERACTION OF INFORMATION SYSTEMS INCLUDED IN THE COMPLEX OF AUTOMATED SYSTEMS “KREMNIY”

**Purpose:** This article is devoted to the interaction of information systems included in the complex of automated systems “Kremniy”. The article describes the principle of interaction of systems and the results of this interaction.

**Design/methodology/approach:** The design intended for data management of crystal and assembly plants. The system allows you to reduce the time for performing technological operations by eliminating manual input of information, as well as increase the relevance of data and control of the production process.

**Findings:** The information received from the production level allows the system to control the process of implementing the production plan, collect and transmit up-to-date data on the state of production to the planning system, and deliver finished products under concluded contracts.

**Research limitations/implication:** This system designed for the Industry center of solid-state radiation-resistant microelectronics.

**Originality/value:** During the operation of the system, several types of chips were put into production. In 2019, the system passed preliminary tests. The system is currently in trial operation.

**Key words:** crystal production, complex of systems, information system, software, functional interaction, production planning, production management.



**В. П. Зеленский, Ю.Н. Киселев, И.С. Овчинников**

## **РАСШИРЕНИЕ ПАКЕТА ANALYZER**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

В докладе проводится анализ модели работы синхронного режима микросхемы КР580ВВ51, составление алгоритмов, создание программной модели синхронного режима микросхемы в пакете Analyzer. Приводятся результаты тестирования доработанной модели в симуляторе и анализ самого тестирования.

**Ключевые слова:** микроконтроллер КР580ВВ51, алгоритм работы синхронный режима микроконтроллера КР580ВВ51, режим синхронной передачи микроконтроллера КР580ВВ51, режим синхронного приёма с внутренней синхронизацией микроконтроллера КР580ВВ51.

### **Введение**

При проектировании цифровых и аналоговых систем используются симуляторы, позволяющие существенно упростить и сократить время выполнения почти всех этапов разработки, а возможность моделирования работы создает уверенность в правильности принятых решений. Задача проектирования и моделирования работы программируемых устройств, содержащих микропроцессоры и микроконтроллеры – одна из актуальных задач проектирования систем. Современные симуляторы зарубежных фирм дороги. Кафедрой «Вычислительные системы и технологии» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева был разработан пакет Analyzer – симулятор аналого-цифровых систем. Analyzer постоянно расширяется с помощью студентов кафедры, наращивается база моделей контроллеров, логических и аналоговых микросхем. Пополнение моделей контроллеров в базе симулятора и расширение их функционала является актуальной задачей. В частности поддержка синхронного режима работы контроллера КР580ВВ51, режима, позволяющего организовать обмен пакетами, который является основным способом передачи данных в локальных и глобальных сетях. Контроллер КР580ВВ51 в пакете Analyzer исправно функционирует только в асинхронном режиме, синхронный режим не поддержан.

### **Описание пакета Analyzer**

Программа - симулятор Analyzer был разработан с помощью инструмента Embarcadero RAD Studio 2010 на языке C++ и предназначен для запуска в ОС Microsoft Windows. Симулятор поддерживает автоматическое добавление компонентов, реализованных в виде dll и помещенных в корневой каталог симулятора.

Недостатком пакета Analyzer является неполный функционал некоторых контроллеров, реализованных в симуляторе. Так как модель контроллера KP580BB51 не поддерживает синхронный режим работы.

Изменение компонентов проекта в Embarcadero RAD Studio 2010 проводится достаточно стандартным образом. При изменении исходных файлов следует сохранить их, а затем собрать соответствующую dll. Тогда в каталоге «release» проекта появится новая версия плагина.

### **Микроконтроллер KP580BB51 и особенности синхронного режима**

Микросхема KP580BB51 – программируемый универсальный синхронно-асинхронный приёмопередатчик, обеспечивающий аппаратную реализацию обмена данными в последовательной форме между источником и приёмником. При программировании задаётся режим его работы, синхронный или асинхронный и параметры протокола. Целью данной работы является моделирование синхронного режима с внутренней синхронизацией контроллера KP580BB51.

Синхронный режим обладает более высокой производительностью обмена за счёт отсутствия между кодами символов служебной информации. Передатчик в этом режиме при отсутствии информационных данных автоматически вставляет в поток коды специальных синхросимволов для поддержки синхронизации приёмника и передатчика, коды, которые также могут играть роль адреса приёмного устройства. Работа приёмника начинается с поиска синхросимвола, и только получив его, приёмник, анализируя следующий принятый код, определяет – это код данных.

Структура пакета в канале связи приведена на рис. 1. Задачи приёмника: анализ поступающей информации, отделение полезной информации от синхросимволов и формирование сигнала прерывания для процессора.



**Рисунок 1. Структура пакета в канале связи**

### **Алгоритм приёма и передачи данных**

Микросхема KP580BB51 – универсальный синхронно-асинхронный приёмопередатчик, поэтому алгоритм его работы разделяется на алгоритмы работы приёмника и передатчика.

Для решения поставленной задачи, а именно для создания программного модуля синхронного режима работы контроллера KP580BB51, были созданы алгоритмы передачи и приема данных (рис. 2 и рис. 3).

Передатчик микроконтроллера KP580BB51 в синхронном режиме передаёт бесконечный поток слов. Если у передатчика есть слова для отправки, то он передаёт их приёмнику. Если же нет – передаёт синхросимвол (для режима с одним синхросимволом) или синхросимволы (для режима с двумя синхросимволами). Если нет контроля по четности / нечетности, то бит контроля не вставляется в конец посылки. Если есть контроль по четности / нечетности, то в конце посылки слова данных / синхросимвола / двух синхросимволов посылается соответствующий бит контроля. Для режима с контролем по четности бит контроля равен единице, если в передаваемом слове содержится нечетное число разрядов, установленных в положение «1», и равен «0» в противоположном случае. Для режима с контролем по нечетности всё наоборот.

В начале приёма данных включен режим поиска синхросимволов. Из чего следует, что данные, принимаемые до первых синхросимволов, не воспринимаются приемником. Только тогда, когда пришла первая партия синхросимволов, приёмник входит в режим синхронизации и начинает считывать данные, отличая от них синхросимволы.

Представленный далее (рис. 3) алгоритм описывает механизм работы приёмника до захвата синхронизации. Следует пояснить, что «SYNDET = 1» означает захват синхронизации. После захвата синхронизации приёмник начинает принимать данные, сравнивая их с синхросимволом/парой синхросимволов. В конце каждой партии синхросимволов вырабатывается соответствующий сигнал SYNDET. Также проверяется и правильность формата принятых данных.

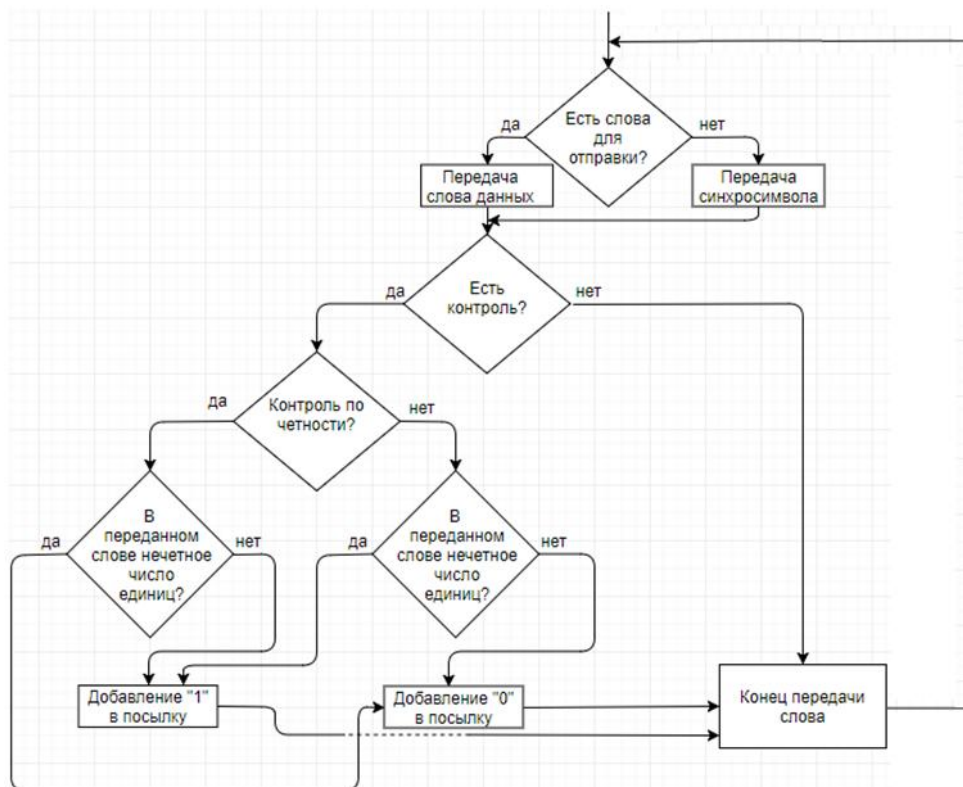


Рисунок 2. Алгоритм передачи данных

По описанным ранее алгоритмам был составлен и внедрён в пакет Analyzer программный код для синхронного режима работы контроллера KP580BB51. По

итогах внедрения кода в симулятор в корневом каталоге Analyzer`а обновилась динамическая библиотека «usart.dll», которую в дальнейшем можно использовать для обновления механизма работы микроконтроллера в программе.

Специально для анализа работоспособности синхронного режима была собрана экспериментальная схема (рис.4).

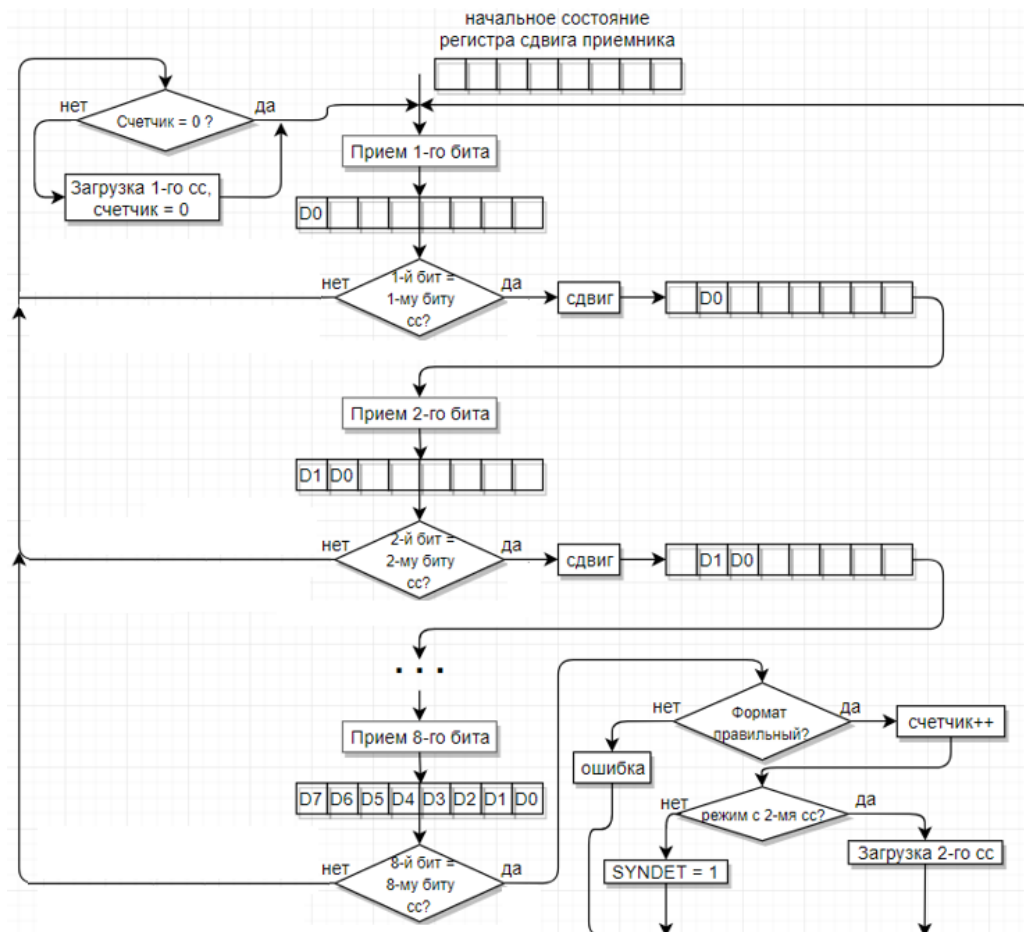


Рисунок 3. Алгоритм захвата синхронизации

### Тестирование

Схема содержит центральный процессор (DD1), системный контроллер (DD2), память (DD3), микроконтроллер KP580BB51 (DD6), и другие элементы. Системный контроллер формирует управляющие сигналы. Микропроцессор берёт из памяти команды, в которых содержатся данные, затем загружает их в микроконтроллер KP580BB51. Передатчик отправляет эти данные приемнику.

Также, в память была загружена программа, включающая настройку контроллера, установка синхросимвола «8eH», установка второго синхросимвола «6bH» (для тестирования режима с двумя синхросимволами), байт данных «54h», на который приёмник не должен был реагировать, потому что ещё не вошёл в режим синхронизации, и байты данных «12h» и «34h», на которые приёмник должен был реагировать, потому что к этому моменту уже должен был произойти захват синхронизации. Далее ЦП должен был выполнять бесконечный пустой цикл.

Проанализировав временные диаграммы для режимов с одним синхросимволом и контролем по нечетности и с двумя синхросимволами без контроля (рис. 5), можно сделать вывод, что все сигналы вырабатываются верно и в свою очередь.

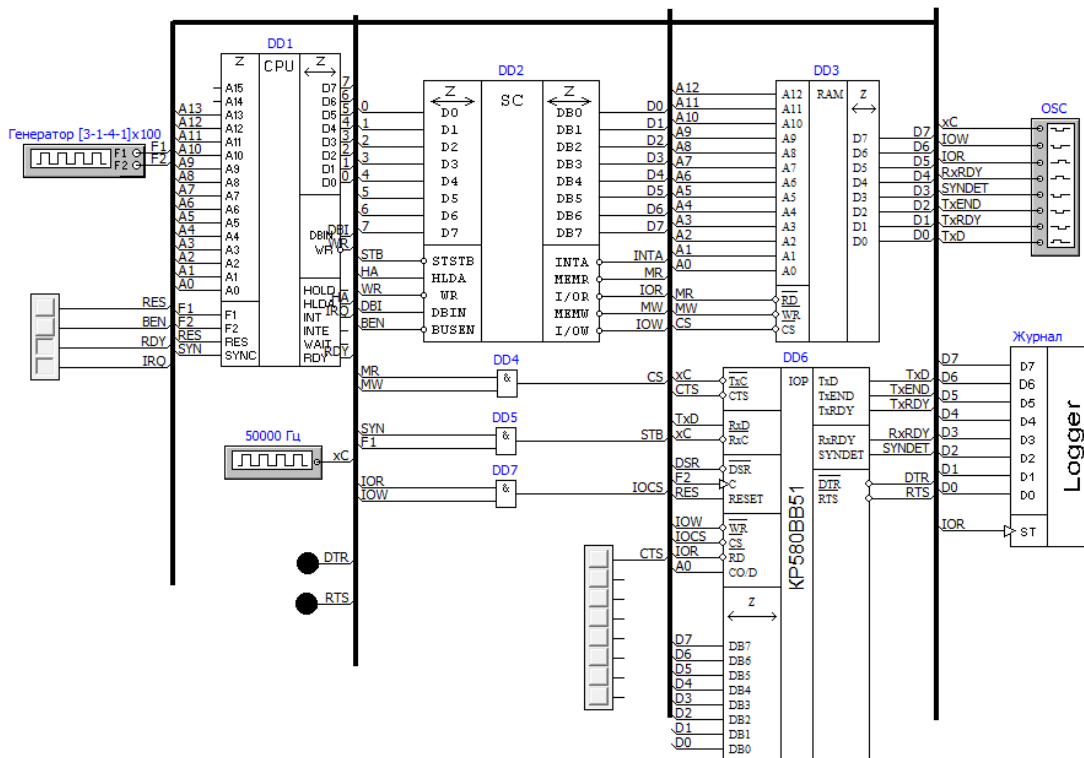


Рисунок 4. Экспериментальная схема для тестирования

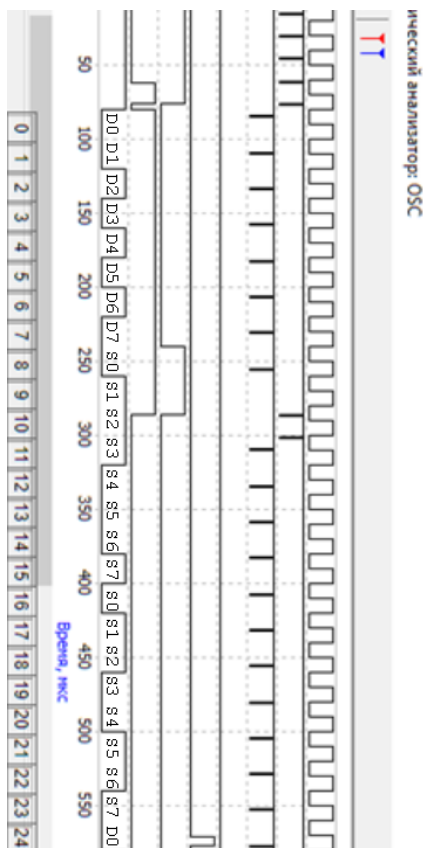


Рисунок 5. Временные диаграммы для режима: с одним синхросимволом и контролем по нечётности (слева) и для режима с двумя синхросимволами и без контроля (справа)

## Заключение

Проектирование и обучение микропроцессорным системам с помощью симуляторов крайне эффективно. В данной работе предложена реализация модели синхронного режима микроконтроллера KP580BB51 в симуляторе Analyzer. Выполнено тестирование используемых режимов работы синхронного режима. Результаты тестирования подтвердили правильность выполненной работы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

## Библиографический список

1. Programmable Communications Interface Intel 8251 [Электронный ресурс] : Datasheet / Intel Corporation, June 1997. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ds/ds8251.pdf?pkw=8251A>.
2. **Киселёв, Ю.Н.** Симулятор для разработки и моделирования цифровых систем / Киселёв Ю.Н., Кулясов П.С., Зеленский В.П. - Нижний Новгород, 2016, с. 94-98.
3. **Семёнов, А.А.** Организация последовательного интерфейса / А.А. Семенов.- Издательство Саратовского университета, 2007.
4. Описание контроллера KP580BB51. Справка пакета Analyzer версии 419.

**V. P. Zelensky, U. N. Kiselev, I. S. Ovchinnikov**

## ANALYZER SOFTWARE PACKAGE EXTENSION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

The report analyzes the operation model of the synchronous mode of the KR580VB51 chip, compiles algorithms, creates a software model of the synchronous mode of the chip in the Analyzer package. The results of testing the modified model in the simulator and an analysis of the testing itself are presented.

**Keywords:** microcontroller KP580BB51, synchronous operation mode of the microcontroller KP580BB51, synchronous transmission mode of the microcontroller KP580BB51, synchronous reception mode with internal synchronization of the microcontroller KP580BB51.

М.Б. Резников, Ю.С. Федосенко

**ОБ АРХИТЕКТУРЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ  
АЛГОРИТМОВ ДИСКРЕТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ  
В ЗАДАЧАХ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ**Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород

В рамках канонической задачи диспетчеризации исследуется и предлагается альтернативный к существующему подход к построению архитектуры вычислительного кластера для реализации алгоритмов дискретного динамического программирования.

**Ключевые слова:** дискретная оптимизация, задача диспетчеризации, динамическое программирование, моделирование вычислений, кластерные вычисления.

1. В серии работ [1-6] авторов были представлены результаты системного анализа известных общих подходов к синтезу точных решений канонической задачи диспетчеризации [7] с использованием алгоритма, построенного на основе концепции динамического программирования [8, 9] в модификациях для различных кластерных систем. Так, для изучения требований, предъявляемых реализующей алгоритм вычислительной моделью к программно-аппаратным ресурсам, были произведены серии экспериментов с использованием:

- видеоускорителей [1];
- многоядерных процессоров CPU [2];
- программируемых логических интегральных схем FPGA [3];
- кластеров, построенных на локальных сетях [4];
- облачной среды Amazon с охватом 128 виртуальных ЭВМ [5-6];
- супер ЭВМ «Лобачевский» [10] и «Ломоносов» [11].

В результате помимо основных выводов о возможностях значительного снижения продолжительности синтеза оптимальных решений и использования суммарного объема оперативной памяти кластера для хранения таблиц состояний были определены два основных требования к программно-аппаратным ресурсам:

- а) достаточная пропускная способность межузлового обмена данными;
- б) реализация протокола не блокирующего полнодуплексного обмена данными между всеми узлами кластера.

Основываясь на этих требованиях, ниже предлагается альтернативный подход к аппаратной реализации кластерных вычислений для  $NP$ -трудных [12] задач дискретной оптимизации на основе концепции динамического программирования, предусматривающий хранение в оперативной памяти таблиц возможных состояний, для которых на предыдущих этапах выполнения алгоритма были рассчитаны оптимальные решения частных подзадач.

2. Целью решения канонической задачи диспетчеризации является синтез оптимальной стратегии обслуживания стационарным процессором  $P$  конечного  $n$ -элементного детерминированного потока  $Z_n$  объектов  $z_1, z_2, \dots, z_n$ .

Каждый объект  $z_i$   $i = \overline{1, n}$  характеризуется следующими целочисленными параметрами:  $t_i$  – момент готовности к обслуживанию,  $\tau_i$  – длительность обслуживания,  $a_i$  – штраф за единицу времени пребывания в системе обслуживания.

Обслуживание объекта  $z_i$  может быть начато свободным процессором  $P$  в любой момент времени  $t$  ( $t \geq t_i$ ) и осуществляется без прерываний,  $i = \overline{1, n}$ . Не обслуженный объект не может покинуть очередь. Одновременное обслуживание процессором  $P$  двух и более объектов и его непроизводительные простои запрещены.

Стратегия обслуживания  $\rho$  потока  $Z_n$  отождествляется с перестановкой  $p = (p(1), p(2), \dots, p(k), \dots, p(n))$  множества индексов объектов и считается компактной, то есть момент  $t'_k$  начала обслуживания очередного объекта  $z_{p(k)}$ ,  $k = \overline{1, n}$  определяется соотношениями  $t'_1 = t_{p(1)}$ ,  $t'_k = \max\{t'_{k-1} + \tau_{p(k-1)}, t_{p(k)}\}$ . Момент  $t'_n$  завершения обслуживания потока  $Z_n$  определяется как момент завершения обслуживания объекта  $z_{p(n)}$ .

3. Каноническая задача диспетчеризации заключается в построении стратегии  $p^*$ , обеспечивающей минимизацию суммарного штрафа по всем объектам потока  $Z_n$

$$W(p) = \sum_{k=1}^n a_{p(k)}(t'_k - t_{p(k)}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Задача (1) относится к категории  $NP$ -трудных в сильном смысле. При её решении методом динамического программирования состояние системы описывается как совокупность  $\{t, S\}$ , где  $t$  – момент дискретного времени, в который процессор освободился после обслуживания очередного объекта  $z_{p(k-1)}$ , а  $S$  – множество ранее обслуженных объектов. Как очевидно, число возможных состояний системы соответствует величина  $\Xi = T \cdot 2^n$ , где  $T$  – некоторая константа, определяющая максимальную продолжительность обслуживания потока  $Z_n$  среди всех возможных сценариев. Соответственно, в процессе решения задачи (1) требуется сохранение в памяти не более  $\Xi$  решений частных подзадач, каждое из которых можно получить не более чем за  $n$  итераций с использованием ранее сохраненных в памяти решений.

При реализации кластерной модели вычислений множество состояний системы распределяется по узлам кластера равномерно, что способствует обеспечению равномерности загрузки каналов коммуникации между ними.

Для решения задачи (1) используется табличная версия схемы динамического программирования с обратным проходом, то есть алгоритм синтеза оптимальной стратегии обслуживания последовательно выполняет  $n$  итераций  $I_k$ ,  $k = \overline{1, n}$ ; при этом для вычисления  $W_k^{\min}(t, S)$  – суммарного штрафа на итерации  $I_k$  используются только частные решения с индексом  $k + 1$ , то есть :

$$W_k^{\min}(t, S) = \min_{i=1, 2, \dots, n, z_i \notin S} (W_{k+1}^{\min}(t' + \tau_i, S \cup z_i) + a_i(t' - t_i)), \quad t' = \max(t, t_i).$$

Соответственно, общее число используемых частных значений  $W_{k+1}^{\min}(t, S)$  суммарного штрафа определяется как  $C_n^k$ , и объем суммарной оперативной памяти кластера, минимально необходимой для выполнения итерации  $I_k$ , определяется произведением  $U = D \cdot T \cdot C_n^k$ , где  $D$  – объем памяти, требуемый на итерации  $I_k$  для хранения одного частного решения. Такой же величиной оценивается сверху общий объем данных, подлежащих передаче между узлами кластера.

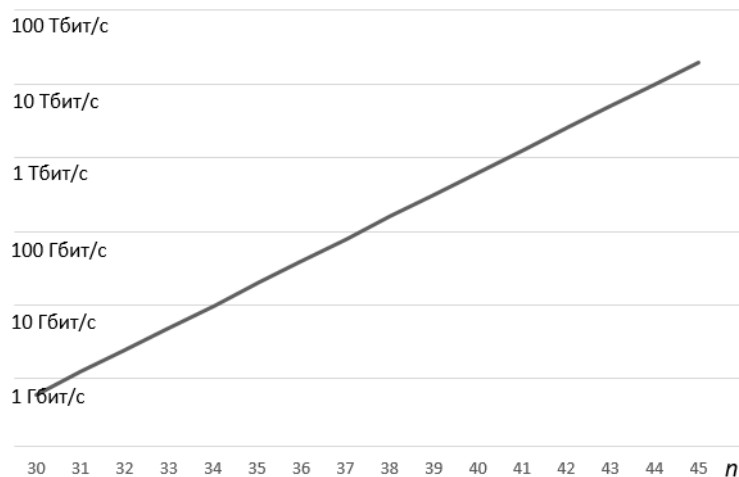
При идеальной балансировке состояний по узлам кластера на итерации  $I_k$  в процессе выполнения алгоритма синтеза оптимальной стратегии  $p^*$  каждый узел примет и передаст не более  $\Omega = U / M$  байт данных, где  $M$  – число узлов в кластере. С учетом данного обстоятельства можно заключить, что продолжительность выполнения алгоритма на итерации  $I_k$  будет ограничена пропускной способностью среды передачи данных. В случае реализации неблокирующего полнодуплексного протокола обмена данными между всеми узлами кластера



итерация  $I_k$  займет не менее  $[\Omega / V]$  единиц времени, где  $V$  – пропускная способность канала связи в одном направлении.

С учетом выполнения неравенства  $C_n^k \leq C_n^{\lfloor n/2 \rfloor}$  можно заключить, что для решения задачи (1) за не более чем  $X$  единиц времени требуется следующая суммарная пропускная способность среды передачи данных  $Y = D \cdot T \cdot C_n^{\lfloor n/2 \rfloor} / X$ .

В качестве примера на рис. 1 представлен график зависимости этой характеристики от размерности потока  $Z_n$  для  $X = 30$  мин.



**Рисунок 1. График зависимости суммарной пропускной способности среды передачи данных от размерности потока  $Z_n$   $n$  для  $X = 30$  мин**

4. Суперкомпьютеры, построенные по классической схеме, представляют собой систему, состоящую из множества узлов, каждый из которых, в свою очередь, содержит множество процессорных ядер и оперативную память. Все узлы объединяются в вычислительную сеть, построенную по технологии межсистемного взаимодействия Ethernet либо Fibre Channel (или аналогичной). Современный уровень технологий определяет такие высокоскоростные стандарты передачи данных как 100 Гбит/с и 400 Гбит/с Ethernet. При этом суммарная производительность серийных коммутационных устройств приближается к 10 Тбит/с [13].

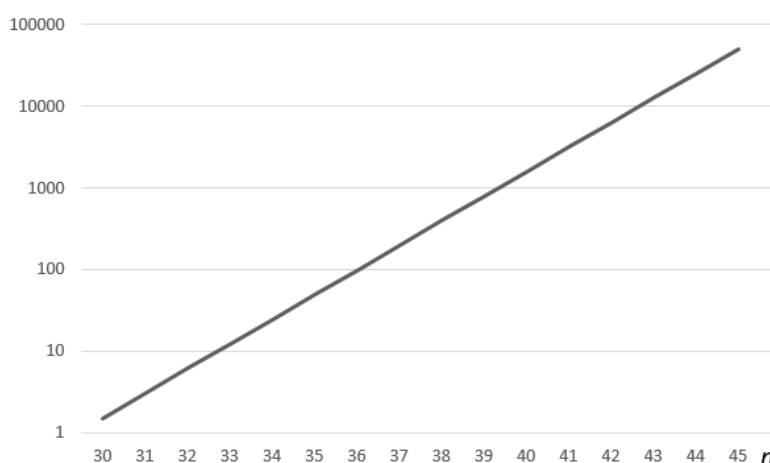
Традиционно ограничивающим фактором производительности кластерных систем является суммарная вычислительная мощность ядер. Однако, в результате выполненных нами вычислительных экспериментов [1-6] было установлено, что уже при значениях количества узлов  $M$  до 100 и более ограничивающим фактором при реализации алгоритма динамического программирования становится суммарная производительность сети.

В качестве результата полученных оценок можно сформулировать вывод о достаточно низкой эффективности классических суперкомпьютерных архитектур при реализации алгоритма дискретного динамического программирования, и основным критерием оценки программно-аппаратной архитектуры становится возможность приема, обработки и передачи информации в сети на достаточно высокой скорости. При этом такая архитектура должна обеспечить выполнение, вообще говоря, лишь базовые арифметические операции с массивами данных, полученными из каждого сетевого сообщения, и сохранять их в оперативной памяти.

Как итог рассмотрения проблемы предлагается для решения задач дискретной оптимизации по схеме динамического программирования использовать программно-аппаратную архитектуру, основанную на сетевых процессорах (NPU). Устройства этого типа обеспечивают

высокоскоростную обработку больших объемов внутрисетевого трафика и так же, как и обычные многоядерные процессоры, обладают достаточно большими объемами высокопроизводительной оперативной памяти. При этом следует также иметь в виду следующее обстоятельство: современные сетевые процессоры имеют значительное число интерфейсов, что позволяет организовывать их в большие сети без использования дополнительной периферии.

Значительная часть коммутационного оборудования ныне производится на базе сетевых процессоров. Соответственно для решения задач рассматриваемого класса представляется концептуально возможным построение всех элементов вычислительного кластера на основе единой линейки устройств при условии технического обеспечения внутрисетевого взаимодействия десятков и более тысяч узлов (рис. 2) с сохранением суммарной пропускной способности сети и равномерности распределяется нагрузки по узлам кластера.



**Рисунок. 2. График зависимости количества узлов кластерной системы от размерности задачи  $n$  для  $X = 30$  мин**

Такие кластеры могли бы стать разновидностью аппаратных суперкомпьютерных систем наряду со сверхмногоядерными системами, системами с программируемыми логическими интегральными схемами, суперкомпьютерами, основанными на нейросетях, и матричных процессоров.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

### **Библиографический список**

1. **Резников, М.Б.** Каноническая задача диспетчеризации: анализ масштабируемости решающего алгоритма при реализации на GPU / Резников М.Б., Федосенко Ю.С. // Проблемы теоретической кибернетики: XVIII международная конференция (Пенза, 19-23 июня 2017 г.). М.: МГУ, МАКС Пресс, 2017. С. 209-211
2. **Fedosenko, Yu.S., Reznikov M.B., Plekhov A.S., Chakirov R., Houlden N.** Scaling Analysis of Solving Algorithms For Canonical Problem of Dispatching in the Context of Dynamic Programming. Proceedings of the 2017 7Th International Conference Internet Technologies and Applications (Ita), eds. Picking R., Cunningham S., Houlden N., Oram D., Grout V., Mayers J., AbdAlhameed R., Liggett S., Vag, IEEE, 2017, 181–184.
3. **Reznikov, M., Fedosenko Yu.** A Model of FPGA Massively Parallel Calculations For Hard Problem of Scheduling in Transportation Systems, Learning and Intelligent Optimization (Lion 11

2017), Lecture Notes in Computer Science, 10556, eds. Battiti R., Kvasov D., Sergeyev Y., Springer International Publishing Ag, 2017, 370–375.

4. **Zakharov, V. N., Kuzmichev I.K., Reznikov M.B., Fedosenko Yu.S.** Model of cluster implementation of the algorithm of optimal schedule synthesis in the canonical task of dispatching // Marine intellectual technologies. 2018. № 4(42). Т. 2. С. 139-144.

5. **Федосенко, Ю.С.** Опыт оптимизации кластерной вычислительной модели алгоритма дискретного динамического программирования для канонической задачи диспетчеризации / Федосенко Ю.С., Резников М.Б., Пудов А.С. // Сборник «Супервычисления и математическое моделирование. Тезисы XVII Международной конференции». Саров, 15-18 октября 2018, Российский федеральный ядерный центр. Всероссийский НИИ экспериментальной физики. С. 129-130.

6. **Резников, М.Б., Федосенко Ю.С.** Каноническая задача диспетчеризации: анализ масштабируемости алгоритмов динамического программирования. Информационные системы и технологии – 2019. [Электронный ресурс]: сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции. – Нижний. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева. С. 749-753.

7. **Коган, Д.И.** Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы / Коган, Д.И., Федосенко Ю.С. // Дискретная математика. 1996. 8, № 3. С. 135-147.

8. **Беллман, Р.** Прикладные задачи динамического программирования / Беллман Р., Дрейфус С. - М.: Наука, 1965. 457 с.

9. **Арис, Р.** Дискретное динамическое программирование. Введение в оптимизацию многошаговых процессов / Р. Арис. - М.: Мир, 1969. 171 с.

10. **Сиднев, А.А.** Суперкомпьютер «Лобачевский» [Электронный ресурс] // Режим доступа [http://hpc-education.unn.ru/files/seminars/cluster\\_lobachevsky/07\\_Lobachevsky\\_Linux.pdf](http://hpc-education.unn.ru/files/seminars/cluster_lobachevsky/07_Lobachevsky_Linux.pdf) (дата обращения: 02.02.2020).

11. Суперкомпьютер "Ломоносов". Общая характеристика [Электронный ресурс] // Режим доступа <https://parallel.ru/cluster/lomonosov.html> (дата обращения: 02.02.2020).

12. **Гэри, М.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. - М.: Мир, 1982. 416 с.

13. Broadcom Now Shipping Their 12.8 Tbps Tomahawk 3 Ethernet Switch Chip [Электронный ресурс] // Режим доступа <https://www.techpowerup.com/239839/broadcom-now-shipping-their-12-8-tbps-tomahawk-3-ethernet-switch-chip> (дата обращения: 02.02.2020).

**M.B. Reznikov, Yu.S. Fedosenko**

## **ON COMPUTER CLUSTER ARCHITECTURE FOR IMPLEMENTATION OF DISCRETE DYNAMIC PROGRAMMING ALGORITHMS IN SCHEDULING PROBLEMS**

Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

Within the framework of the canonical scheduling problem, an alternative computing cluster architecture for the implementation of discrete dynamic programming algorithms is proposed and investigated.

**Keywords:** discrete optimization, problem of dispatching, dynamic programming, calculations modeling, cluster calculations.

Е.В. Бычков, Р.Б. Туганов

## СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКВОЗНОЙ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛЕВЫХ ИНСТИТУТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
МБОУ средняя школа № 122

Проанализировано состояние и перспективы инновационного развития подходов к учебному и научно-техническому сотрудничеству ведущих технических университетов страны и предприятий топливно-энергетического комплекса по подготовке и переподготовке кадров. Рассмотрены основные направления учебно-инновационного взаимодействия новых базовых кафедр и проектно-производственных предприятий отрасли по повышению качества подготовки бакалавров, магистров и специалистов для основных подразделений организаций.

**Ключевые слова:** технический университет; базовая кафедра; учебно-инновационное сотрудничество; учебно-производственная практика; курсы повышения квалификации.

### Введение

Современная промышленность России столкнулась с серьезными вызовами, связанными с усложнением производственных объектов и средств управления ими, с одной стороны, и недостаточной готовностью технологического персонала к работе в новых условиях – с другой. Технологии и средства управления усложняются, производственные риски возрастают, а попытки их преодолеть приводят к дальнейшему усложнению систем управления. Выйти за пределы этого замкнутого круга можно только за счет качественного прорыва в подготовке специалистов в инновационных и бурно развивающихся отраслях.

Главная роль в развитии инновационной экономики государства принадлежит, несомненно, высшей технической школе, которая призвана обеспечивать:

- наличие современных фундаментальных естественнонаучных знаний, обеспечивающих мобильность саморазвития специалиста в различных прикладных направлениях;
- опережающую практику подготовки специалистов по инженерно-техническим и научным специальностям, способных в дальнейшем создать технологическую основу поступательного развития отрасли. Учитывать надо то, что будет, а не то, что было и есть;
- формирование нового содержания технологической, гуманитарной, информационной, экологической и экономико-управленческой подготовки инженерных кадров;
- изменение менталитета преподавателей для научно-образовательного процесса, рассматривающих студента не как объект, а как субъект образования, который обладает умением самостоятельно решать поисковые задачи, формирует культуру инновационной экономики в логической цепочке создания новых знаний, трансформирования их в высокие энергосберегающие технологии для организации производства конкурентоспособной продукции и ее реализации в товарах, новых технологиях, услугах;
- студент должен быть готов и стимулирован к самообучению и самообразованию, стремиться к получению знаний в течение всей своей жизни, что требует реализации иных моделей инженерно-технических специальностей, а, следовательно, изменения техники, технологии, форм и методов управления образовательным процессом.

## Проблемы подготовки инженерных кадров для ТЭК

Отечественная система подготовки инженерных кадров формировалась многими поколениями ученых и производственников [1-3]. Ее заслуга в создании армии высококвалифицированных инженерно-технических работников и ученых, осуществляющих инновационное, поступательное развитие нефтегазового комплекса страны, – неоспорима. Но в последние годы в эпоху глобализации происходят кардинальные изменения в системе образования, что, безусловно, скажется и на обеспечении отраслей ТЭК специалистами нового поколения. Высшая школа России постепенно отходит от отраслевой подготовки кадров под конкретные рабочие места и перестраивает свою деятельность на подготовку специалистов широкого профиля. При этом, однако, сохраняются традиционные для отечественной системы инженерного образования достоинства: фундаментальность, системность и практическая направленность подготовки [4-6].

В этих условиях инновационный путь развития страны и ТЭК в частности обуславливает и переход к инновационному подходу в образовании. А это, в первую очередь, – опережающий уровень подготовки кадров для высокотехнологических направлений, способных не только генерировать технические идеи, но и претворять их в жизнь [7-10]. Для этого инновационная деятельность ВУЗов ТЭК сегодня должна быть направлена на создание и получение экономического, социального, экологического и иных эффектов от реализации созданных ими инновационных продуктов:

- инноваций в образовании (новые технологии в образовании, образовательные курсы, специальности, направления подготовки и переподготовки кадров);
- научно-технические инновации (новые технологии, образцы новой техники, материалы, изделия, научно-технические услуги);
- инновации в управлении (новые технологии управления видами деятельности и бизнесом).

Следует отметить, что условия для подготовки таких специалистов в отраслевых ВУЗах и на специализированных кафедрах крайне ограничены. Специализация образования в области ТЭК требует:

- во-первых, дополнительных знаний в области физики (гидродинамика, теория фильтрации, термодинамика) и математики (теория вероятностей, мат. статистика и численные методы решения задач математической физики);
- во-вторых, необходимости создания полноценных систем компьютерного тренинга, превосходящих по эффективности все известные формы обучения, включая не всегда доступные и потенциально опасные тренировки на реальных объектах;
- в-третьих, возможностей широкой практики взамен ограниченных сведений из инструкций пользователя ПО и тестовых примеров.

Обучение студентов высшей школы для предприятий ТЭК на старших курсах бакалавриата и в магистратуре – это тот период, когда такая специализация представляется своевременной и очевидной. Однако для достижения требуемого результата помимо технического университета необходимы еще два участника (потенциальные потребители ресурса) – подразделения нефтегазодобывающих компаний и проектных институтов, силами специалистов которых осуществляется научно-техническое сопровождение проектов. При этом расширяется круг преподавателей (ведущие специалисты прикладной науки и производства) и выявляются приоритеты наиболее важных и актуальных задач в каждой области знаний. Неоспоримое преимущество такого учебного процесса на основе центра или базовой кафедры заключается в том, что в производственные процессы вовлекаются

фундаментальные знания и опыт профессорско-преподавательского состава университета, а действующее оборудование и тренажеры лабораторий и полигонов отраслевых институтов служат в качестве инструментария для проведения экспериментов и физического моделирования по профилю изучаемых дисциплин.

### **Опыт взаимодействия НГТУ им. Р.Е. Алексеева с проектными и научно-исследовательскими институтами ТЭК**

Базовая кафедра Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева по нефтегазовому профилю создана в 2012 году [11-13]. Решение о ее создании было продиктовано острой потребностью нефте- и газотранспортных предприятий Нижегородской области в высококвалифицированных кадрах. До этого момента в Нижегородском регионе и ПФО в целом не было учебных заведений, осуществляющих подготовку кадров нефтегазового профиля. В то же время, регион остро нуждается в такого рода специалистах, поскольку здесь сосредоточены крупные проектные институты (АО «Гипрогазцентр», АО «Транснефть – Верхняя Волга», ООО «Лукойл – НижегородНИИнефтепроект») и эксплуатационные организации (ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», дочерние компании ПАО «Лукойл» и некоторые другие).

Создание кафедры «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» (ПЭГГ) НГТУ им. Р.Е. Алексеева, несомненно, стало серьезным шагом в решении данной проблемы. В 2013 г. кафедра распахнула свои двери для студентов, желающих стать бакалаврами и магистрами по направлению «Нефтегазовое дело».

Кафедра является структурным подразделением Института транспортных систем университета, коллектив сформирован из специалистов ПАО «Газпром», имеющих соответствующую квалификацию опыт работы в вузах. Помимо основных преподавателей к учебному процессу привлекаются ведущие специалисты производственных отделов.

С 2013 года кафедра ПЭГГ превратилась в выпускающую. Была пройдена процедура лицензирования, дающая техническому университету право на подготовку студентов по направлению «Нефтегазовое дело». И теперь основное направление деятельности кафедры ПЭГГ – подготовка бакалавров и магистров.

Специализированные предметы преподают доктора и кандидаты наук, профессора и доценты, работающие в нефтегазовой отрасли и имеющие богатый опыт научной и практической деятельности в данной сфере. В составе преподавателей 4 доктора и 5 кандидатов технических наук. Средний возраст профессорско-преподавательского состава – 39 лет. За четыре года существования кафедры преподавателями и аспирантами подготовлены и защищены две докторские и три кандидатские диссертации.

### **Направления учебно-научного сотрудничества**

Благодаря активному сотрудничеству старейшего технического университета города и крупной проектной организации ПАО «Газпром», обучение на кафедре имеет целый ряд преимуществ, главное из которых – специализация и ориентированность на практику, на реальные нужды предприятий нефтегазовой отрасли. Курс обучения сформирован, исходя из практического опыта, а учебные планы и РПД разработаны специалистами профильных подразделений НИИ с учетом потребностей потенциальных работодателей (таких как ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород») при непосредственном участии главных специалистов этих организаций. Специальные дисциплины по программе бакалавриата

читаются непрерывно, начиная уже с первого курса. Программой предусмотрены все дисциплины, которые необходимы для освоения полного набора профессиональных компетенций в рамках специализации.

Студенты имеют возможность пользоваться информационными ресурсами отраслевых предприятий: технической библиотекой и электронной базой нормативной документации; а при выполнении контрольных и курсовых работ могут консультироваться с главными специалистами и научными сотрудниками.

Необходимо отметить, что кафедра не только готовит новые кадры для предприятия, но и дает уже работающим специалистам возможность повысить свой профессиональный уровень и получить степень магистра по профилю «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ». И все это без отрыва от работы, поскольку большая часть занятий проводится в стенах производственного корпуса, оснащенного современным мультимедийным и учебно-техническим оборудованием.

У кафедры налажены связи с «Институтом геологии, нефтегазодобычи и трубопроводного транспорта» Ухтинского государственного технического университета (УГТУ) и ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [14-17]. Студенты кафедры регулярно принимают участие в ежемесячном межрегиональном вебинаре «Актуальные проблемы нефтегазотранспортной отрасли» (рис. 1). Вебинар проводится с 2014 года на базе УГТУ. В режиме онлайн трансляции наши молодые специалисты и студенты УГТУ и НМСУ "Горный" делятся результатами научных исследований.



**Рисунок 1. Межрегиональный вебинар  
«Актуальные проблемы нефтегазотранспортной отрасли»**

Важной особенностью является возможность проведения практических занятий на производственной базе (рис. 2), где учащиеся могут приобрести навыки работы с диагностическим оборудованием. Для проведения практических и лабораторных занятий по дисциплинам используется современное измерительное и диагностическое оборудование. Помимо этого, в процессе обучения используются современные комплексы САПР и компьютерного моделирования. В 2015 году ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» организована программа обучения бакалавров рабочей профессии: студенты проходят обучение в учебно-производственном центре предприятия (рис. 2), а затем сдают экзамены представителям Ростехнадзора и руководства ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». Это дает им возможность уже в начале обучения на кафедре без отрыва от основной учебы получить профессию. Это, безусловно, в дальнейшем позволит выпускникам быстрее адаптироваться на производственном предприятии.





**Рисунок 2. Лаборатория противокоррозионной защиты  
(УПЦ ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». Учебная практика, 2014 год)  
и упражнение на тренажере для подготовки электросварщиков  
(УПЦ ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», 2015 год)**

С целью практического ознакомления студентов с особенностями работы нефтегазовых объектов не только в теории, но и на практике, АО «Гипрогазцентр» совместно с ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» организует экскурсии на производственные объекты. Так бакалавры кафедры уже побывали на действующих объектах транспорта нефти и газа: компрессорной станции «Лукояновская», газораспределительной станции «Пешелань» и нефтеперекачивающей станции «Горький», а также на Выксунском трубном заводе (рис. 3).



**Рисунок 3. Посещение магистральной насосной НПСи производственных объектов  
АО «Выксунский металлургический завод»**

На данный момент большинство нефтегазовых вузов страны готовят специалистов по ряду узконаправленных профилей, в то время как наша базовая кафедра осуществляет комплексный подход к подготовке специалистов трубопроводного транспорта углеводородов, включающий в себя вопросы проектирования, сооружения и эксплуатации трубопроводных систем. Подобный подход продиктован стремлением подготовить кадры высокой квалификации: сложно представить себе грамотного специалиста по эксплуатации нефте- и газопроводов, не владеющего основами их проектирования и сооружения.

### **Организация курсов повышения квалификации инженеров**

Вторым важным направлением деятельности кафедры ПЭГГ является организация и проведение специалистами на базе Института переподготовки специалистов курсов



повышения квалификации работников общества и предприятий-партнеров в объеме 72 часов. Тематика курсов определяется исходя из потребностей подразделений института, а учебные планы и расписание занятий разрабатываются по согласованию с руководством и ведущими специалистами проектно-производственных отделов. Курсы проводятся, как правило, в рабочие дни с 15.00 до 18.00 часов непосредственно в конференц-залах без отрыва работников от основной деятельности.

Повышение квалификации прошли более 100 специалистов, отзывы которых по организации и тематике преимущественно положительные. Таким образом, высокая конкуренция на рынке труда и нехватка высококвалифицированных специалистов в регионах повышают значимость базовых кафедр. Практика показывает, что только консолидированные действия работодателей и вузов способны дать необходимый результат. Благодаря такому подходу выпускник кафедры попадает на предприятие полноценным сотрудником, не нуждающимся в дополнительном обучении, способным уверенно начать свой трудовой путь. Создание кафедры дает молодым людям прекрасную возможность стать востребованными специалистами и, безусловно, является значимым событием не только для НИИ, но и для города и региона.

### Библиографический список

1. **Владимиров, А.И.** Инновации и традиции в подготовке кадров для нефтегазовой отрасли // Газовая промышленность, 2014, № 2. – С. 8-9.

2. **Дмитриев, А.Ю.** Проектирование объектов нефтегазового комплекса с применением компетентного подхода / А.Ю. Дмитриев, В.В. Малышев, Д.В. Худяков // Газовая промышленность, 2014, № 2. – С. 10-12.

3. **Баранов, В.Г.** Направления учебно-инновационного сотрудничества технического университета с предприятиями / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2010. № 2. С. 60-63.

4. **Мещеряков, В.Н.** Формы учебного сотрудничества технических университетов с нефтегазовыми предприятиями / В.Н. Мещеряков, О.В. Крюков // Профессорский журнал. Технические науки. 2019. № 2. С. 50-62.

5. **Крюков, О.В.** Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки / О.В. Крюков, А.Б. Васенин, А.В. Серебряков // Приводная техника. 2012. №4. – С. 2-11.

6. **Вожаков, А.В.** О причинах недостаточно эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации / А.В. Вожаков, О.В. Крюков, Н.Г. Лисин // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 38-47.

7. **Kryukov, O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 1. С. 56-62.

8. **Крюков, О.В.** Опыт проектирования АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 1. С. 2-7.

9. **Крюков, О.В.** Подход к прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 9. С. 30-34.

10. **Мещеряков, В.Н.** Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП / В.Н. Мещеряков, Д.В. Ласточкин, О.В. Крюков // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.

11. **Агиней, Р.В.** Базовая выпускающая кафедра «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» НГТУ им.Р.Е. Алексеева в АО «Гипрогазцентр» // В сборнике «Кадры газовой промышленности». – М.: Газпромэкспо, 2015. – С. 11-12.

12. **Мещеряков, В.Н.** Базовая система подготовки оперативного персонала газотранспортных предприятий / В.Н. Мещеряков, О.В. Крюков // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2019. № 4 (38). С. 4-10.

13. **Крюков, О.В.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, А.В. Серебряков // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

14. **Васенин, А.Б.** Энергоэффективные системы электроснабжения электроприводов нефтегазопроводов / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 380-384.

15. **Крюков, О.В.** Организация учебно-научного сотрудничества технических университетов с предприятиями нефтегазового комплекса // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 2016. С. 560-564.

16. **Vasenin, A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.

17. **Kryukov, O.V., Blagodarov D.A.** Intelligent control of electric machine drive systems // В сб.: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings 10. 2018. С. 8571670.

**E. V. Bychkov, R. B. Tuganov**

### **INFORMATION SUPPORT SYSTEMS FOR END-TO-END TRAINING FOR INDUSTRY INSTITUTIONS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev,  
MBOU secondary school No. 122

The article analyzes the state and prospects of innovative development of approaches to educational and scientific-technical cooperation between the leading technical universities of the country and enterprises of the fuel and energy complex for training and retraining of personnel. The main directions of educational and innovative interaction of new basic departments and design and production enterprises of the industry to improve the quality of training of bachelors, masters and specialists for the main divisions of organizations are considered.

**Keywords:** Technical University; basic Department; educational and innovative cooperation; educational and industrial practice; advanced training courses.

Д.А. Благодаров, Ю.М. Сафонов, О.В. Крюков

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Московский энергетический институт (ТУ), ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Предложен анализ конструкций электродвигателей мегаваттного класса для интегрированных исполнений агрегатов нефтегазовой отрасли. Проведен обзор основных преимуществ асинхронных и синхронных машин в электроприводах газоперекачивающих агрегатов. Рассмотрены особенности конструкций интегрированных электродвигателей с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Показаны эффективные результаты реализации безредукторных и безмасляных технологий для повышения функциональных возможностей, надежности, энергоэффективности и экологичности наиболее ответственных электромеханических систем.

**Ключевые слова:** электродвигатель, конструкция, синхронная машина, ось вращения, надежность, электропривод, турбокомпрессор.

### Введение

Центральным направлением развития мощных электрических машин переменного тока сегодня является повышение энергоэффективности и надежности установок. Это связано с постоянным ужесточением требований по их эксплуатации на объектах повышенной опасности, с одной стороны, и тенденциями интеграции приводных электрических машин с исполнительными механизмами, с другой [1-3].

Приоритет требованиям по надежности всегда был актуален для различных агрегатов металлургии, электроэнергетических установок электростанций, электроприводов турбомеханизмов (ЭПТК) [4-6]. Поэтому на ранних этапах развития использовались как нерегулируемые надежные синхронные машины, так и частично регулируемые системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и машин двойного питания с долей последних менее 1 % [7,8].

Однако сегодня приоритеты меняются. Так, 70 % текущего парка ЭПТК имеет срок службы свыше 20 лет и выработали свой ресурс при средней наработке на отказ менее 8000 час. При этом основными причинами вывода ЭПТК из эксплуатации являются системы уплотнения, подшипники, редуктор (мультипликатор) и прямой запуск [9,10]. В этой связи реализация новых моноблочных конструкций ЭПТК в безредукторном исполнении с использованием активных электромагнитных подшипников, преобразователей частоты и систем охлаждения обмоток перекачиваемым газом, безусловно, представляет большой интерес [11,12].

Этому способствует и то, что современный этап развития приводных двигателей ЭПТК связан со сменой технологий электромашиностроения, силовой и микропроцессорной техники [13-15]. Рассмотрим особенности применения новых конструкций машин для ЭПТК компрессорных станций (КС) и инновационные исследования по энергоэффективности и надежности их работы.

## Сопоставление электрических машин для ЭПТК

Как известно, главным элементом любого ЭПТК является электрическая машина мегаваттного класса. Именно ее энергетические и динамические характеристики, функциональные возможности, надежность и ресурс эксплуатации определяют конкурентоспособность и технико-экономические показатели ЭПТК в целом и его конкурентоспособность по сравнению с другими вариантами.

Все современные электродвигатели ЭПТК – синхронные (СД) и асинхронные (АД) являются частными случаями «обобщенной машины переменного тока» (двигателя двойного питания).

Отечественными предприятиями, занимающимися разработкой высоковольтных машин для ЭПТК, являются ЗАО «РЭП Холдинг» (СПб) и ООО "Электротяжмаш-Привод" (г. Лысьва). Среди зарубежных фирм мегаваттные двигатели производят АВВ, консорциум Alstom (Converteam) – MAN Turbo, MELCO (Mitsubishi Electric Corporation), General Electric (GE), Siemens. Опыт промышленной эксплуатации данных машин в нефтегазовом комплексе для мощных и энергоёмких механизмов доказал перспективность их применения.

Для анализа современного этапа перехода от преимущественного использования синхронных машин в ЭППА на асинхронные рассмотрим основные преимущества каждого типа двигателей.

*Преимуществами синхронных машин являются:*

- Наивысшие энергетические характеристики - КПД,  $\cos\phi$  и др. (минимальные потери мощности в стали и меди статора синхронной машины).
- Стабильная скорость, равная частоте вращения поля статора  $\omega = \omega_0 = 2\pi f/p$ .
- Максимальная производительность без потерь мощности скольжения и зависимости от нагрузки.
- Надежность в долгосрочной перспективе и долговечность работы без капремонтов (большой зазор в расточке статора, не влияет на величину потребляемой реактивной мощности).
- Стабильность (устойчивость работы) менее зависима от колебаний напряжения сети (момент электромагнитный пропорционален  $U$ , а не  $U^2$ ).
- Независимое регулирование реактивной мощности в канале возбуждения.
- Абсолютно жесткая механическая характеристика, не зависящая от нагрузки.

*Преимуществами асинхронных машин являются:*

- Простота конструкции асинхронной машины с КЗ ротором типа «беличьей клетки» со сроком службы до 50 лет (ресурс 200 000 час).
- Минимальные массогабаритные показатели и стоимость АД с КЗ ротором.
- Высокая надежность из-за отсутствия электромагнитного возбуждения и контактных колец.
- Возможность создания безредукторного высокоскоростного электропривода на основе активного электромагнитного подвеса (ЭМП) ротора и отсутствия системы маслоснабжения.
- Взрывобезопасное исполнение, возможность установки двигателя и нагнетателя в одном помещении при сокращении общих площадей.
- Возможность компоновки АД в едином корпусе с нагнетателями и обдувом обмоток статора перекачиваемым природным газом.
- Низкие эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание и ремонт.

## Конструкции современных машин с горизонтальной осью вращения

Разработка новых конструкций приводных электродвигателей ЭПТК обусловлена новыми требованиями надежности, энергоэффективности и экологичности в целом компрессорных установок.

Модернизация и замена конструкций приводных двигателей, существующих ЭПТК на новые интегрированные с исполнительным механизмом, позволяет получить новые конкурентные возможности:

- За счет применения ЭМП роторов повышаются показатели надежности и ресурс ЭПТК, снижаются затраты на обслуживание и ремонты.
- Снижение износа механического и электротехнического оборудования благодаря снятию ограничений на число пусков и остановов.
- Снижение вероятности возникновения поломок и помпажа, благодаря плавному изменению режимов работы КЦ.
- Прямое соединение «двигатель-нагнетатель» на базе высокоскоростных машин.
- Исключение из компоновки установок ЭПТК мультипликатора.
- Исключение системы смазки подшипников двигателя и компрессора и необходимости запасов масла, его охлаждения и рисков возгорания.
- Значительное сокращение площадей под установку ЭПТК с 40 м<sup>2</sup> (газотурбинный) и 24 м<sup>2</sup> (типовой ЭПТК) до 12 м<sup>2</sup> для 12,5 МВт (рис. 1).
- Повышение готовности агрегата к пуску, снижение времени и энергетических затрат пуска.
- Исключение выработки шеек валов ротора двигателей за счет применения ЭМП.
- Повышение точности отработки задания при дистанционном управлении ЭГПА с переходом к безлюдным технологиям обслуживания и улучшение условий труда.

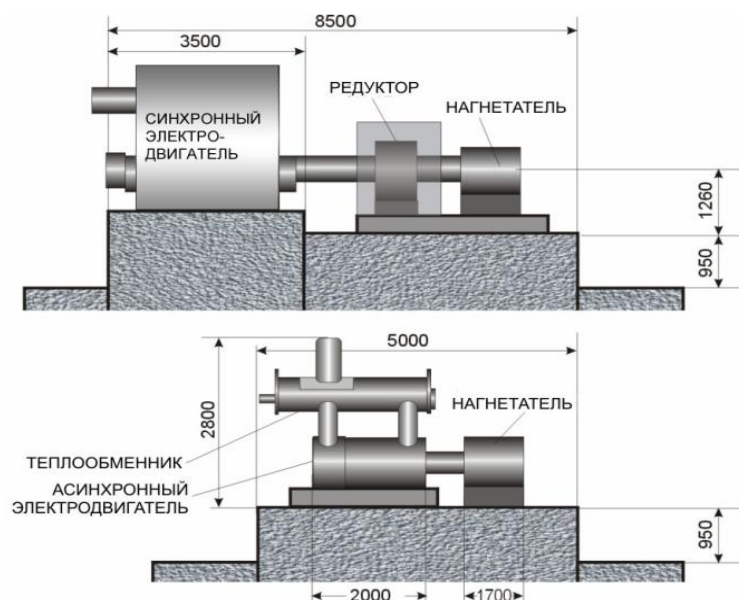


Рисунок 1. Сравнение габаритов ЭПТК с СД и АД

Высокооборотный двухполюсный асинхронный электродвигатель с КЗ кованным высокопрочным ротором на ЭМП при номинальной скорости до 9.500 об/мин (рис. 2) имеет отвод тепла посредством перекачиваемого газа. Паспортные данные АД мощностью 6,3 МВт приведены в таблице.

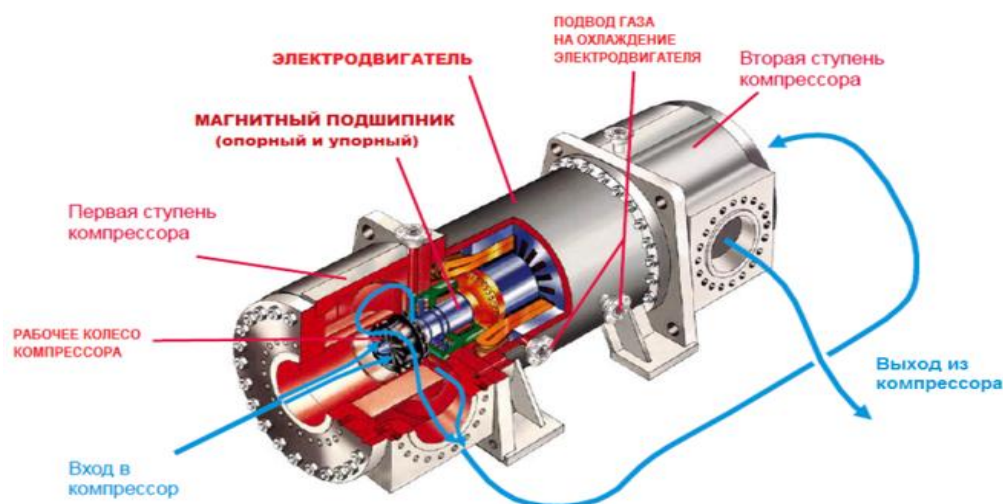


Рисунок 2. Конструкция моноблока ЭПТК «МОРИСО»

Паспортные данные АД

Параметры АД	Значение
Номинальное напряжение, В	6850±5%
Частота, ном., Гц	137±3%
Рабочий диапазон частот, Гц	68–143,5
Скорость вращения, ном., об/мин	8206
Скорость вращения, макс., об/мин	9455
Скорость вращения, критич., об/мин	12.240
Момент, ном., Нм	7330
Момент, макс., % $M_{ном}$	210
КПД, %	97,5
Коэффициент мощности (-)	0,87
Скольжение, ном., %	0,17
Ток статора, ном., А	627
Перегрузка по току, доп., % $I_{ном}$	150
Соединение обмотки статора	Y
Тип нагрузки	S1
Шум двигателя, не более, дБ	85
Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	38
Лимит вибраций, не более, мм/с	2,8
Балансировка ротора, Q	2,5

Электродвигатель горизонтальный формы IM 1001(B3) класса IP 44 имеет магнитный подвес ротора производства АО «Корпорация ВНИИЭМ» и датчики виброскорости и положения ротора, давления и реле потока воздуха, а также термодатчики в обмотках.

В качестве примера реализации ЭПТК с новым асинхронным приводным двигателем производства Лысьвенского завода тяжелого электрического машиностроения рассмотрим его работу на КС МГ «Починки-Грязовец».

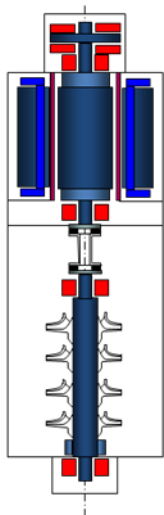
Сердечник статора выполнен из электротехнической листовой стали, толщиной 0,5 мм EI 31 с удельным уровнем потерь 1,3 Вт/кг. Внутренний диаметр статора 530 мм, внешний диаметр 1200 мм, длина 620 мм. Обмотка петлевая двухслойная с изоляцией класса F с транспозицией. Статор с обмоткой уложен в корпус (ванну) сваренную из стальных листов и профилей. Подшипники помещены в торцовых частях ванны. Ванна закрыта отдельной крышкой,

на которой укреплена вентиляционная надстройка. Корпус является одновременно шумозащитным кожухом.

Сердечник ротора выполнен из высокопрочных листов стали, толщиной 4 мм с закрытыми пазами для роторных стержней. Стержни изготовлены из круглой меди диаметром 23 мм. Количество пазов 34. Под стержнями находятся вентиляционные каналы. Стержни приварены в лобовой части в короткозамкнутые кольца из высокопрочной бронзы. На кольцах с натягом насажены стальные бандажи. Для возможной балансировки, на ротор насажено четыре балансировочных кольца.

### Конструкции современных машин с вертикальной осью вращения

Повышение требований к минимизации массогабаритных показателей КС для компактности «пятна застройки», обеспечения безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней специальной очистки и увеличение надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки ЭПТК в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем (рис. 3).



- Осевой магнитный подшипник в герметичном корпусе
- Радиальный магнитный подшипник в герметичном корпусе
- Массивный ротор двигателя
- Асинхронный двигатель в герметичной оболочке
- Общий защитный кожух под давлением
- Муфта трубчатого вала

Рисунок 3. Схема вертикальной компоновки ЭПТК

Конструктивно АД имеет компактную обмотку статора с жидкостным охлаждением и массивный ротор. Технология с компактными торцевыми обмотками применялась ранее для тихоходных АД специального назначения и впервые была применена для высокоскоростных электроприводов.

Капсулированные ЭПТК с вертикальной осью вращения имеют параметры:

- номинальные мощности 7,5; 9,5; 12,2 и 15 МВт;
- номинальные скорости 7600 - 20000 об/мин;
- количество рабочих колес компрессора 6 и 8;
- капсула: длина 4,8 м, ширина 4,1 м, высота 4,6 м;
- снижение пятна застройки – более 40 %;
- герметичная оболочка держит 150 бар и 200 °С.

В результате сопоставления вариантов топологий высоковольтных преобразователей частоты (ВВ ПЧ) для регулирования ЭПТК выработаны следующие рекомендации [16-18]:



1. Для массового применения в частотно-регулируемых электроприводах наилучшими технико-экономическими показателями обладают ПЧ по топологии «Многообмоточный входной трансформатор с многоуровневым каскадным соединением инверторов».
2. Перспективной по мере улучшения параметров и снижения стоимости управляемых силовых полупроводниковых приборов является топология «Бестрансформаторный активный выпрямитель, трех-, четырехуровневый инвертор напряжения».
3. Преобразователи, выполненные по топологии «Входной трансформатор, управляемый выпрямитель, инвертор тока с ШИМ», несмотря на свою высокую стоимость, могут найти применение для ответственных установок мощностью свыше 2500 кВт.
4. ВВ ПЧ, выполненные по двух трансформаторной топологии, устарели, обладают худшими характеристиками и не могут быть рекомендованы к применению.
5. Бестрансформаторные схемы ВВ ПЧ с двухуровневым инвертором напряжения обладают низкой надежностью, оказывают неблагоприятное влияние на питающую сеть, и, несмотря на их относительно невысокую стоимость, не могут быть рекомендованы.
6. Преобразователи по схеме бестрансформаторный активный выпрямитель – трехуровневый инвертор напряжения сегодня несколько уступают многоуровневому преобразователю с каскадным соединением инверторов, но могут явиться перспективными по мере дальнейшего развития параметров полностью управляемых модулей.

### Выводы

Таким образом, новые конструктивные решения электродвигателей переменного тока мегаваттного класса с горизонтальной и вертикальной осью вращения позволяют значительно повысить показатели надежности, энергоэффективности и экологичности систем электроприводов агрегатов в важнейших электроэнергетических отраслях промышленности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №08-08-06041.*

### Библиографический список

1. **Воронков, В.И.** Векторное управление возбуждением синхронных двигателей ГПА / В.И. Воронков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 204-208.
2. **Мещеряков, В.Н.** Автоматизированный электропривод с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 6 (119). С. 4-8.
3. **Благодаров, Д.А.** Показатели энергосбережения в системах интеллектуального электропривода / Д.А. Благодаров, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019 труды научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 28-31.
4. **Крюков, О.В.** Внедрение энергосберегающих технологий на электроприводной компрессорной станции "Володино" ООО "Газпромтрансгаз Томск" // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докладов XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ. 2017. С. 222-228.



5. **Крюков, О.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // В сборнике: Труды IX Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 428-432.
6. **Крюков, О.В.** Способ стабилизации работы синхронных машин с использованием виртуального датчика нагрузки / О.В. Крюков, И.В. Гуляев, Д.Ю. Теплухов // Электротехника. 2019. № 7. С. 2-7.
7. **Крюков, О.В.** Микропроцессорное управление автоматизированным электроприводом объектов топливно-энергетического комплекса / О.В. Крюков [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 12 (125). С. 4-9.
8. **Грязнов, В.И.** Электропривод переменного тока / В.И. Грязнов, О.В. Крюков, К.С. Степанов // Авторское свидетельство SU 1431028, 15.10.1988. Заявка № 4162873 от 18.12.1986.
9. **Крюков, О.В.** Комплексный анализ показателей высоковольтных преобразователей для объектов ТЭК / О.В. Крюков, В.Н. Мещеряков // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 9 (122). С. 50-59.
10. **Бычков, Е.В.** Анализ влияния на сеть динамических режимов электроприводных агрегатов / Е.В. Бычков, О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 11 (124). С. 10-18.
11. **Крюков, О.В.** Эксплуатация систем электромагнитного подвеса роторов двигателей ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 7. С. 13-20.
12. **Kryukov, O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A.** Intelligent control of electric machine drive systems // В сборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings 10. 2018. С. 8571670.
13. **Крюков, О.В.** Развитие интеллектуального электропривода с использованием ИТ-алгоритмов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 7. С. 49-57.
14. **Мещеряков, В.Н.** Релейно-векторное управление электромеханическими системами на производственных объектах // В сборнике: Великие реки' 2019. Труды научного конгресса: в 3-х томах. 2019. С. 40-44.
15. **Благодаров, Д.А.** Повышение надежности энергетических установок путем прогнозирования состояния электроприводов / Д.А. Благодаров, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2018 Труды научного конгресса: в 3-х томах. Ответственный редактор А.А. Лапшин. 2018. С. 36-39.
16. **Крюков, О.В.** Автоматизированный электропривод турбокомпрессоров с высоковольтными многоуровневыми преобразователями частоты // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 5 (118). С. 5-9.
17. **Крюков, О.В.** Анализ характеристик высоковольтных преобразователей частоты электроприводов / О.В. Крюков, В.Н. Мещеряков // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 7 (120). С. 30-39.
18. **Крюков, О.В.** К выбору высоковольтных преобразователей частоты для объектов ТЭК по комплексным энергетическим показателям // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 11. С. 20-32.

**D. A. Blagodarov, Yu. M. Safonov, O. V. Kryukov**

**ENERGY-SAVING SYSTEMS FOR AUTOMATED ELECTRIC DRIVE  
OF TURBOCHARGERS**

*Moscow power engineering Institute (TU), OOO "Gazprom VNIIGAZ", Moscow*

**Abstract:** the analysis of megawatt class electric motor designs for integrated versions of oil and gas industry units is proposed. The review of the main advantages of asynchronous and synchronous machines in electric drives of gas pumping units is carried out. The features of the designs of integrated electric motors with horizontal and vertical axes of rotation are considered. Effective results of the implementation of gearless and oil-free technologies to improve the functionality, reliability, energy efficiency and environmental friendliness of the most critical electromechanical systems are shown.

**Keywords:** electric motor, design, synchronous machine, rotation axis, reliability, electric drive, turbocharger.

Е.В. Бычков, П.А. Захаров, О.В. Крюков

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА ГАЗА

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Рассмотрено современное состояние развития газовой отрасли страны с системных позиций надежности, энергоэффективности и экологичности транспорта природного газа. Для масштабного снижения энергоемкости технологических установок предложены основные направления обеспечения энергосбережения системы газоснабжения России. Главной из них является структурно-параметрическая оптимизация параметров давления и температуры газа в рамках цеха, которая может быть достигнута реализацией совокупности научно-технических мероприятий методами системного анализа.

**Ключевые слова:** магистральный транспорт газа оптимизация, энергоемкость, системный анализ, энергоэффективность.

### Введение

В последние годы в топливно-энергетическом комплексе и, в частности, в газовой промышленности сложилась ситуация, выдвинувшая проблему энергосбережения на первый план. Это связано с тем, что развитие энергетических отраслей промышленности в прошлом столетии осуществлялось форсированными темпами. Ежегодно вводилось в действие более 10 тыс. км газопроводов и компрессорных станций (КС) мощностью 2,0 млн кВт с приростом добычи более 50 млрд м<sup>3</sup> [1,2].

Однако в период интенсивного развития газовой промышленности появился целый ряд негативных факторов. В частности, можно отметить повышенную энергоемкость существующих газопроводов, сложившуюся в результате выбора их проектных параметров при чрезвычайно низких ценах на энергоресурсы и дефиците труб. Вследствие этого проектная удельная энергоемкость российских газопроводов, отнесенная к объему товарно-транспортной работы, примерно на 50-70% выше, чем западных газопроводов [3,4].

Существующий парк ГПА имеет средний КПД примерно равный 28 % (тогда как современные агрегаты имеют КПД на уровне 36 %), что обуславливает перерасход топливного газа на 15-20 %. Однако удельный расход топливно-энергетических ресурсов, включая газ, на привод ГПА в течение многих лет снижается [5-7] в связи с вынужденной разгрузкой газотранспортной сети (после 1991 г. поступление газа и загрузка газопроводы постоянно снижаются). Снижение нагрузки позволяет снизить удельные энергозатраты на 20 %, что свидетельствует об имеющихся резервах снижения энергозатрат на работу ГПА как основных потребителей энергоресурсов единой газотранспортной системой (ЕГС).

Газопроводы, вводимшиеся в эксплуатацию в период интенсифицированной перекачки газа, часто не были оснащены системами телемеханики, а из-за возникшего дефицита запорной арматуры ее установка велась с увеличенным шагом, из-за чего в настоящее время при проведении ремонтных работ приходится стравливать огромное количество газа в атмосферу. Кроме того, из-за отсутствия современной системы учета и контроля газа, а также из-за использования морально и физически устаревшего оборудования на большинстве КС имеются потери природного газа. Большая доля потерь природного газа приходится на коммерческие

потери, которые в газовых хозяйствах определяются исходя из относительной погрешности приборов учета 2,5-5 % (при мировой практике 0,25 %) [8,9].

Из-за нехватки финансовых средств на ремонт и реконструкцию возрастает старение и износ основных производственных фондов, ухудшается техническое состояние газоперекачивающего парка и линейной части магистральных газопроводов. На настоящий момент состояние объектов газификации характеризуют следующие данные [10]:

- более 30 % газопроводов высокого, среднего и низкого давления находятся в эксплуатации более 30 лет и требуют обследования и реконструкции;
- большая часть узлов учета газа оборудована морально и физически устаревшей техникой, погрешности которой до 5 % превышают нормативные;
- около 20 % газоиспользующего оборудования выработало установленный заводом-изготовителем ресурс;
- основная часть газорегуляторных пунктов выработала 20 лет без замены оборудования;
- износ основных фондов предприятий газового хозяйства России составляет более 50 %.

По этим причинам значительная часть МГ работает с пониженным давлением, а в целом ЕГС России, запроектированная на высокую пропускную способность, оказалась в нерасчетном режиме пониженной загрузки, что приводит к увеличению энергетических затрат и требует проведения специальных мероприятий по снижению энергоемкости транспорта в новых условиях.

Поэтому основными направлениями энергосбережения, необходимыми для успешного развития системы газоснабжения России, являются [11-13]:

- экономия ресурсов газа для его использования на собственные нужды станции или для подачи потребителям;
- повышение эффективности работы существующего парка ГПА за счет поиска и устранения мест неэффективного использования газа;
- снижение эксплуатационных издержек за счет оптимизации режимов работы основного и вспомогательного оборудования КС;
- совершенствование системы учета и контроля газа в газовом хозяйстве, приведение ее к международным стандартам;
- постепенная замена устаревшего оборудования на современное высокотехнологичное, имеющее высокий КПД и малое потребление энергоносителей;
- снижение выбросов тепличных газов и вредных веществ в атмосферу.

Первые три направления из перечисленных могут быть реализованы с минимальными инвестиционными затратами путем системной оптимизации энергопотребления всех технологических агрегатов КС.

### **Системный анализ функционирования агрегатов КС**

Как известно, технология компримирования природного газа на КС МГ состоит из термодинамических процессов сжатия, расширения и охлаждения. При этом термодинамическая эффективность этих процессов всецело зависит от правильного выбора промежуточных параметров (оптимального давления и температуры газа) на выходе каждой ступени сжатия компрессора и в каждой последовательно расположенной КС.

Структурно-параметрическая оптимизация параметров давления и температуры газа в рамках КС может быть достигнута реализацией следующих мероприятий [14,15]:

1. Математическая обработка статистических данных КС по параметрам и объемам перекачиваемого газа и энергетическим показателям оборудования.

2. Проведение экспериментальных измерений и технологических испытаний нагнетателей природного газа с целью получения их рабочих и энергетических характеристик.

3. Проведение экспериментальных и технологических испытаний аппаратов воздушного охлаждения газа для анализа их фактических технических и энергетических характеристик.

4. Анализ обследованных линейных участков трубопроводов с целью получения их эксплуатационных характеристик во всех возможных режимах работы МГ.

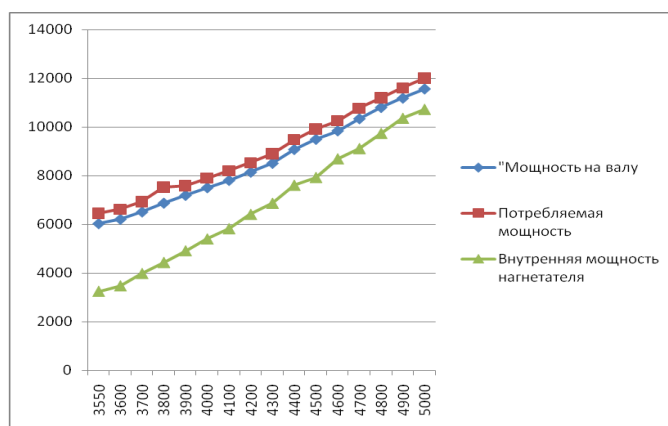
5. Формализация работы локальных участков МГ с КС и адаптация к ним математических моделей элементов системы сжатия, охлаждения и передачи газа по трубопроводам.

6. Структурно-параметрический синтез и декомпозиция агрегатов участка МГ, группы ГПА, АВО газа в единую оптимизационную модель теплоэнергетической системы.

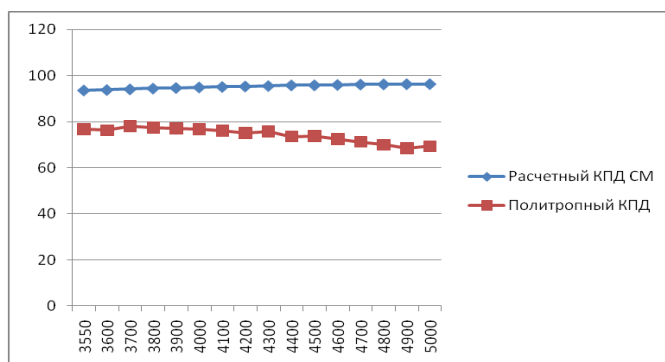
7. Разработка алгоритмического и ПО для компьютерного исследования функционирования КС и ЛПУ МГ и оптимизации параметров компримируемого газа.

8. Исследование энергетической эффективности перспективных технологий для регулирования режимов работы КС и рационального выбора технических средств их реализации.

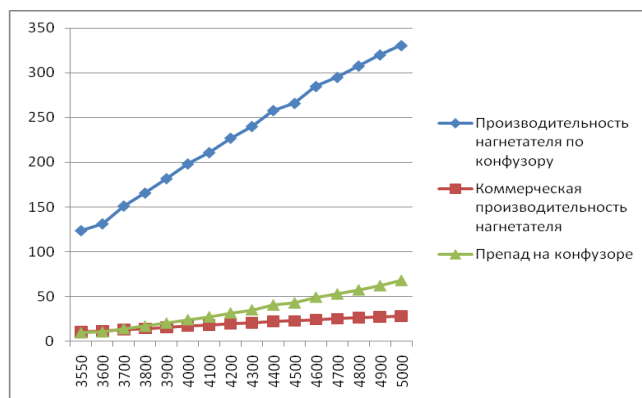
Так, экспериментальные исследования, проведенные на КС «Сеченовская» ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» МГ «Ямбург – Елец 2» (по ЭГПА №2) показали (рис. 1-4), что кратность диапазона реального изменения параметров перекачки природного газа достигает 5-6. Причем, анализ фактического функционирования КС выявил неэкономичные режимы работы технологического оборудования, обусловленные наличием объективных и субъективных факторов.



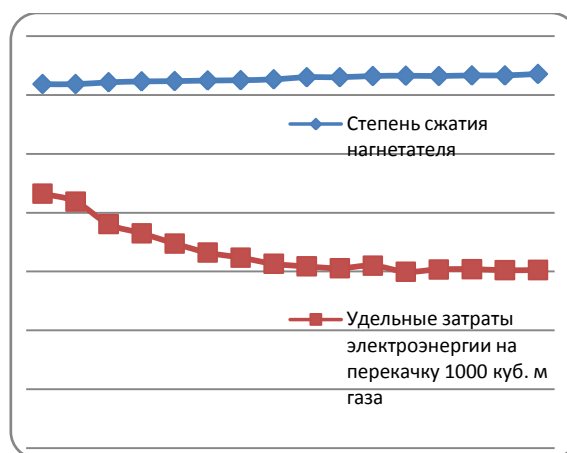
**Рисунок 1. Зависимости мощности на валу двигателя, потребляемой мощности и внутренней мощности нагнетателя от частоты вращения двигателя**



**Рисунок 2. Зависимость КПД приводного двигателя ГПА от частоты его вращения**



**Рисунок 3. Зависимости производительности нагнетателя по конфузору, коммерческой производительности и перепада на конфузоре от частоты вращения двигателя**



**Рисунок 4. Зависимость степени сжатия нагнетателя и удельных затрат электроэнергии на перекачку 1000 куб. м газа от частоты вращения двигателя**

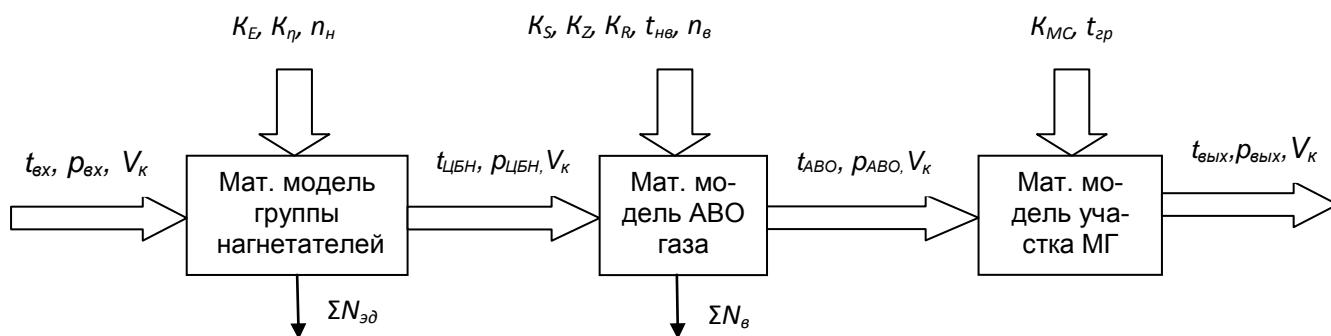
Главная причина такого положения заключается в том, что на практике в процессе эксплуатации МГ температура и давление природного газа на выходе КС выбираются диспетчерами не системно, без достаточного технико-экономического обоснования, а на основе имеющегося у них опыта и интуиции. Кроме того, нередко операторы не могут выставить требуемые параметры транспорта газа из-за отсутствия возможности их регулирования.

Это возникает, например, из-за ограниченной мощности установок охлаждения газа в период летнего максимума температур воздуха, отсутствия средств регулирования скорости нагнетателей или существенного различия характеристик, параллельно работающих ЭГПА.

Всесторонний анализ приведенных данных и аналогичных результатов по другим МГ, КС и отдельным ЛПУ показал необходимость комплексного использования методов системного анализа, математического моделирования и оптимизационного поиска решения системного управления в технологиях сжатия, охлаждения и транспорта газа по трубопроводам.

### **Математическое моделирование работы агрегатов КС**

На рис. 8 представлена функциональная схема, формализующая технологические процессы сжатия с нагреванием входящего газа (нагнетатели), охлаждения его после компримирования (АВО газа) и транспорта его по выходному участку газопровода. Рассмотрим особенности математического описания данных объектов.



**Рисунок 5. Схема формализации взаимодействия агрегатов КС:**

$t_i, p_i$  – значения температуры и давления природного газа на входе/выходе агрегатов,  $V_k$  – коммерческий расход природного газа,  $n_n$  – частота вращения вала нагнетателя,  $K_E, K_\eta$  – коэффициенты приведения паспортных характеристик степени сжатия и политропного КПД к реальным условиям,  $\Sigma N_{эд}$ ,  $\Sigma N_v$  – соответственно суммарные мощности приводов нагнетателей и вентиляторов АВО газа,  $t_{нв}, t_{зп}$  – соответственно температуры наружного воздуха и грунта,  $n_v$  – количество включенных вентиляторов,  $K_S, K_Z, K_R$  – коэффициенты, учитывающие степень загрязнения АВО с оребренной и с внутренней поверхности, а также техническое состояние уплотнений,  $K_{МС}$  – коэффициент местного сопротивления трубопровода

*Математическая модель группы центробежных нагнетателей*, как правило, строится по принципам идентификации и аппроксимации их фактических характеристик. При этом учитываются различные способы регулирования их производительности (дресселирование, байпасирование, изменение скорости вращения вала) и схемы группового включения на параллельную, последовательную и каскадную структуру работы.

Эквидистантное смещение паспортной характеристики вниз в модели ЦБН определяется коэффициентами приведения ( $K_E, K_\eta$ ), которые отражают техническое состояние нагнетателя и определяются экспериментально.

*Математическая модель аппаратов воздушного охлаждения газа* основана на теоретической зависимости естественной и вынужденной конвекции в трубчатых теплообменных аппаратах. Поскольку в каждом АВО установлено по два вентилятора, то при рассмотрении секции необходимо площадь установки поделить пополам [16-18].

Экспериментально установлено, что все поправочные коэффициенты принимают следующие значения:  $K_R = 1,0 \div 0,6$ ;  $K_S = 1,0 \div 0,55$ ;  $K_Z = 1,0 \div 0,85$ . Однако наибольшую сложность вызывает определение коэффициента  $K_S$ , который с увеличением загрязнений трубок АВО уменьшается из-за снижения разницы между температурами газа и стенки трубок.

*Математическая модель участка газопровода между двумя КС* основана на методиках аэродинамического и теплового расчета и предназначена для определения падения давления и температуры газа по длине трубопровода.

Как показал анализ сопоставления различных эмпирических выражений с эксплуатационными характеристиками рассматриваемых МГ, наилучшую корреляцию с экспериментальными данными дают результаты расчетов конечной температуры на выходе участка.

### **Алгоритм системной оптимизации энергопотребления КС**

Полученные математические модели теплоэнергетической системы сжатия, охлаждения и передачи газа по трубопроводам являются центральным звеном процедурного алгоритма выбора оптимальных параметров энергопотребления на выходе с каждой КС.

Математическое моделирование теплоэнергетической системы относится к задачам нелинейного программирования, решение которых связано с усовершенствованным алгоритмом прямого поиска возможных направлений, в основе которого лежит метод системной оптимизации, решающий нелинейные задачи с ограничениями типа неравенств.

Основными оптимизируемыми параметрами являются давление и температура газа после АВО на выходе  $i$ -й КС. В процессе оптимизации изменение параметров происходит в зависимости от вариаций переменных:

- количества работающих нагнетателей с учетом дискретного или плавного регулирования их скорости вращения;
- фактических величин скорости вращения и момента на валу каждого нагнетателя;
- количества включенных вентиляторов АВО газа с учетом дискретного или плавного регулирования их скорости вращения (синхронно или индивидуально).

Диапазон изменения оптимизируемых параметров может быть ограничен в связи с пропускной способностью МГ и температурными ограничениями. Так, например, в реальных условиях эксплуатации температура газа на входе в МГ ограничена диапазоном  $t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}$ , где  $t_{\min}$  – минимально-допустимая температура газа по условию недопущения выпадения гидрантов на стенках труб,  $t_{\max}$  – минимально-допустимая температура газа по условию недопущения повреждения противокоррозионной изоляции трубопровода.

В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать показатель минимума расхода электроэнергии во всей теплоэнергетической системе сжатия, охлаждения и передачи газа по трубопроводам. В результате исследований, например, влияния процесса охлаждения газа на энергетическую эффективность МГ установлено, что:

- снижение температуры газа на выходе КС носит позитивный характер, связанный со снижением аэродинамических потерь давления газа между соседними КС и с уменьшением удельных затрат энергии на компримирование на последующей КС;
- более глубокое охлаждение газа в АВО, достигаемое включением дополнительных вентиляторов, приводит к увеличенному потреблению электроэнергии.

При системном моделировании трех КС с увеличением числа включенных вентиляторов АВО от 0 до 32 на КС-1, снижается температура газа на её выходе, что приводит в итоге к повышению давления на входе КС-3. Но энергетический и экономический эффекты от охлаждения газа получаются только в том случае, когда поддерживается постоянным давление на выходе из системы (КС-3). Причем, для каждой температуры окружающего воздуха имеется свой минимум потребления электроэнергии, достигая экономии до 2670 МВт·ч.

### **Вывод**

Разработанный алгоритм и математические модели позволяют определять оптимальные термодинамические параметры компримируемого газа для любых современных КС. Однако практическая реализация данной системной оптимизации предполагает наличие автоматизированных систем стабилизации выходных параметров на базе регулируемых электроприводов каждой КС, внедрение которых требует дополнительного обоснования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### **Библиографический список**

1. **Крюков, О.В.** Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных



систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.

2. **Крюков, О.В.** Перспективы совершенствования электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Энергетик. 2018. № 10. С. 3-8.

3. **Крюков, О.В.** Энергоэффективность управления магистральными потоками газа с помощью электроприводных агрегатов // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2019. № 2 (36). С. 10-14.

4. **Степанов, С.Е.** Инновационные экологические технологии работы вентиляторных градирен в системах охлаждения / С.Е. Степанов О.В, Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019. Труды научного конгресса: в 3-х томах. 2019. С. 75-78.

5. **Мещеряков, В.Н.** Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП / В.Н. Мещеряков, Д.В. Ласточкин, О.В. Крюков // В сборнике: Современные сложные системы управления. Труды XII МНПК. – Липецк: ИПУ РАН. – 2017. – С. 153-158.

6. **Крюков, О.В.** Возможности энергосбережения в системах водооборота предприятий при регулировании вентиляторов градирен // Главный энергетик. 2019. № 4. С. 60-69.

7. **Крюков, О.В.** Адаптивные алгоритмы обеспечения устойчивости электрических машин мощностью 12,5 МВт // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докладов XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ. 2017. С. 215-221.

8. **Kadin, S.N., Kazachenko A.P., Kryukov O.V., Reunov A.V.** Questions related to the development of metrological assurance in the design of Gazprom facilities // Measurement Techniques. – 2011. – № 8. Т. 54. – С. 944-952.

9. **Захаров, П.А.** Оптимизация по энергопотреблению линейного участка магистрального газопровода / П.А. Захаров, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019. Труды научного конгресса: в 3-х томах. 2019. С. 44-47.

10. **Воронков, В.И.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» / В.И. Воронков, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Газовая промышленность. 2013. №7 (693). С. 74-78.

11. **Хлынин, А.С.** Экспертные системы управления электроприводными агрегатами газопровода "Парабель-Кузбасс" / А.С. Хлынин, О.В. Крюков // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ. 2017. С. 288-294.

12. **Крюков, О.В.** Способ стабилизации работы синхронных машин с использованием виртуального датчика нагрузки / О.В. Крюков, И.В. Гуляев, Д.Ю. Теплухов // Электротехника. 2019. № 7. С. 2-7.

13. **Крюков, О.В.** Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электробезопасность. 2014. № 6. С. 39-43.

14. **Захаров, П.А.** Системная оптимизация энергопотребления линейного участка газопровода / П.А. Захаров, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2018 Труды научного конгресса: в 3-х томах. Ответственный редактор А.А. Лапшин. 2018. С. 45-49.

15. **Васенин, А.Б.** Оценка применения систем электромагнитного подвеса роторов мощных электрических машин / А.Б. Васенин, А.С. Хлынин, О.В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. №11 (124). С. 33-41.

16. **Васенин, А.Б.** Техничко-экономический анализ энергетической эффективности аппаратов воздушного охлаждения / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019. Труды научного конгресса: в 3-х томах. 2019. С. 54-57.

17. **Крюков, О.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // В сборнике: Труды IX международной (XX

Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 428-432.

18. **Степанов, С.Е.** Универсальные стартер-генераторные комплексы приводных газотурбинных энергетических установок/ С.Е. Степанов [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 9 (122). С. 42-48.

**E. V. Bychkov, P. A. Zakharov, O. V. Kryukov**

## **SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF GAS TRANSPORT**

NSTU im. R. E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, OOO "Gazprom VNIIGAZ", Moscow

The current state of development of the country's gas industry is considered from the system positions of reliability, energy efficiency and environmental friendliness of natural gas transport. To reduce the energy intensity of technological installations on a large scale, the main directions of ensuring energy saving of the Russian gas supply system are proposed. The main one is the structural and parametric optimization of gas pressure and temperature parameters within the workshop, which can be achieved by implementing a set of scientific and technical measures using system analysis methods.

**Keywords:** gas main transport optimization, energy intensity, system analysis, energy efficiency

А.Б. Васенин, В.Г. Титов, О.В. Крюков

## ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ ТВЕРДОКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ООО «Газпром проектирование», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Представлены прикладные исследования по совершенствованию и внедрению возобновляемых и комбинированных автономных источников электроэнергии для удаленных потребителей объектов ТЭК. Дан анализ технических требований к автономным системам электроснабжения и современные технологии промышленного получения водородосодержащих компонентов топливных элементов. Представлены варианты и рабочие характеристики электрохимического генератора на основе ТОТЭ, которые обеспечивают среднюю мощность потребления по 2-ой категории надежности и энергоэффективности.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, вдольтрассовые потребители, система электрохимической защиты, надежность, автономные источники электроснабжения, твердооксидные топливные элементы.

### Введение

Расширение газотранспортных систем России и переориентация их на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона привели к значительному росту темпов и объемов нового строительства объектов добычи, транспорта, переработки и подземного хранения газа.

Повышение конкурентоспособности транспорта природного газа, снижение его энергоемкости и себестоимости напрямую связаны с модернизацией существующих систем электроснабжения (СЭС) [1-4]. Вопрос эффективного и надежного электропитания основных технологических агрегатов компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов (МГ) [5-7] и вдольтрассовых потребителей (ВТП) [8-10] является одним из наиболее важных и актуальных для газовой промышленности. Ежегодно ПАО «Газпром» использует на нужды газотранспортных предприятий более 12 млрд кВт·ч электроэнергии с динамикой роста на 20-30%. ВТП МГ потребляют относительно небольшую мощность, но надежность СЭС этих объектов должна обеспечиваться СТО Газпром 2-6.2-149-2007 по 1-ой и 2-ой категории.

Принятые в последнее время нормативные акты РФ стимулируют поиск инновационных энергосберегающих технологий СЭС на базе возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) для объектов и потребителей различных отраслей.

### Анализ требований к электроснабжению вдольтрассовых потребителей

Основными ВТП (линейными потребителями) электроэнергии МГ являются:

- установки электрохимической защиты (ЭХЗ),
- контролируемые пункты линейной телемеханики (КП ТМ),
- оборудование радиорелейной (РРЛ) связи,
- газоизмерительные станции (ГИС),

- узлы запуска (приема) очистных устройств (УЗОУ, УПОУ),
- газораспределительные станции (пункты) (ГРС, ГРП),
- узлы редуцирования газа (УРГ),
- дома операторов, линейных обходчиков (ДО, ДЛО),
- вертолетные площадки (ВЛП) и др.

Суммарная мощность этих потребителей достигает по разным газотранспортным предприятиям от 0,25 до 9 МВт, а протяженность вдольтрассовых ЛЭП от 150 до 4800 км. Подобный разброс параметров предполагает при проектировании СЭС каждого участка индивидуальный адаптированный подход к формированию СЭС, источников и схемы АИЭ. Технические характеристики основных ВТП представлены в табл. 1 [11-14].

Таблица 1

**Технические характеристики основных ВТП**

Наименование объекта ВТП	Категория надежности СЭС по СТО Газпром 2-6.2-149-07	Средняя мощность, кВт	Основной источник питания	Резервный источник питания
Установки ЭХЗ	2	7	ВЛ-(6)10кВ	ВЛ-(6)10кВ АИЭ
КП ТМ	1	5	ВЛ-(6)10кВ	АИЭ
РРЛ связь	1	5	ВЛ-(6)10кВ	АИЭ
ГИС	1	20	ВЛ-(6)10кВ	ВЛ-(6)10кВ АИЭ
УЗОУ	3	2	ВЛ-(6)10кВ АИЭ	---
УПОУ	1	2	ВЛ-(6)10кВ	ВЛ-(6)10кВ АИЭ
ГРС, ГРП	3	40	ВЛ-(6)10кВ	---
УРГ	3	15	ВЛ-(6)10кВ АИЭ	---
ДО, ДЛО	3	10	ВЛ-(6)10кВ	---
ВЛП	2	3	ВЛ-(6)10кВ	АИЭ

Структурообразование современных СЭС линейными потребителями МГ определяется их индивидуальными особенностями, среди которых главными являются [15-18]:

- значительная протяженность МГ и рассредоточенность ВТП по трассе,
- удаленность объектов от существующих внешних централизованных электросетей,
- малые электрические нагрузки линейных потребителей (2 – 40 кВт).

Новый стратегический отраслевой документ по перспективам энергетики для МГ «Концепция энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «Газпром» на период 2011-2020 гг.» (Приказ ПАО «Газпром» №364 от 28.12.2010 г.) нацеливает проектировщиков на «... участие в создании агрегатов малой энергетики, включая возобновляемые источники энергии, ... и ЭСН нового поколения с экономичным расходом топлива...». В соответствии с действующими нормативными документами отраслевого и государственного статуса АИЭ для автономных СЭС должны обеспечивать:

1. Блочное-комплектное исполнение заводской готовности (источники питания, аппаратура управления, учета и распределения электроэнергии).
2. Обеспечение потребителей качеством электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
3. Мощностной ряд АИЭ 1, 2, 4, 8, 16, 30, 40, 60, 100 кВт.

4. Ряд номинальных напряжений 24, 48, 110 В постоянного тока, 230 В переменного тока 50 Гц.
5. Обеспечение питания ВТП в диапазоне мощностей 10:1 (до 10%  $S_{ном}$ ).
6. Защиту от магнитных полей промышленной частоты по ГОСТ Р 50648-94.
7. Защита от поражения электрическим током при прикосновении к токоведущим и металлическим нетокведущим частям, которые могут быть под напряжением.
8. Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности по ГОСТ 12.1.010 и средствами пожаротушения с временем срабатывания до 10-15 с.
9. Обеспечение стойкости к внешним механическим (ГОСТ 17516.1-90) и климатическим воздействиям (ГОСТ 15150-69).
10. САУ ВИЭ должна обеспечивать:
  - устойчивую работу СЭС линейными потребителями МГ,
  - оптимальное регулирование параметров вырабатываемой электроэнергии,
  - длительную параллельную работу электроагрегатов СЭС между собой,
  - рациональное распределение генерируемых мощностей ВИЭ,
  - адаптивное управление системами собственных нужд СЭС,
  - оперативный мониторинг состояния агрегатов и параметров электроэнергии.

### Основные виды ВИЭ для СЭС ВТП

Различный уровень приоритетов по технологическим требованиям питающего напряжения, технико-экономической и экологической значимости результатов генерирования и использования первичных источников энергии определил широкий спектр оптимальных для потребителя ВИЭ СЭС.

Для газотранспортных систем наивысшим приоритетом СЭС является обеспечение надежности работы всех объектов МГ, включая ВТП. Однако экономические и экологические аспекты при производстве электроэнергии непрерывно усиливают свое влияние и поэтому при выборе ВИЭ для конкретных объектов необходим комплексный учет всех особенностей их применения на данной территории.

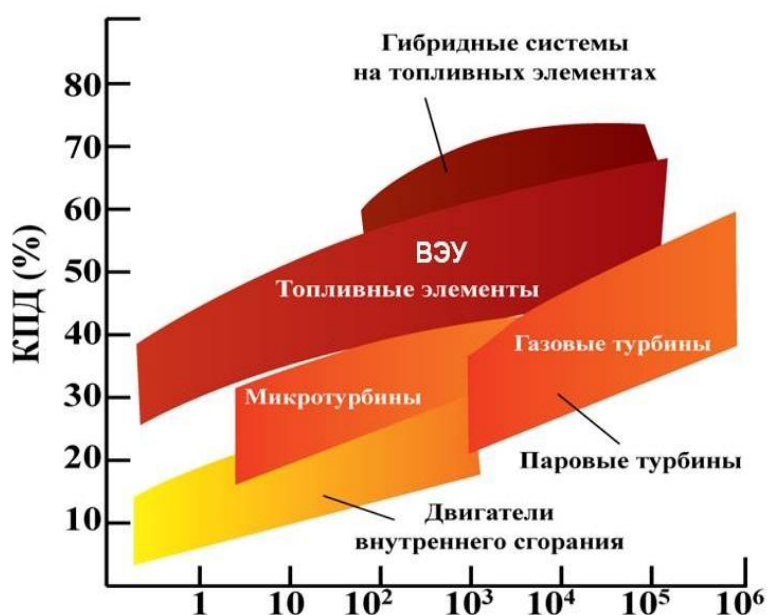


Рисунок 1. Сравнение энергоэффективности ВИЭ

В настоящее время в мировой и отечественной практике наиболее распространены для ВТП следующие типы ВИЭ (рис. 1) [19-23]:

- микротурбинные установки на основе высокоскоростных газовых турбин оригинальной конструкции, обеспечивающих функционирование СЭС при набросах до 100 % нагрузки, большой ресурс, надежность и длительную работу при низких нагрузках;
- агрегаты на топливных элементах, преобразующих химическую энергию доступных видов топлива (в т.ч. водорода) в электроэнергию в процессе электрохимического синтеза и обладающих КПД более 50 %, высокой надежностью, долговечностью и простотой эксплуатации;
- ветроэнергетические установки с горизонтальной или вертикальной осями вращения, имеющие большой коэффициент использования ветрового потока (до 0,593) и низкий уровень шумо-вибрационных характеристик;
- солнечные батареи модульного исполнения с высокими показателями прямого преобразования солнечного света в электроэнергию;
- турбодетандерные установки, вырабатывающие электроэнергию за счет утилизации потенциальной энергии природного газа на стадии его передачи из МГ с давлением 30-75 кгс/см<sup>2</sup> в сеть потребителя с давлением 1-12 кгс/см<sup>2</sup>;
- каталитические термоэлектрические установки с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую с использованием полупроводниковых термоэлементов;
- двигатели Стирлинга, представляющие собой поршневые двигатели с внешним подводом тепла от любого источника и отличающиеся экономичностью, низкими шумо-вибрационными характеристиками и малой токсичностью отработанных газов;
- паротурбогенераторы (преобразователи энергии ОРМАТ) – полностью автономные энергоустановки мощностью 4,0 кВт для непрерывной генерации напряжения без технического обслуживания.

Примеры практического использования перечисленных энергоисточников уже имеются на различных линейных участках МГ России. Однако в каждом конкретном случае целесообразность применения тех или иных источников электроснабжения должна быть обоснована путем технико-экономических расчетов с учетом всех затрат, надежности, технологических факторов и быстроты окупаемости (рис. 1).

Полная сравнительная оценка современных АИЭ представлена в табл. 2.

**Таблица 2**

**Сравнительная оценка современных АИЭ**

Генерирующая установка	Принцип	Преимущества	Недостатки
Микротурбины	Сжигание газа (природного, сжиженного, биогаз)	Наброс 100% нагрузки, Устойчивая работа с низкой нагрузкой, высокая надежность, широкий ряд мощностей	Ресурс 40-60 тыс.ч, ТО до 8 тыс. ч., замена масла через 24 тыс. ч.
ВЭУ	Электрогенератор ветропоток	Возобновляемая энергия, КПД до 60%, Экологичность	Зависит от ветра. Шум, вибрация
Солнечные элементы	Фотогенератор	Возобновляемая энергия, Экологичность	Зависит от числа солнечных дней
ПТГ Ормат	Паротурбогенератор	Надежность 20 лет, без ТО, Не требует обслуживания	Наличие газа, стоимость, ограничена мощностью

Топливные элементы	Электро-химические реакции	Прямое получение энергии с КПД 50%, экологичность	Стоимость
Турбодетандеры	Преобразование энергии снижения давления газа	Полезное использование энергии газа при снижении давления	Не рентабелен при низких нагрузках, расход газа
Каталитические термоэлектрические установки	Термоэлектро- генератор	Компактность, надежность, невысокая стоимость	КПД до 10%, Ограничение мощности
Двигатель Стирлинга	Поршневой двигатель с внешним подводом тепла	Экономичность, экологичность	Необходимость источника тепла

### Реализация ТОТЭ на объектах добычи и транспорта газа

Топливный элемент (электрохимический генератор) - устройство, которое преобразует химическую энергию топлива (водорода) в электрическую в процессе электрохимической реакции напрямую, в отличие от традиционных технологий, при которых используется сжигание твердого, жидкого и газообразного топлива.

Формально ТОТЭ напоминает гальваническую батарею. Изначально батарея должна быть заряжена, при разрядке ее «топливо» расходуется. В ТОТЭ для производства электрической энергии использует топливо, подаваемое от внешнего источника.

Для производства электрической энергии может использоваться не только чистый водород, но и другое водородосодержащее сырье, например, природный газ, аммиак, метанол или бензин. В качестве источника кислорода, также необходимого для реакции, используется обычный воздух. Основные преимущества ТОТЭ:

- Более эффективны, чем ДВС, поскольку для топливных элементов нет термодинамического ограничения коэффициента использования энергии.
- Коэффициент полезного действия ТОТЭ составляет 50%, в то время у ДВС составляет 12-15%, а КПД паротурбинных энергетических установок не превышает 40%. При использовании тепла и воды эффективность топливных элементов еще больше увеличивается.
- В отличие от ДВС КПД ТОТЭ остается очень высоким и при работе не на полной мощности, величина мощности ТОТЭ увеличивается добавлением отдельных блоков.
- Доступность топлива, надежность (в топливном элементе отсутствуют движущиеся части), долговечность, ресурс и простота эксплуатации.
- Стабильность работы – не зависят от наличия Солнца, ветра, погодных и температурных ограничений, а также региона размещения.
- Экологичность – отсутствуют выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.

Недостаток топливных элементов на сегодняшний день – относительно высокая цена. Характеристика и статус электрохимических генераторов разных типов показаны в табл. 3.

## Характеристики различных ТОТЭ для питания ВТП, включая ЭХЗ

Тип ЭХЗ	КПД	Статус	Область применения
AFC	~60 %, топливо водород, ~40%, топливо метан	≤220 кВт	Энергоустановки для космических, подводных и военных объектов, транспорта (автомобили, автобусы) и децентрализованной стационарной энергетики
PEMFC	~60 %, топливо водород, ~40%, топливо метан	≤250 кВт	
PAFC	~40%, топливо метан	≤11 МВт	Энергоустановки для децентрализованной стационарной энергетики и транспорта (корабли, электровозы, грузовые автомобили)
MCFC	45-50%, топливо метан	≤2,8 МВт	
SOFC	45-55%, топливо метан	≤250 кВт	

## Выводы

1. Анализ состояния систем электроснабжения показал, что в настоящее время надежное и энергоэффективное использование автономных энергоисточников на территории РФ, включая магистральные газопроводы, является актуальной проблемой. Энергоемкость ТЭК РФ в 4 раза выше, чем в США, в 3,6 раза – чем в Японии и в 2,5 раза – чем в Германии. В результате анализа технологических режимов работы автономных СЭС и структур АИЭ выработаны технические требования к комбинированным энергоисточникам для энергоэффективного электроснабжения удаленных потребителей.

2. Исследования новых структур автономных СЭС на базе ТОТЭ показали их преимущества по сравнению с традиционными. Разработаны модели элементов СЭС в виде уравнений линейных регрессий, отслеживающие возмущения и корректирующие максимум выработки энергии. АИП на базе ТОТЭ позволяет:

- Достичь максимального КПД и энергоэффективности источника питания.
- Обеспечить экологичность без шума при минимальной токсичности выбросов.
- Формировать модульность конструкции при максимальной надежности работы.
- Обеспечить стабильность генерации с быстрой реакцией на перепады мощности.
- Применять любые исходные виды топлив.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

## Библиографический список

1. **Воронков, В.И.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» / В.И. Воронков, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Газовая промышленность. 2013. №7 (693). С. 74-78.

2. **Kryukov, O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 1. С. 56-62.

3. **Васенин, А.Б.** Альтернативные источники электроэнергии на объектах добычи и транспорта углеводородов / А.Б. Васенин [и др.] // В сборнике: Великие реки' 2019 труды



научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 37-40.

4. **Воронков, В.И.** Векторное управление возбуждением синхронных двигателей ГПА / В.И. Воронков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 204-208.

5. **Крюков, О.В.** Анализ моноблочных конструкций электрических машин для ГПА // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 3. № 4. С. 53-58.

6. **Крюков, О.В.** Подход к прогнозированию технического состояния ЭГПА // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 9. С. 30-34.

7. **Пин, М.В., Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Gulyaev I.V.** Selection of power semiconductor devices for parallel connection // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 6. С. 336-341.

8. **Васенин, А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В.** Энергетический комплекс // Патент №113085, МПК H02J 3/00, H02J 3/46. Опубл. 27.01.2012.

9. **Туганов, Р.Б.** Энергетические установки для линейных потребителей газопровода "Сахалин-Хабаровск-Владивосток" / Р.Б. Туганов, А.В.Серебряков, О.В. Крюков // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017 Материалы докладов XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ - Нижегородского политехнического института. 2017. С. 256-262.

10. **Крюков, О.В., Гребнев А.А.** Стенд для исследований асинхронных электроприводов // Патент на полезную модель RU 31079, 10.07.2003. Заявка № 2002135168/20 от 30.12.2002.

11. **Киянов, Н.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП / Н.В. Киянов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 29-34.

12. **Васенин, А.Б.** Электрооборудование стенда для обкатки и комплексных испытаний двигателей / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 5. С. 51-61.

13. **Крюков, О.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа / О.В. Крюков [и др.] // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 428-432.

14. **Захаров, П.А.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования ЭГПА / П.А. Захаров [и др.] // Контроль. Диагностика. 2008. № 11. С. 43-49.

15. **Крюков, О.В.** Опыт проектов АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 1. С. 2-7.

16. **Васенин, А.Б.** Энергоэффективные системы электроснабжения электроприводов нефтегазопроводов / А.Б. Васенин [и др.] // В сборнике: Труды IX международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 380-384.

17. **Воронков, В.И.** Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей МГ / В.И. Воронков, И.Е. Рубцова, О.В. Крюков // Газовая промышленность, 2010, №3. – С.32-36.

18. **Васенин, А.Б.** Оптимальные законы регулирования возобновляемых энергоисточников на удаленных объектах ТЭЖ / А.Б. Васенин [и др.] // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017 Материалы докладов XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ - Нижегородского политехнического института. 2017. С. 196-202.

19. **Васенин, А.Б.** Проектирование электромеханической части и систем управления энергетическими установками газотранспортных потребителей / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2011. № 5-1. – С.47-51.

20. **Хлынин, А.С.** Применение экологических систем в автономных электростанциях собственных нужд газодобычи // В сборнике: Великие реки' 2019 труды научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 50-54.

21. **Крюков, О.В.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования / О.В. Крюков [и др.] // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

22. **Бычков, Е.В.** Новые возможности малой энергетики на принципах SMARTGRID / Е.В. Бычков, А.Б. Васенин, О.В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 10 (123). С. 40-50.

23. **Kryukov, O.V., Serebryakov A.V.** Active and adaptive algorithms of autonomous wind power plants control and monitoring // В сборнике: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings 2. 2016. С. 7911445.

**A. B. Vasenin, V. G. Titov, O. V. Kryukov**

### **POWER SUPPLY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION SYSTEMS ASED ON SOLID OXIDE FUEL CELLS**

ООО "Gazprom engineering", Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev,  
Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

Applied research on improving and implementing renewable and combined Autonomous power sources for remote consumers of fuel and energy facilities is Presented. The analysis of technical requirements for Autonomous power supply systems and modern technologies for industrial production of hydrogen-containing components of fuel cells is given. The variants and performance characteristics of an electrochemical generator based on TOT are presented, which provide an average power consumption for the 2nd category of reliability and energy efficiency.

**Keywords:** main gas pipeline, long-distance consumers, electrochemical protection system, reliability, Autonomous power supply sources, solid oxide fuel cells.

А.Б. Васенин, А.С. Хлынин, О.В. Крюков

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

ООО «Газпром проектирование», АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Рассмотрены основные функциональные системы, обеспечивающие надежную и комфортную работы обслуживающего персонала компрессорных станций магистральных газопроводов. Представлены задачи, технологические процессы и аппаратные средства современных площадочных сооружений и перспективы их совершенствования. Показано, что реализация энергосберегающих технологий в цехах за счет систем собственных нужд обеспечивает значительный технико-экономический эффект в целом по транспорту природного газа.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы, водоотведение, отопление, освещение, компрессорная станция.

### Введение

Непосредственные энергетические затраты на технологические установки транспорта углеводородного сырья с месторождений до потребителей по магистральным газопроводам составляет от 75-90 % общего расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на эти цели. В работах [1-4] в соответствии с «Концепцией энергосбережения и повышения энергетической эффективности ПАО «Газпром» на период 2021-2030 гг.» рассмотрены основные задачи и решения по обеспечению технического перевооружения транспорта газа. Однако доля внутреннего потребления ТЭР компрессорных станций (КС) на собственные нужды также велика, что обуславливает необходимость энергосбережения для всех систем и механизмов. Основными потребителями ТЭР на собственные нужды КС являются насосы водоподдачи, пожарные и водоотведения [5-10], отопление производственно-эксплуатационных помещений [11-13], внутреннее и наружное освещение [14-18], электроснабжение операторных и удаленных потребителей [19-21].

Рассмотрим отдельно современные принципы реализации энергосберегающих технологий для перечисленных выше групп потребителей КС.

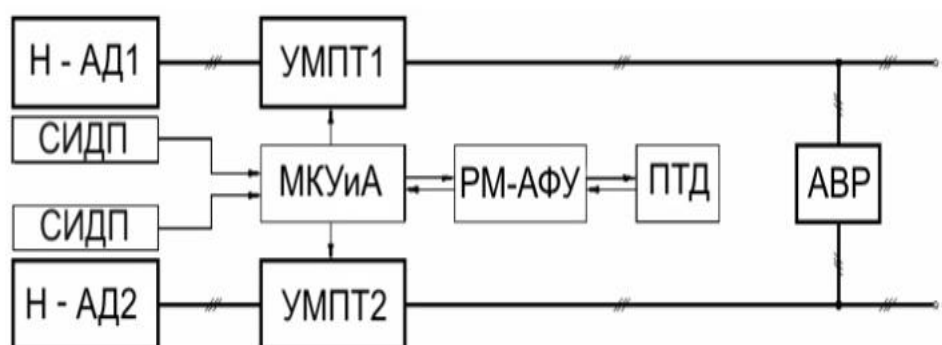
### Автоматизированные системы водоотведения

Сравнительный анализ технологических процессов водоподдачи и водоотведения позволяет выработать наиболее целесообразные технические решения модернизации электрооборудования КНС, приводящие к быстрой их окупаемости, оптимальной надежной работе и минимальным ущербам от аварий. К таким техническим решениям относятся:

- замена центробежных насосов на погружные с модернизацией запорной арматуры и обратных клапанов, с целью исключения аварийных режимов “завоздушивания” систем;

- управление работой насосных агрегатов в кратковременных режимах  $S2$  путем включения-отключения асинхронных двигателей на номинальную скорость, чем обеспечиваются их наилучшие энергетические (КПД и  $\cos \varphi_{ном}$ ), динамические и тепловые характеристики;
- исключение гидроударов в трубопроводах и бросков тока в статорных обмотках при пуско-тормозных режимах благодаря использованию устройств плавного пуска;
- применение надежного вспомогательного электрооборудования (энергоисточников для бесперебойной работы, датчиков охраны, систем вентиляции, дренажа и отопления);
- использование взаимосвязанной системы современных датчиков параметров (тока, напряжения, температуры, уровня, давления, времени работы, расхода электроэнергии и стоков в характерных и диктующих точках) с интерфейсом для оперативной индикации и передачи информации диспетчеру;
- внедрение системы телемеханики и диспетчеризации с использованием двух каналов радио-Ethernet и комплектования диспетчерских постов с визуализацией и протоколированием текущей и статистической информацией.

Две последние технические задачи являются системными, наиболее сложными и адаптированными под конкретные реализации КНС. Разработаны варианты структурных схем автоматизации, локальных систем управления и сбора данных (СУСД) КНС различной мощности и конфигурации оборудования (рис. 1).



**Рисунок 1. Структурная схема АСУ КНС:** АВР – система автоматического ввода резерва, УМПТ – устройство мягкого пуска и торможения, МКУиА – система локальной автоматики и микроконтроллерного управления, Н-АД – насосные агрегаты с асинхронными электродвигателями, СИДП – система интеллектуальных датчиков параметров КНС, РМ-АФУ – радиомодем с антенно-фидерным устройством, ПТД – посты телемеханики и диспетчеризации

В штатном режиме СУСД функционирует следующим образом (рис. 2). Измеряются показания датчиков, архивируются в резидентной памяти и ожидается вызов от радиомодема ПК диспетчера; после вызова и установления связи считывается архив и текущие данные и разрывается связь. Полный цикл обмена определяется объемом информации, форматом и скоростью обмена конкретного типа радиомодема и интерфейса.

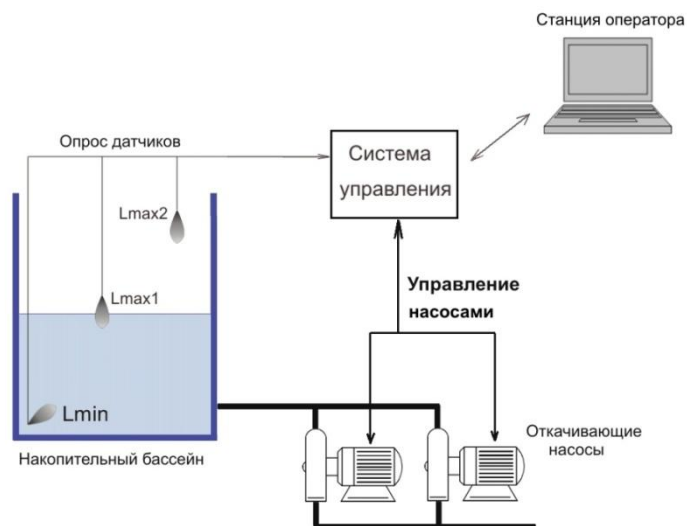


Рисунок 2. Принцип функционирования СУСД

### Автоматизированные системы наружного освещения

Системы освещения КС должны обеспечивать: нормы освещённости, показатели качества освещения, бесперебойность действия освещения и удобство обслуживания и управления. Нормирование освещения осуществляется в соответствии со сводом правил СП 52.13330.2011 "Естественное и искусственное освещение" и СТО Газпром РД 1.14-127-2005 "Нормы искусственного освещения".

Основными источниками света на КС в настоящее время являются (рис. 3):

- для наружного освещения – НЛВД (ДНаТ), мощность потребления которых составляет около 25% от суммарной мощности сети освещения КС;
- для освещения производственных помещений – ЛЛ, ДРЛ мощностью до 150 Вт и СД. Мощность, потребляемая освещением производственных зданий, составляет около 35% от суммарной мощности сети освещения КС;
- для освещения административных зданий используются в основном ЛЛ и КЛЛ, потребляемая мощность которых составляет около 50% от суммарной мощности сети КС.

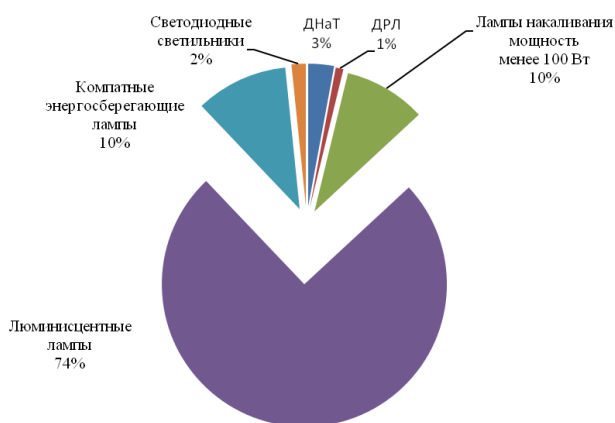


Рисунок 3. Структура применения источников света на КС и фото мачты освещения

Электроснабжение сети наружного освещения выполняется от комплектных трансформаторных подстанций энергетического и ремонтно-эксплуатационного блоков, аппаратов воздушного охлаждения газа по III категории надёжности электроснабжения.

Осветительные приборы со светодиодами (СД) обладают рядом преимуществ:

- большой срок службы, что сводит к минимуму обслуживание светильников;
- низкое энергопотребление, так как СД являются энергосберегающими ИС и их использование позволяет существенно экономить потребление электроэнергии;
- температурный диапазон эксплуатации СД составляет  $-50...+60$  °С;
- стойкость к механическим воздействиям из-за отсутствия стеклянных деталей, нитей накаливания, что делает их устойчивыми к механическим воздействиям, ударам и вибрации;
- высокая световая отдача и высокий уровень экологической и пожарной безопасности;
- направленность излучения – выпускается широкий ассортимент СД по углам рассеяния светового потока  $10\div 140^\circ$ . Поэтому конструкция светодиодов и светильников не требует специальных отражателей или рассеивателей;
- безынерционность и возможность управления посредством контроллеров и диммеров, в том числе с плавным изменением яркости и цвета свечения.

В настоящее время светильники с СД нашли применение при освещении таких площадок как узел подключения, водозаборные сооружения, газораспределительные станции и пункты. Для данных площадок характерны небольшие освещаемые площади и высота установки прожекторов.

### **Автоматизированные системы воздушного отопления помещений**

Создание комфортных условий работы персоналу и максимальное энергосбережение являются важнейшими факторами организации работ на удаленных объектах нефтегазовой отрасли в условиях сурового климата. Они способствуют повышению производительности труда и адекватности принятия решений в различных ситуациях.

Современное энергооборудование и системы автоматизации, а также инновационные алгоритмы позволяют реализовать наилучшие условия в производственных помещениях в соответствии с нормативами и автоматически поддерживать все параметры внутреннего микроклимата инвариантно от метеоусловий среды.

В замкнутой инвариантной системе автоматического регулирования (САР) приточно-втяжной вентиляцией воздуха (ПВВ) поддержание заданного значения основного регулируемого параметра (температуры воздуха в помещениях) или изменение ее по определенному закону обеспечивается параметрами настройки автоматических регуляторов. В зависимости от разности между температурой уставки и измеренным значением температуры регулятор вырабатывает сигнал, воздействующий на исполнительный механизм (электропривод вентилятора), который изменяет скорость вращения вала вентилятора и интенсивность потока.

Электропривод вентилятора является интегрирующим звеном и его влияние по возможности уменьшают, используя обратные связи. Для управления ПВВ-системами вместо традиционных ПИ-регуляторов целесообразнее использовать новые законы регулирования, основанные на “нейротехнологии и нечеткой логики” (neuro&fuzzylogic), в которых в качестве модели оптимальных режимов используется нейронная система. Данный способ заключается в использовании PMV-параметров (Predicted Mean Voice – предсказанное усредненное голосование), определяющих для человека комфорт среды по индексу дискомфорта  $D_n$ .

ПВВ-система в результате систематизации опытных данных автоматически выбирает режим, наиболее комфортный для людей. Величины  $D_n$  отражают уровни различных факторов, от которых зависит комфорт: температура, влажность, интенсивность потоков, тип одежды (летняя/зимняя). Ощущение теплоты или прохлады является следствием температуры воздуха и влажности. Так температура 26 °С и влажность 50% комфортны летом, а температура 22 °С будет комфортной зимой.

Такой подход хорошо реализуется в нечетких логических регуляторах (НЛР), которые предпочтительны перед традиционными ПИ-регуляторами при обработке сложных нелинейных процессов.

ПВВ-система с НЛР работает по принципу: показания приборов сначала фаззифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются, дефаззифицируются и в виде сигналов подаются на исполнительные устройства (вентиляторы). Поэтому скорость вращения вентилятора (производительность) будет меняться по значениям функций принадлежности. Следовательно, найдя лингвистическим методом суммарную функцию принадлежности, после дефаззификации получаем скорость вентилятора.

АСУ приточно-вытяжной вентиляции помещений КС должна соответствовать общему высокому уровню требований к объектам КС и обеспечивать комфортные условия персоналу. Специфика функционирования станций контроля и управления выдвигает ряд специальных требований к эксплуатации систем зданий, расположенных на площадке КС. Например, при срабатывании датчиков пожарной сигнализации часть системы ПВВ должна быть полностью обесточена, и все воздушные заслонки закрыты, а другая часть, подающая воздух в аккумуляторную, должна оставаться в работе.

ПВВ-система в автоматическом режиме реализована с помощью процедурного алгоритма, записанного в память ПЛК МС8, трех релейных модулей MR8 и интерфейса связи RS-485 между контроллером и исполнительными механизмами. Конструктивно устройство выполнено в виде шкафа PrismaPlus, который содержит ПЛК, релейные модули, блоки питания Telemecanique. Программирование ПЛК производится в графической среде Конграф с помощью функциональных блоков. Принципиальная схема АСУ ПВВ в среде Конграф приведена на рис. 4.

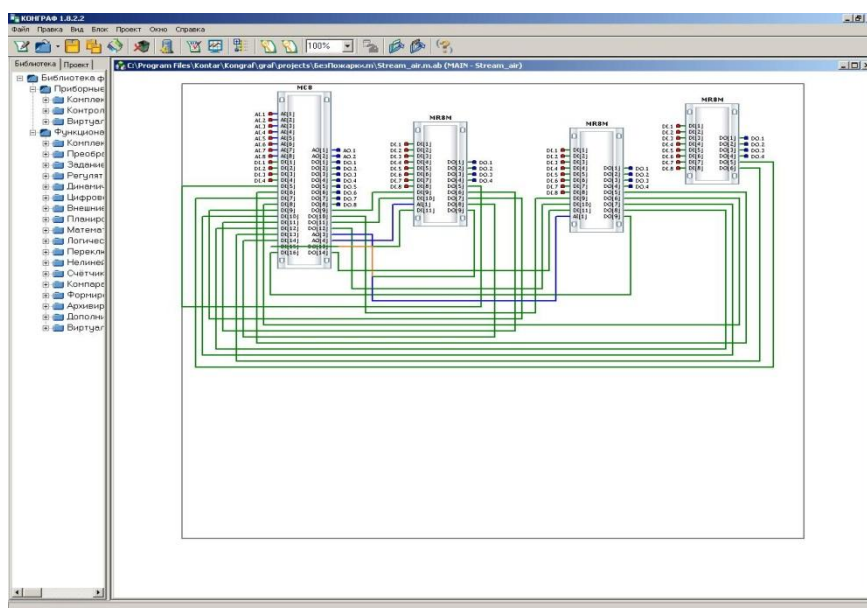
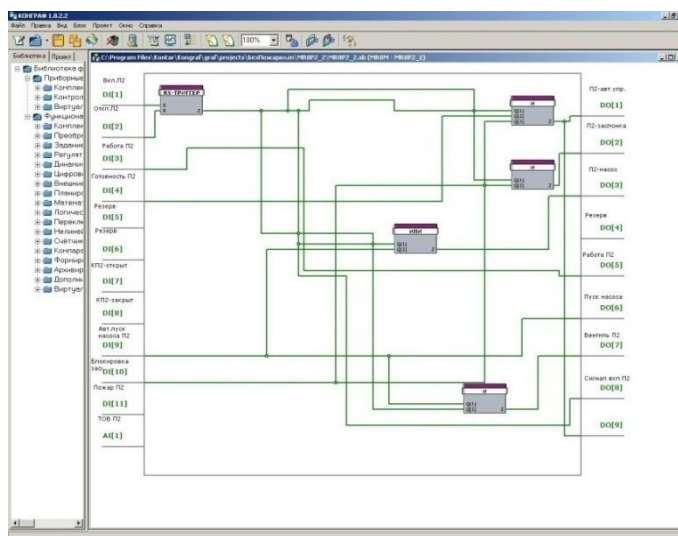


Рисунок 4. Вид САУ температурой воздуха в среде разработки Конграф



Реальные аналоговые и дискретные входы ПЛК и релейных блоков обозначены красными прямоугольниками, а зеленые линии – виртуальные входы/выходы, передающие команды по интерфейсу RS-485. Реальные входы/выходы контроллера подключаются к исполнительным механизмам системы. Внутренняя логика релейных блоков MR8 представлена на рис. 5.



**Рисунок 5. Внутренняя логика релейного модуля MR8 в среде Конграф**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

#### **Библиографический список**

1. **Крюков, О.В.** Параметрическая идентификация технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // В сборнике: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 Труды. Под общей редакцией Д.А. Новикова. 2019. С. 558-563.
2. **Сонин, Ю.П., Шакарян Ю.Г., Прусаков Ю.И., Юшков С.А., Гуляев И.В.** Способ управления двигателем двойного питания, выполненном на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 1610589. Заявка № 4297304 от 06.07.1987.
3. **Левин, П.Н., Мещеряков В.Н.** Электропривод переменного тока // Патент на изобретение RU 2254666 С1, 20.06.2005. Заявка № 2004102144/09 от 26.01.2004.
4. **Крюков, О.В., Степанов С.Е.** Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент на полезную модель RU 107427, 10.08.2011. Заявка № 2011111826/07 от 29.03.2011.
5. **Крюков, О.В.** Программно-аппаратный комплекс автоматизации систем городского и промышленного водоотведения /О.В. Крюков [и др.] // Экологические системы и приборы. 2019. № 9. С. 3-9.
6. **Киянов, Н.В., Крюков О.В., Блинов М.В.** и др. Автоматизированная система управления работой канализационной насосной станции // Патент на полезную модель RU 66755, 27.09.2007. Заявка № 2006138928/22 от 03.11.2006.
7. **Васенин, А.Б.** Основные проблемы и новые технические средства автоматизации системы КНС / А.Б. Васенин [и др.] // Экологические системы и приборы. 2019. № 11. С. 3-8.
8. **Крюков, О.В.** О модернизации электрооборудования насосных систем промышленного водоотведения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 10. С. 48-53.
9. **Крюков, О.В.** Анализ аппаратных и программных средств автоматизации электрооборудования водоотведения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019.



№ 11. С. 45-51.

10. **Крюков, О.В.** Технические и программные средства автоматизации городского и промышленного водоотведения // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2018. № 6 (107). С. 25-29.

11. **Крюков, О.В.** Экологичные и энергоэффективные системы наружного освещения компрессорных станций // Экологические системы и приборы. 2018. № 10. С. 28-34.

12. **Kryukov, O.V., Serebryakov A.V.** Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016. Т. 24. № 2. С. 128-131.

13. **Мещеряков, В.Н.** Активные фильтро-компенсирующие устройства для систем регулируемого электропривода постоянного тока / В.Н. Мещеряков, А.А. Коваль - Липецк: ЛГТУ. 2008.

14. **Pin, M.V., Bepalov N.N., Kapitonov S.S., Gulyaev I.V.** Selection of power semiconductor devices for parallel connection // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 6. С. 336-341.

15. **Бычков, Е.В.** Метод и средства оптимизации температурных режимов производственно-эксплуатационных помещений компрессорных станций / Е.В. Бычков, А.Б. Васенин, О.В. Крюков // Экологические системы и приборы. 2019. № 10. С. 21-31.

16. **Бычков, Е.В.** Алгоритмы оптимизации температурных режимов отопления производственных помещений / Е.В. Бычков, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019 труды научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 34-37.

17. **Крюков, О.В.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, А.В. Серебряков // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

18. **Васенин, А.Б.,** Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума. НГАСУ. 2017. С. 93-96.

19. **Савченков, С.В., Репин Д.Г., Беляков А.А., Громова Е.А., Крюков О.В.** Конструкция траншеи для прокладки трубопровода на участках тектонических разломов // Патент на полезную модель RU 124349, 20.01.2013. Заявка № 2012112984/06 от 03.04.2012.

20. **Крюков, О.В.** Инновационные решения по прокладке магистральных газопроводов в зонах активных тектонических разломов / О.В. Крюков [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 3 (79). С. 35-42.

21. **Крюков, О.В.** Особенности проведения диагностики трубопроводов в местах пересечения со строящимися газопроводами // Химическая техника. 2018. № 10. С. 25-27.

**A. B. Vasenin, A.S. Khlynin, O. V. Kryukov**

## **WAVELET TRANSFORM IN PROBLEMS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES**

Gazprom design LLC, Nizhny Novgorod, Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

Energy-saving technologies of gas transportation along main gas pipelines with the implementation of algorithms based on frequency-controlled electric drives of technological installations are considered. The paper presents the features and algorithms of the wavelet transform in the mathematical description and synthesis of automated electric drives with frequency control. Examples of using wavelet transform algorithms for analysis and synthesis of high-speed electric drives in various industries are proposed.

**Keywords:** main gas pipeline, technological installation, frequency-controlled electric drive, mathematical description, wavelet transform.

П.А. Захаров, В.Г. Титов, О.В. Крюков

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Предложена стратегия развития систем энергообеспечения подводных добычных комплексов исходя из специфических особенностей акваторий Арктики РФ. Показана возможность реализации проектов морских месторождений углеводородного сырья на основе новой аппаратной базы электромашиностроения и интеллектуальных алгоритмов управления и мониторинга электроприводными газоперекачивающими агрегатами. Представлены высоконадежные системы электроснабжения, которые обеспечивают создание высокотехнологичных, энергоэффективных и долговечных агрегатов и автоматизированных систем на основе безлюдных технологий. Рассмотрены особенности реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей электроприводных газоперекачивающих агрегатов с интеллектуальными системами управления и диагностики.

**Ключевые слова:** подводные добычные комплексы, электроприводной газоперекачивающий агрегат, системы электроснабжения, интеллектуальные системы управления и диагностики, безлюдные технологии.

### Введение

В настоящее время электроприводные нефте- и газоперекачивающие агрегаты являются единственным и безальтернативным вариантом реализации энергетических систем обустройства на подводных добычных комплексах [1-4]. Новая аппаратная база электромашиностроения и интеллектуальные алгоритмы управления и мониторинга [5-7] обеспечивают создание высокотехнологичных, энергоэффективных и надежных агрегатов и автоматизированных систем на основе безлюдных технологий [8-10]. Особенно это актуально в сочетании с комплексом систем энергообеспечения промышленных объектов, где высоки требования по живучести объектов обустройства подводных месторождений.

Рассмотрим особенности реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [11-13] с интеллектуальными системами управления и диагностики (ИСУД) [14-17]: безредукторное и безмасляное исполнение в едином монокорпусе с нагнетателями; надежный электромагнитный подвес ротора; плавный безопасный пуск под нагрузкой; частотное и частотно-токовое релейное регулирование параметров и автоматическая адаптивная перестройка законов управления; встроенная система мониторинга и прогнозирования технического состояния [18-21].

### Особенности обустройства подводных добычных комплексов

Одной из проблем при обустройстве морских удаленных месторождений нефти и газа является сложность обеспечения надежного энергоснабжения. Из-за большого расстояния от берега в силовом кабеле возникают потери, обусловленные использованием систем переменного тока, который нужен для электроприводов технологических агрегатов. Существующие системы электроснабжения подводно-добычных комплексов (ПДК) нефтегазовых месторождений в основном реализованы на шельфе Норвегии. Изучены принципы подводной передачи энергии на большие расстояния с помощью высоковольтных

кабелей постоянного тока и особенности применения автономных инверторов и оригинальных конструкций приводных электродвигателей в системе технологических процессов компримирования на ПДК.

Ввиду большого количества необустроенных месторождений газа в Арктическом регионе России и короткого навигационного периода тема данной работы является актуальной, так как разработка шельфовых месторождений в замерзающих морях возможна только подводным способом. Развитие системы энергоснабжения ПДК позволит в короткие сроки ввести в эксплуатацию труднодоступные месторождения в акваториях Тихого и Северного Ледовитого океана.

Сегодня на мировом рынке среди компаний проектантов и изготовителей подводного оборудования мировое лидерство у следующих компаний: FMC Kongsberg Subsea AS, Aker Solutions (Subsea), Cameron и GE Vetco. Подводное устьевое оборудование представляет собой комплекс специальных механизмов, устройств и систем, обеспечивающих при бурении разведочных скважин и добычи в штатном режиме механическую связь буровой установки с устьем скважины, расположенном на дне моря.

Технологии подводной подготовки углеводородов существенно расширяют гибкость в добыче продукции скважин. В состав подводного комплекса входит: центробежный газовый компрессор; электропривод с системой охлаждения; оборудование регулирования частоты вращения привода компрессора; оборудование подачи и распределения электропитания для потребителей блока; дистанционно-управляемая запорная арматура; контрольно-измерительные приборы; системы управления, аварийного выключения, мониторинга текущего состояния.

### Опыт проектов ПДК в акватории северных морей Норвегии

Несомненным лидером в области применения подводных технологий при освоении шельфовых месторождений нефти и газа является Норвегия. Она сумела одновременно создать свою национальную инновационную систему и сделать ее частью глобальной, добиться, чтобы иностранные корпорации, проводили локализацию своих технологий в стране.

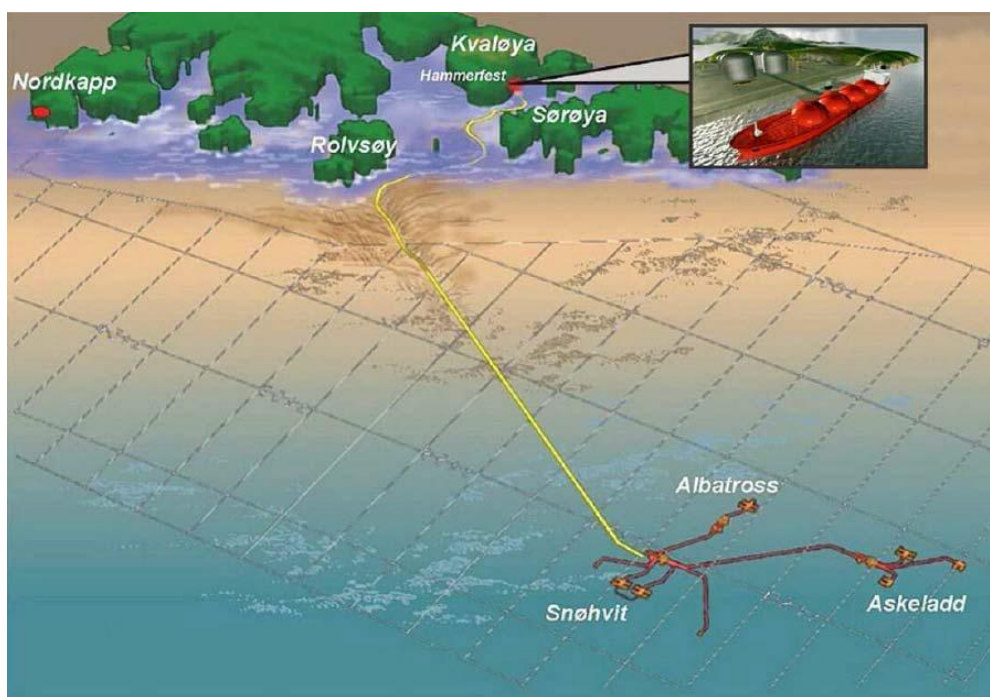


Рисунок 1. Схема реализации проекта автоматизированного ПДК

В 2001 году в Норвегии была принята национальная стратегия «Нефть и газ в 21 веке» (OG21), которая определила 8 направлений исследований, а в 2008 году Научно-исследовательскому совету выделено 5691 миллион крон (более 28,5 млрд рублей). Один из проектов - WS SeabedRig DEMO2000 по испытаниям полностью автоматизированного ПДК (рис. 1).

### Российская атомная энергетика для обустройства ПДК

Учитывая удельные капитальные вложения и прогнозируемую себестоимость электроэнергии, можно говорить о целесообразности и экономической эффективности атомных энергоисточников единичной мощности, не превышающей 300 МВт (что по определению МАГАТЭ соответствует диапазону станций малых мощностей (АСММ)), при решении проблемы энергообеспечения перспективных арктических месторождений.

Главное требование к энергетическим установкам в условиях Арктического шельфа – повышенная надежность и минимальное воздействие на окружающую среду. Не менее актуально требование минимального обслуживания вплоть до полной автономности с использованием безлюдных технологий. Таким условиям идеально отвечают судовые атомные энергетические установки (рис. 2). Интегральный опыт эксплуатации малой атомной транспортной энергетике превышает шесть тысяч реакторо-лет. Промышленностью произведено более 500 реакторных установок.

Так, например, предлагается атомная турбогенераторная установка (АТГУ) «Шельф» для энергоснабжения технических средств, работающих на нефтегазовых месторождениях, в том числе удаленных на значительное расстояние от берега и имеющих круглогодичный цикл работы в течение 25–30 лет. Она может поставляться в виде готовой к эксплуатации энергокапсулы в составе наземного или подводного исполнения.

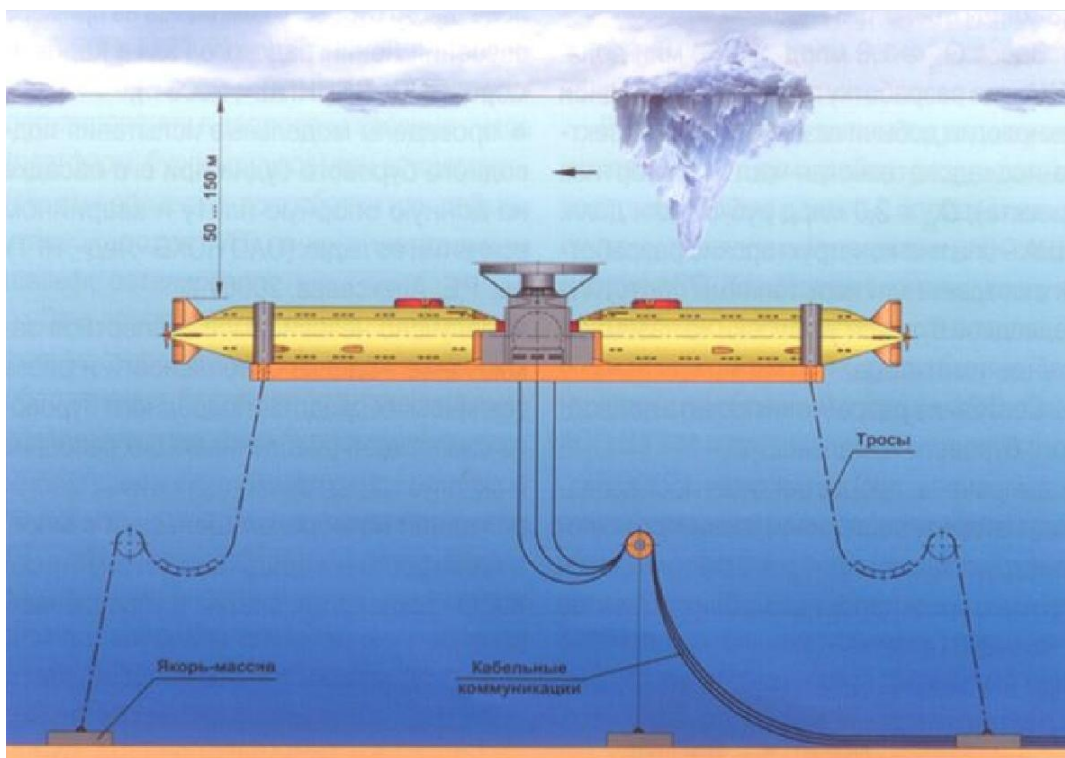


Рисунок 2. Атомная энергоустановка на базе реакторной установки «Шельф»

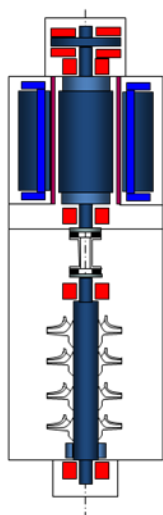


АТГУ «Шельф» включает двухконтурную атомную РУ с водо-водяным интегральным реактором тепловой мощностью 28 МВт, турбогенераторную установку, обеспечивающую выработку электроэнергии мощностью 6000 кВт и систему автоматизированного и дистанционного управления, контроля и защиты техническими средствами установки. Согласно проекту после выработки ресурса активной зоны, установка должна забираться на завод для её перезарядки. Но, имея большой опыт перезарядки реакторов атомных подводных лодок на плаву, вполне возможно решить задачу перезагрузки объекта на твердом основании.

### Особенности реализации электроприводных газоперекачивающих агрегатов

Ужесточение требований по реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей ЭГПА с интеллектуальными системами управления и диагностики обусловили создание новой техники: безредукторное и безмасляное исполнение в едином монокорпусе с нагнетателями; надежный электромагнитный подвес ротора; плавный безопасный пуск под нагрузкой; частотное и частотно-токовое релейное регулирование параметров и автоматическая адаптивная перестройка законов управления; встроенная система мониторинга и прогнозирования технического состояния.

Повышение требований к минимизации массогабаритных показателей КС для компактности «пятна застройки», обеспечения безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней спецочистки и увеличение надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки приводных двигателей ЭГПА в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем (рис. 3).



- Осевой магнитный подшипник в герметичном корпусе
- Радиальный магнитный подшипник в герметичном корпусе
- Массивный ротор двигателя
- Асинхронный двигатель в герметичной оболочке
- Общий защитный кожух под давлением
- Муфта трубчатого вала
- Многоступенчатый центробежный компрессор

**Рисунок 3. Схема вертикальной компоновки ЭГПА**

Конструктивно ЭГПА имеет компактную обмотку статора с жидкостным охлаждением и массивный ротор. Технология с компактными торцевыми обмотками применялась ранее для тихоходных АД специального назначения и впервые была применена для высокоскоростных электроприводов.

Капсулированные ЭГПА с вертикальной осью вращения имеют следующие параметры:

- номинальные мощности 7,5; 9,5; 12,2 и 15 МВт,

- номинальные скорости 7600 - 20000 об/мин,
- количество рабочих колес компрессора 6 и 8,
- схема колес – последовательная и сдвоенная,
- капсула: длина 4,8 м, ширина 4,1 м, высота 4,6 м,
- снижение пятна застройки – более 40 %,
- герметичная оболочка держит 150 бар и 200 °С.

Главным направлением дальнейшего совершенствования мощных электрических машин переменного тока для нужд ПДК сегодня является повышение надежности, ресурса и энергоэффективности установок. Это связано с постоянным ужесточением требований по их эксплуатации на объектах повышенной опасности (ОПО), с одной стороны, и тенденциями интеграции приводных электрических машин с исполнительными механизмами и системами автоматического управления, с другой.

Повышение требований к минимизации массогабаритных показателей ПДК для компактности «пятна застройки», обеспечения безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней спецочистки и увеличение надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки приводных двигателей ЭГПА в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем.

Подобные уникальные конструктивные решения позволяют реализовать малолюдные и безлюдные технологии эксплуатации компрессорных установок с автоматическим дистанционным управлением и оптимизацией работы всего подводного добычного комплекса. Кроме того, имеются практические наработки характерных примеров многолетней успешной промышленной эксплуатации инновационных систем электроснабжения с секционирующими пунктами на базе реклоузеров для электроприводных газо- и нефтеперекачивающих агрегатов, обеспечивающих реализацию малолюдных и безлюдных технологий, включая автономные системы энергообеспечения арктических месторождений углеводородов. Предложены модульные инвариантные структуры и законы оптимального управления системами энергообеспечения потребителей обустройства морских месторождений нефти и газа, которые позволяют гарантировать энергоэффективное электропитание основных технологических установок и других потребителей подводного добычного комплекса.

## **Выводы**

Таким образом, новые конструктивные решения систем энергообеспечения и электроснабжения ПДК на базе электродвигателей переменного тока мегаваттного класса с горизонтальной и вертикальной осями вращения, а также совершенствование систем управления частотно-регулируемым электроприводом, позволяют повысить надежность и энергоэффективность технологических агрегатов в рамках безлюдных технологий для важнейшей топливно-энергетической отрасли промышленности.

## **Библиографический список**

1. **Мещеряков, В.Н.** Научные основы и энергосберегающие технологии обеспечения подводных добычных комплексов / В.Н. Мещеряков, О.В. Крюков // В книге: Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019) Тезисы докладов по материалам VIII МНТК. 2019. С. 41.

2. **Туганов, Р.Б.** Атомные энергоустановки в энергообеспечении подводных добычных комплексов / Р.Б. Туганов, О.В. Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019 труды научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 47-50.

3. **Крюков, О.В.** Особенности энергоснабжения подводных добычных комплексов морских месторождений углеводородов // В сб.: Фёдоровские чтения 2019 XLIX МНПК с элементами научной школы. Под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. Москва, 2019. С. 357-359.

4. **Иванов, А.Н.** Совершенствование систем буровых растворов, применяемых на месторождениях СП "Вьетсовпетро" / А.Н. Иванов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2019. № 12. С. 107-111.

5. **Мещеряков, В.Н.** Системы электропривода переменного тока с частотно-токовым релейным управлением // Липецк: ЛГТУ. 2011.

6. **Левин, П.Н., Мещеряков В.Н.** Электропривод переменного тока // Патент на изобретение RU 2254666 С1, 20.06.2005. Заявка № 2004102144/09 от 26.01.2004.

7. **Herasimov, S., Tymochko O., Kolomiitsev O., al.** Formation analysis of multi-frequency signals of laser information measuring system // Eureka: Physics and Engineering. 2019. № 5. С. 19-28.

8. **Крюков, О.В.** Поддержка диспетчерских решений газотранспортных систем на базе оценки их энергоэффективности / О.В. Крюков [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4 (80). С. 71-81.

9. **Васенин, А.Б.** Новая система поддержки диспетчерских решений предприятий ТЭК по результатам оценки их энергоэффективности / А.Б. Васенин [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 12 (125). С. 16-24.

10. **Крюков, О.В.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования / О.В. Крюков [и др.] // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

11. **Тутаев, Г.М., Никулин В.В., Гуляев И.В., Ломакин А.Н.** Электропривод переменного тока // Патент на изобретение RU 2313895 С1, 27.12.2007. Заявка № 2006127310/09 от 27.07.2006.

12. **Сонин, Ю.П., Шакарян Ю.Г., Прусаков Ю.И., Юшков С.А., Гуляев И.В.** Способ управления двигателем двойного питания, выполненном на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 1610589. Заявка № 4297304 от 06.07.1987.

13. **Ilin, M.V., Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Gulyaev I.V.** Selection of power semiconductor devices for parallel connection // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 6. С. 336-341.

14. **Крюков, О.В., Степанов С.Е.** Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент на полезную модель RU 107427, 10.08.2011. Заявка № 2011111826/07 от 29.03.2011.

15. **Васенин, А.Б.** Объединение газотранспортных предприятий на основе интеллектуальных систем принятия решений / А.Б. Васенин [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 10 (123). С. 5-13.

16. **Сулин, В.А.** Развитие эталонной и испытательной базы для поверки высокоточных расходомеров в рабочих условиях / В.А. Сулин, О.В. Крюков // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 2 (78). С. 78-86.

17. **Васенин, А.Б.** Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума. НГАСУ. 2017. С. 93-96.

18. **Васенин, А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В.** Энергетический комплекс // Патент №113085, МПК H02J 3/00, H02J 3/46. Оpubл. 27.01.2012.

19. **Крюков, О.В.** Обеспечение электромагнитной совместимости на производственных объектах ТЭК // Энергетик. 2019. № 5. С. 12-15.

20. **Мещеряков, В.Н.** Активные фильтро-компенсирующие устройства для систем регулируемого электропривода постоянного тока / В.Н. Мещеряков, А.А. Коваль. - Липецк: ЛГТУ. 2008.

21. **Васенин, А.Б., Крюков О.В., Титов В.Г.** Автономная система бесперебойного электроснабжения, использующая возобновляемый источник энергии // Патент на полезную модель RU 113615, 20.02.2012. Заявка № 2011138865/07 от 22.09.2011.

**A. B. Vasenin, V. G. Titov, O. V. Kryukov**

**POWER SUPPLY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION SYSTEMS  
BASED ON SOLID OXIDE FUEL CELLS**

ООО "Gazprom engineering", Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev,  
Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

Applied research on improving and implementing renewable and combined Autonomous power sources for remote consumers of fuel and energy facilities is Presented. The analysis of technical requirements for Autonomous power supply systems and modern technologies for industrial production of hydrogen-containing components of fuel cells is given. The variants and performance characteristics of an electrochemical generator based on TOT are presented, which provide an average power consumption for the 2nd category of reliability and energy efficiency.

**Keywords:** main gas pipeline, long-distance consumers, electrochemical protection system, reliability, Autonomous power supply sources, solid oxide fuel cells.



С.Е. Степанов, А.Б. Васенин, О.В. Крюков

## ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

ООО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Рассмотрены энергосберегающие технологии транспорта газа по магистральным газопроводам с реализацией алгоритмов на базе частотно-регулируемых электроприводов технологических установок. Представлены особенности и алгоритмы вейвлет-преобразования при математическом описании и синтезе автоматизированных электроприводов с частотным регулированием. Предложены примеры использования алгоритмов вейвлет-преобразования для анализа и синтеза быстродействующих электроприводов в различных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, технологическая установка, частотно-регулируемый электропривод, математическое описание, вейвлет-преобразование.

### Введение. Постановка задачи

Как известно [1-4], энергосберегающие принципы эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) основаны на реализации оптимальных режимов работы, связанных с максимальным использованием их пропускной способности, при минимальных энергозатратах на транспортировку. В значительной степени эти режимы определяются работой компрессорных станций (КС) и характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие научно обоснованных нормативных методик оптимизации [5-8].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе, снижать температуру перекачиваемого газа за счет его охлаждения, использовать газопроводы большего диаметра с очисткой внутренней полости трубопровода [9-11].

Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85\* (п.3.116) «В комплексе средств автоматизации компрессорных цехов (КЦ) следует предусматривать системы автоматического регулирования, обеспечивающие поддержание заданных величин давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты газоперекачивающих агрегатов (ГПА)» [12-15]. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление КЦ с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера [16-18].

Для реализации данной энергоэффективной технологической схемы система электропривода ЭГПА должна быть частотно-регулируемой и инвариантной ко всем параметрам возмущениям детерминированного и стохастического характера [5,7], то есть комбинированной САР (по отклонению и возмущению) с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру – давлению газа на выходе компрессорной станции.

Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению (давления газа) и САР по возмущению (стохастических возмущений), обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях различных случайных воздействий средствами инвариантной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА. При этом решается искомая задача повышения точности обработки требуемой величины давления газа на выходе КС и стабилизации процесса компримирования газа средствами ЭГПА. Этому способствует строгое соблюдение параметров основного технологического процесса компримирования газа, что позволяет повысить производительность и надежность газопровода в условиях действия возмущающих воздействий.

### Традиционные методы формализации процессов в ЧРП

В настоящее время наиболее удобным и адекватным методом анализа статических и квазистатических систем управления частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) с точки зрения физики протекающих электромагнитных и электромеханических процессов является математический аппарат преобразования Фурье и связанных с ним частотных характеристик [1,19]. Непрерывное преобразование Фурье сигнала  $f(t)$  можно трактовать как его разложение по базису комплексных экспонент  $e^{-j\Omega t}$  для всех частот  $\Omega$  на интервале  $(-\infty, +\infty)$ :

$$F(\Omega) = \int f(t)e^{-j\Omega t} dt. \quad (1)$$

Комплексная функция  $F(\Omega)$  характеризует частотный спектр сигнала во всем диапазоне времени. Для стационарного сигнала на любом достаточно большом отрезке времени его спектральный состав будет практически одинаковым. Для нестационарного сигнала частотный спектр, полученный в разных отрезках времени, может существенно отличаться. Изображение функции Фурье  $F(\Omega)$  по (1) не имеет временной координаты и не содержит информации, когда в нестационарном сигнале появились и исчезли составляющие тех или иных частот. Одним из путей решения этой проблемы является переход к оконному преобразованию Фурье:

$$F(\Omega, \tau) = \int f(t)W(1 - \tau)e^{-j\Omega t} dt, \quad (2)$$

где  $W(1-\tau)$  – функция-окно.

Преобразование Фурье находится от произведения сигнала  $f(t)$  на окно, которое занимает разные положения во времени в соответствии со значением параметра  $\tau$ . Результат преобразования  $F(\Omega, \tau)$  по (2) имеет как частотную, так и временную координату, позволяя отслеживать изменение частотного спектра во времени. Однако из-за фиксированной ширины окна эта информация может быть существенно искажена. Слишком узкое окно дает хорошее разрешение по времени, но теряет важные особенности частотного спектра. Слишком широкое окно хорошо отражает частотный спектр, но не локализует его информацию во времени.

### Основы вейвлет-преобразования для систем управления электроприводами

Более продвинутый подход к анализу нестационарного сигнала обеспечивает вейвлет-преобразование (*wavelet*). Сигнал  $f(t)$  раскладывается по базису функций, называемых вейвлетами:

$$\Psi(t) = \Psi \left[ (t - \tau)/\alpha \right] . \quad (3)$$

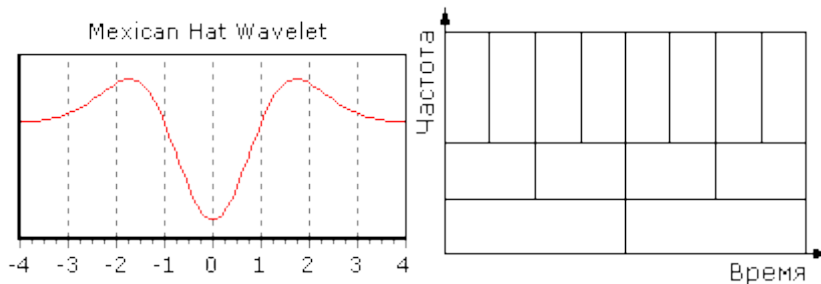
Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $f(t)$  выполняется по формуле

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \int f(t) \Psi(t - \tau)/\alpha dt. \quad (4)$$

В результате преобразования (4) получается двумерная функция – вейвлет-образ  $f(t)$ .

Параметр масштаба  $\alpha$  пропорционален периоду колебаний вейвлета, а параметр  $\tau$  – это временной сдвиг вейвлета. Значение  $W(\alpha, \tau)$  получается тем больше, чем лучше сигнал  $f(t)$  коррелирует с вейвлетом при конкретных параметрах  $\alpha$  и  $\tau$ . При этом в сигнале сильнее выражена составляющая частоты, соответствующая  $\alpha$  в момент  $\tau$ .

Базисные функции вейвлетов, если они определены на пространстве  $L^2(\mathbf{R})$  (пространство комплекснозначных функций  $f(t)$  на прямой с ограниченной энергией), колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к нулю по мере увеличения абсолютного значения аргумента (рис. 1).



**Рисунок 1. Вейвлет "Сомбреро" и фазовая плоскость вейвлет-преобразования**

В задачах анализа ЧРП для данного сигнала  $f(t)$  исследуется его вейвлет-образ. В задачах синтеза вейвлет-образ формируется соответствующим регулятором из вейвлет-образа сигнала рассогласования так, чтобы получить желаемый сигнал  $f(t)$ .

В системах автоматического управления (САУ) временной закон управления может быть получен на основе некоторого правила преобразования вейвлет-образа сигнала. При этом интерес представляет возможность непосредственной обработки спектров сигналов при цифровой реализации регуляторов и САУ в целом [1,20]. Идея состоит в том, что непрерывность и стационарность частотных характеристик регулятора в аналоговой системе избыточны в каждом конкретном режиме работы ЧРП и недоиспользуются в целом. Более того, они могут служить источником нежелательных эффектов, например, пульсаций тока статора при расширении полосы пропускания контура скорости. Если же в канале управления имеются колебательные звенья САУ или упругости, то при попытке повышения быстродействия контура скорости могут возникнуть автоколебания.

Известно [1,20], что сигнал датчика скорости содержит полезный сигнал и совокупность помех. Изложенные представления о сигнале регулятора скорости как наборе синусоидальных сигналов позволяют представить подавление оборотных помех как ограничение полосы пропускания путем увеличения постоянной фильтра в канале обратной связи по скорости. Однако при этом ухудшаются статические и динамические характеристики электропривода. Если же изменять полосу пропускания регулятора скорости на время переходного процесса

приема-сброса нагрузки или возникновения упругих колебаний, то получается доказанный на практике заметный технологический эффект.

Эта идея перестраиваемого регулятора нашла практическое воплощение в турбокомпрессорных и вентиляторных установках ЭГПА МГ с ПИИ-регулятором скорости. При этом коэффициент пропорциональной части устанавливается в зависимости от системных отклонений, а коэффициент интегральной части зависит от скорости вращения, что улучшает и динамические характеристики, и сглаживает все стохастические выбросы.

### **Дискретное вейвлет-преобразование и кратномасштабный анализ**

Очевидно, идея использовать вейвлет-преобразование для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима при их обработке на ПК). Основная трудность заключается в том, что формулы для дискретного вейвлет-преобразования нельзя получить просто дискретизацией соответствующих формул непрерывного преобразования. Однако И.Добеши удалось найти метод, позволяющий построить серию ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов. Стало возможным построить алгоритм, реализующий быстрое вейвлет-преобразование на дискретных данных (алгоритм Малла). Достоинство этого алгоритма заключается в его простоте и высокой скорости: и на разложение, и на восстановление требуется порядка  $cN$  операций, где  $c$  – число коэффициентов, а  $N$  – длина выборки. В последнее время теория дискретного вейвлет-преобразования переживает просто революционный рост. Появились и развиваются такие направления, как биортогональные вейвлеты, мультивейвлеты, вейвлет-пакеты.

В этой связи можно расширить области применения вейвлет-преобразования:

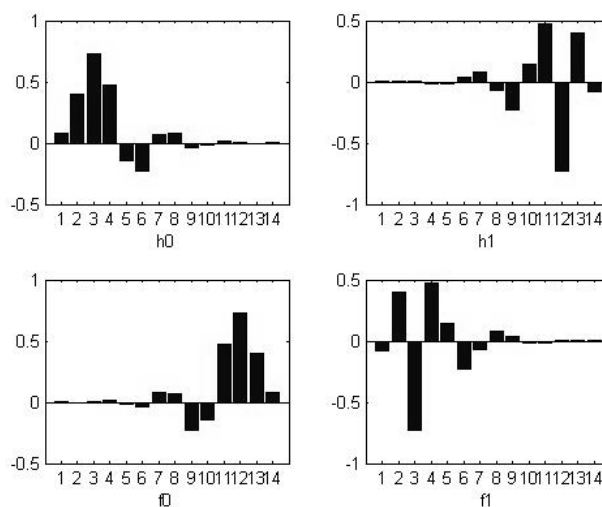
1. Обработка экспериментальных данных. Вейвлет-преобразование дает наиболее наглядную и информативную картину результатов эксперимента нестационарных сигналов, позволяет очистить исходные данные от шумов и случайных искажений и оценить особенности данных и направление их дальнейшей обработки.
2. Обработка изображений технического зрения и сжатие данных. Используя вейвлет-преобразование, можно увеличить (уменьшить) изображение, выделить детали и повысить его качество. При ортогональном многомасштабном анализе данные очень хорошо сжимаются обычными статистическими методами, а вейвлет-преобразование не вносит дополнительной избыточности в исходные данные, и сигнал может быть полностью восстановлен с использованием фильтров при сжатии в 3-10 раз без потерь информации.
3. Нейросети и другие механизмы анализа данных. Большие трудности при обучении нейросетей создает сильная зашумленность данных или наличие большого числа "особых случаев". Такие помехи способны скрывать характерные особенности данных или выдавать себя за них и могут сильно ухудшить результаты обучения. Поэтому рекомендуется очистить данные, прежде чем анализировать их. Благодаря наличию быстрых и эффективных алгоритмов реализации, вейвлеты представляются удобным механизмом очистки и обработки данных для статистических приложений, систем искусственного интеллекта.
4. Системы передачи данных и цифровой обработки сигналов. Благодаря высокой эффективности алгоритмов и устойчивости к воздействию помех, вейвлет-преобразование является мощным инструментом в тех областях, где традиционно использовались другие методы анализа данных, например, преобразование Фурье. Возможность применения их, а также характерные особенности поведения вейвлет-преобразования в частотно-временной области позволяют существенно расширить и дополнить возможности подобных систем.

Практическая применимость вейвлет-преобразования связана с его дискретизацией. Дискретизация параметров  $\alpha$  и  $\tau$  в выражении (4) осуществляется не равномерно, а на логарифмической сетке через степени 2. Связь непрерывных вейвлетов (3) и дискретных выражается формулами

$$\alpha = 2^j; \tau = K \cdot 2^j, \quad (5)$$

где  $j$  и  $K$  – целые числа, а  $\tau$  – дискретное время.

Разложение дискретного сигнала  $f(t)$  по дискретному базису  $\Psi_{jk}(t)$  является дискретным вейвлет-преобразованием, вейвлет-образ сигнала которого представляет собой двумерную матрицу коэффициентов.



**Рисунок 2. Ортогональные фильтры Добеши, масштабирующая функция  $\psi$  и вейвлет функция  $\phi$**

Одним из первых известных ортогональных дискретных вейвлетов, является вейвлет Хаара. Вейвлет-функция имеет вид прямоугольных импульсов – меандр. Недостатком вейвлета Хаара является то, что его базисная функция хорошо локализована в пространстве, но плохо локализована в частотной области, поскольку меандр имеет широкий спектр частот.

Поскольку для полной реконструкции сигнала могут быть применены только ортогональные вейвлеты с компактным носителем, то преимуществом вейвлетов семейства Добеши (рис. 2) перед другими вейвлетами является то, что их использование не вносит дополнительной избыточности в исходные данные и сигнал может быть полностью восстановлен с использованием квадратурных зеркальных фильтров. Данный тип вейвлетов рассчитывается при помощи итерационных выражений, а форма зависит от степени полинома и количества рассчитанных коэффициентов.

Восстановление дискретного сигнала из вейвлет-образа эквивалентно пропусканию сигнала  $f(t)$  через узкополосный фильтр с полосой пропускания вблизи значения  $2^{-j_0}$ . На практике быстрое вейвлет-преобразование сигнала в реальном времени может быть выполнено с помощью вычислительной процедуры, известной как кратномасштабный анализ (КМА). В частном случае КМА базисом разложения принимаются вейвлеты Хаара, порожденные из материнского вейвлета

$$\begin{cases} 0 \leq t < 0,5, \\ 311 \end{cases}$$

$$\Psi(t) = \begin{cases} -1, & 0,5 \leq t < 1, \\ 0, & t \in [0,1]. \end{cases} \quad (6)$$

Вейвлет-анализ (декомпозиция) сигнала проводится поэтапно. Каждому этапу соответствует свое значение масштаба. Пусть анализ проводится для  $M$  отсчетов сигнала  $f(t)$  -  $f_0, f_1, \dots, f_{M-1}$ . На первом этапе декомпозиции параметр масштаба  $j = 1$ , и сигнал разделяется на две составляющие: аппроксимирующую и уточняющую. При этом количество коэффициентов получается в 2 раза меньше, чем в исходном сигнале  $M$ , поскольку сигнал пропущен через низкочастотный фильтр с относительной полосой пропускания 0,5.

На втором этапе декомпозиции выполняется аналогичное разложение при масштабе всех базисных функций  $j = 2$ . При этом количество коэффициентов становится еще в два раза меньше  $M$ . Декомпозиция может продолжаться до тех пор, пока аппроксимирующая составляющая не вырождается в одно постоянное значение, представляющее собой среднее значение исходного сигнала  $f(t)$  для  $M$  исходных отсчетов. Начав с этого среднего значения, можно восстановить исходный сигнал  $f(t)$ , используя коэффициенты вейвлет-образа сигнала. При необходимости коррекции сигнала все коэффициенты могут быть подвергнуты коррекции преобразования.

### Выводы

Предложенный подход к формированию вейвлет-образа сигнала позволяет сформулировать алгоритм вейвлет-регулятора: декомпозиция входного сигнала для фиксированного числа его последних отсчетов и получения текущего вейвлет-образа; изменение коэффициентов вейвлет-образа; реконструкция выходного сигнала по измененному вейвлет-образу. Количество этапов декомпозиции определяется по вырождению аппроксимирующей составляющей вейвлета. Изменение коэффициентов вейвлет-образа должно соответствовать алгоритму работы электропривода, а преобразователь напряжения будет воспроизводить коммутационную функцию типа Хаара.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. **Крюков, О.В.** Энергоэффективные электроприводы газоперекачивающих агрегатов газопроводов на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // автореферат дис. ... доктора технических наук / ВНИИЭМ. Нижний Новгород, 2015.
2. **Пужайло, А.Ф., Крюков О.В., Репин Д.Г.** Способ магистрального транспорта газа // Патент на изобретение №2502914 МПК F17D1/02. – Оpubл. 27.12.2013, БИ №36.
3. **Васенин, А.Б.** Энергоэффективные системы электроснабжения электроприводов нефтегазопроводов / А.Б. Васенин [и др.] // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 380-384.
4. **Khlynin, A.S., Kryukov O.V., Stepanov S.E.** Energy optimization of gas compressor unit select ric drives // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 137-139.
5. **Хлынин, А.С.** Комбинированные системы автоматического управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами / А.С. Хлынин, О.В. Крюков // В книге: Газотранспортные системы: настоящее и будущее Тезисы докладов VI МНТК GTS-

2015. 2015. С. 60.

6. **Крюков, О.В.** Методология оптимизации инвариантных систем электропривода турбокомпрессоров при случайных возмущениях // В сб.: Инженерные системы - 2013 Труды VI МНПК к 100-летию первого ректора РУДН проф. С.В. Румянцева. 2013. С. 255-261.

7. **Воронков, В.И.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» / В.И. Воронков [и др.] // Газовая промышленность. 2013. №7 (693). С. 74-78.

8. **Степанов, С.Е.** Компенсация стохастических возмущений в инвариантных системах газопровода "Турецкий поток" / С.Е. Степанов, О.В. Крюков // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докл. XXIII МНПК к 100-летию НГТУ. 2017. С. 281-287.

9. **Kryukov, O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 1. С. 56-62.

10. **Крюков, О.В.** Функциональные возможности энергетических установок для удаленных объектов / О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 2. С. 50-56.

11. **Крюков, О.В.** Опыт проектирования АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 1. С. 2-7.

12. **Киянов Н.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП / Н.В. Киянов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 29-34.

13. **Крюков, О.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа / О.В. Крюков [и др.] // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 428-432.

14. **Воронков, В.И.** Векторное управление возбуждением синхронных двигателей ГПА / В.И. Воронков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 204-208.

15. **Крюков, О.В.** Обеспечение электромагнитной совместимости на производственных объектах ТЭК // Энергетик. 2019. № 5. С. 12-15.

16. **Рубцова, И.Е.** Нейро-нечеткие модели управления синхронными машинами большой мощности / И.Е. Рубцова [и др.] // В сб.: Материалы 6-й МНПК «Управление и информационные технологии» УИТ-2010. СПб. 2010. С.160-162.

17. **Бычков, Е.В.** Компьютерное моделирование инвариантных САУ агрегатами газохранилищ / Е.В. Бычков, О.В. Крюков // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докладов XXIII МНПК, посвященной 100-летию НГТУ. 2017. С. 189-195.

18. **Крюков, О.В.** Адаптивные алгоритмы обеспечения устойчивости электрических машин мощностью 12,5 МВт // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докладов XXIII МНПК, посвященной 100-летию НГТУ. 2017. С. 215-221.

19. **Крюков, О.В.** Анализ моноблочных конструкций электрических машин для ГПА // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 3. № 4. С. 53-58.

20. **Крюков, О.В.** Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах электропривода // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.

**S.E. Stepanov, A.B. Vasenin, O.V. Kryukov**

**WAVELET TRANSFORM IN PROBLEMS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS  
OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES**

Gazprom design LLC, Nizhny Novgorod, Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

Energy-saving technologies of gas transportation along main gas pipelines with the implementation of algorithms based on frequency-controlled electric drives of technological installations are considered. The paper presents the features and algorithms of the wavelet transform in the mathematical description and synthesis of automated electric drives with frequency control. Examples of using wavelet transform algorithms for analysis and synthesis of high-speed electric drives in various industries are proposed.

**Keywords:** main gas pipeline, technological installation, frequency-controlled electric drive, mathematical description, wavelet transform.



С.Е. Степанов, В.Г. Титов, О.В. Крюков

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СПГ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

ООО «Газпром проектирование», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Представлены ретроспектива и актуальные вопросы реализации новейших технологий производства и транспорта сжиженного природного газа с учетом особенностей отечественной импортозамещающей техники. Показано, что любой технологический процесс подходит для специфичных свойств газа и определенных условий применения, а наиболее практичными и эффективными в использовании из рассмотренных процессов являются процесс химической очистки. Выявлены существенные различия в выборе и эксплуатации технологии сжижения между северными и южными заводами СПГ, климат и место расположения заводов – факторы, которые влияют на существующие и станут фактором влияния на будущие арктические проекты СПГ.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, обработка и подготовка газа, технология сжижения газа, арктический проект, технологическая установка, энергоэффективность, импортозамещение.

### Введение

Как известно, на сегодняшний день и среднесрочную перспективу природный газ остается жизненно важным компонентом в обеспечении глобальных энергетических потребностей ввиду своих преимуществ перед другими видами ископаемого топлива и в силу постоянно растущей потребности в нем.

В настоящее время бóльшая часть газа доставляется потребителям по магистральным трубопроводам в газообразной форме [1-4]. При этом технико-технологические решения по компрессорным станциям доведены до совершенства и отвечают лучшим мировым реализациям [5-8]. В то же время, в ряде случаев для труднодоступных удаленных месторождений транспорт сжиженного природного газа (СПГ) оказывается предпочтительнее, чем традиционный трубопроводный. Расчеты показали, что перевозка СПГ танкерами с учетом строительства мощностей сжижения и регазификации оказывается экономически рентабельной при расстояниях от 2500 км [9-12]. Хотя пример с Сахалинским заводом СПГ доказывает актуальность и исключений. Кроме того, индустрия СПГ является сегодня лидером в глобализации газовой индустрии и вышла далеко за рамки отдельных регионов, чего не было в начале 1990-х годов.

Пока спрос на СПГ растет, техническое обеспечение конкурентоспособных проектов СПГ в современной окружающей среде является непростой задачей. Важной особенностью заводов СПГ является то, что большинство затратных статей диктуется специфичными параметрами – качеством добываемого сырого газа, природными и климатическими условиями, топографией, объемами морских работ, доступностью инфраструктуры, экономическими и политическими условиями.

Особый интерес в этой связи представляют технологии подготовки газа и его сжижения, которые сегодня уже используются на современных заводах СПГ, которые можно классифицировать по разным признакам. Но особенно важно, что они располагаются в комфортных южных или более суровых северных широтах [13-17]. Исходя из этого, можно проанализировать различия этих двух групп, учесть особенности и недостатки каждой, применить опыт строительства и эксплуатации при реализации новых проектов СПГ в России, в частности в арктических условиях. Но даже с учетом имеющегося опыта перспективное развитие арктических территорий, где находится до 25% неразведанных запасов углеводородов, может быть обеспечено в дальнейшем инновациями.

### История производства СПГ

Эксперименты по сжижению природного газа начались в конце 19-го века. Но только в 1941 году был построен коммерческий завод СПГ в Кливленде (США, штат Огайо). То, что СПГ может транспортироваться судами на большие расстояния, было продемонстрировано на примере перевозки СПГ танкером «Methane Pioneer» в 1959 году.

Первым экспортным заводом СПГ с базисной нагрузкой стал проект «Camel» в Арзеве (Алжир), который был запущен в 1964 году. Первым заводом, где в 1969 году начали производить СПГ в северных условиях, стал завод в США на Аляске. Большая часть разработок по технологиям подготовки газа к сжижению и по его сжижению, выполнялась ранее и делается в настоящее время группами ученых, работающих в штатном составе коммерческих предприятий. Основные участники международного бизнеса СПГ и даты запуска заводов по годам представлены в таблице.

### Введение в эксплуатацию заводов СПГ в мире

№	Страна	Год	Компании	№	Страна	Год	Компании
1	Алжир, г. Арзу / г. Сиккада	1964/ 1972	“Sonatrach” / “Saipem-Chiyoda”	17	Египет, SEGAS Damietta	2004	“Union Fenosa”, “Eni”, “EGAS”, “EGPC”
2	США, г.Кенай	1969	“ConocoPhillips, Marathon”	18	Египет, Idku (EgyptianLNG)	2005	“BG”, “Petronas”, “EGAS/EGPC”
3	Ливия, Марса эль Брега	1971	“Exxon”, “SirteOil”	19	Австралия, Дарвин	2006	“Kenai LNG”, “Conoco Phillips”, “Eni”, “TEPCO”
4	Бруней, Лумут	1972	“Shell”	20	Экв.Гвиния, о.Биоко	2007	“Marathon”, “GEPe- trol”
5	ОАЭ	1977	“BP”, “Total”, “ADNOC”	21	Норвегия, о. Мелкойя	2007	“Statoil”, “Petro”, “Total”
6	Индонезия, Бонтаанг, о. Борнео	1977	“Pertamina”, “Total”	22	Индонезия, Ириан-Джая, Тангу	2009	“BP”, “CNOOC”, “INPEX”, “LNG Japan”, “JX Nippon Oil &Energy”
7	Индонезия, Сев.Суматра	1978	“Pertamina”, “Mo- bilLNGIndonesia”	23	Россия, Сахалин	2009	“Gasprom”, “Shell”
8	Малайзия, Сату	1983	“Petronas”, “Shell”	24	Катаргаз 2	2009	“QatarPetroleum”, “ExxonMobil”

Окончание табл.

9	Австралия, Сев.Зап. Шельф	1989	“Shell”, “BHP”, “BP”, “Mitsubishi” / “Mitsui”	25	Йемен, Балхаф	2009	“Total”, “Hunt Oil”, “Yemen Gas”, “Ko- gas”, “Hyundai”, “GASSP”
1 0	Малай- зия, Дуа	1995	“Petronas”, “Shell”	26	Катар, Расгаз2	2009	“QatarPetroleum”, “ExxonMobil”
1 1	Катаргаз1	1997	“QatarPetroleum”, “ExxonMobil”	27	Катар, Расгаз3	2009	“QatarPetroleum”, “ExxonMobil”
1 2	Тринидади Тобаго	1999	“BP”, “BG”, “Repsol”, “Tra- ctebel”	28	Норвегия, Risavi- ka, ScangassLNG	2009	“Scangass (Lyse)”
1 3	Нигерия	1999	“NNPC”, “Shell”, “Total”, “Eni”	29	Пепу	2010	“Hunt Oil”, “Rep- sol”, “SK Corp”, “Marubeni”
1 4	Ка- тар, Расгаз	1999	“QatarPetroleum”, “ExxonMobil”	30	Катаргаз3,4	2010	“ConocoPhil- lips”, “Qatar Petroleum”, “Shell”
1 5	Оман / Оман Кал- хат	2000 /06	“PDO”, “Shell”, “Fenosa”, “Itochu”, “Osaka gas”, To- tal”, “Korea LNG”, “Partex”, “Itochu”	31	Австралия, Pluto	2012	“Woodside”
1 6	Малайзия, Тига	2003	“Petronas”, “Shell”, “JX Nippon”, “Diamond Gas”	32	Ангола, Soya	2013	“Chevron”, “Sonan- gol”, “BP”, “Eni”, “Total”

На начало 2014 года действовало 32 завода СПГ в 19 странах мира; 11 производств СПГ в 5 странах мира находятся в стадии строительства; в 8 странах проектируется строительство еще 16 заводов СПГ. В России, кроме завода СПГ на о. Сахалин, существует проект строительства завода «Балтийский СПГ» в Ленинградской области, запланирован завод СПГ на Ямале с привлечением иностранных партнёров. Есть предложения по строительству мощностей СПГ для разработки Штокмановского, Южно-Тамбейского месторождений и для проектов «Сахалин-1», «Сахалин-3».

В проектах, связанных со сжиженным газом, был задействован целый ряд российских организаций: институт ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московский газоперерабатывающий завод, Сосногорский и Оренбургский ГПЗ, ОАО «Машиностроительный завод «Арсенал»», ОАО «НПО Гелиймаш», ОАО «Криогенмаш», ОАО «Уралкриомаш» и другие.

Вся система СПГ включает в себя элементы добычи, обработки, перекачивания, сжижения, хранения, погрузки, перевозки и разгрузки, регазификации. Проекты СПГ требуют достаточного количества времени, денег и усилий на стадии дизайна, при экономической оценке, строительстве и коммерческом внедрении. Обычно проходит более 10 лет со стадии дизайна до реализации. Поэтому общепринятой является практика заключать 20-летние контракты. Запасов газа на месторождении должно быть достаточно на 20-25 лет для того, чтобы оно могло рассматриваться в качестве источника легких углеводородов для СПГ. Определяющими факторами выступают: природа газа, доступное давление в пласте, связанность

как свободного, так и растворенного газа с сырой нефтью, транспортные факторы, включая расстояние до морского порта.

За прошедшие годы индустрия СПГ сделала большой скачок. Если совокупность всех инноваций за это время условно обозначить, как 100%, то 15% - это улучшение процесса, 15% - улучшение оборудования, а 70% приходится на теплоэнергетическую интеграцию. При этом капитальные затраты снизились на 30%, также произошло снижение расходов на транспорт СПГ. Есть явный тренд в сторону увеличения объемов технологических линий. С 1964 года мощность отдельно взятой технологической линии увеличилась в 20 раз. При этом по нынешнему состоянию экономики и технологий газовые ресурсы, которые оцениваются как труднодоступные, оцениваются в 127,5 трлн. м<sup>3</sup>. Проблема заключается в транспортировке сжатого топлива на большие дистанции и через значительные водные пространства. При неравномерном распределении ресурсов природного газа в мире задача реализации этих ресурсов по трубопроводам может оказаться невыполнимой или экономически непривлекательной. Для рынков, удаленных более чем на 1500 миль (>2500 км) СПГ оказался экономичным вариантом. Во многом по этой причине с 2005 по 2018 год объемы глобальных поставок СПГ удвоились.

В стоимостной цепочке СПГ сжижение природного газа является частью, требующей наибольших вложений и эксплуатационных расходов. Многие процессы сжижения отличаются только холодильными циклами. Процессы с одним смешанным хладагентом подходят для производственных линий объемом 1-3 млн тонн в год. В основе технологических процессов с объемами от 3 до 10 млн тонн в год лежит использование двух последовательных холодильных циклов, минимизирующих перепад давления в контуре природного газа. Применение третьего холодильного цикла позволило обойти такие «узкие» места в технологическом процессе, как диаметр криогенного теплообменника и объем холодильного компрессора для цикла с пропаном. Исследования различных процессов сжижения показывают, что каждый из них ненамного эффективнее остальных. Скорее, каждая технология имеет конкурентные преимущества при определенных условиях.

Однако уже сегодня, как и в течение последних лет, индустрия СПГ заслуженно занимает свое важное место на энергетическом рынке и, скорее всего, сохранит это положение в обозримом будущем.

### **Подготовка газа к сжижению**

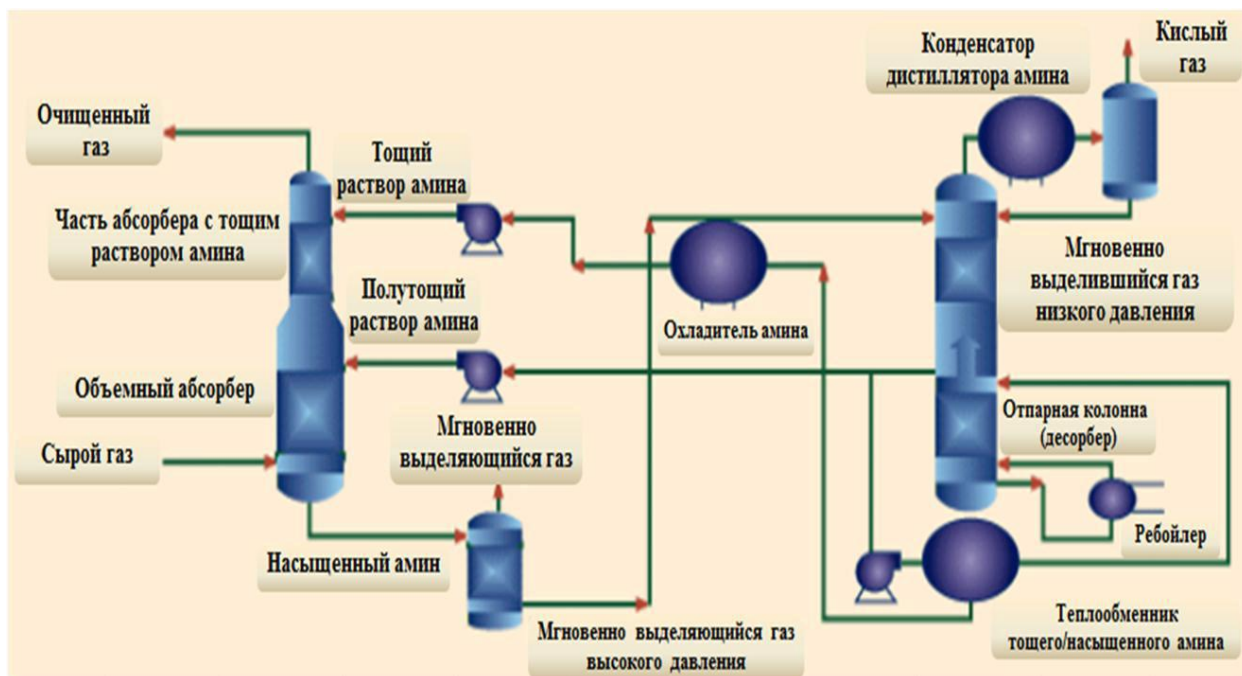
Процесс обработки газа в высокой степени зависит от свойств сырого газа, а также от попадания тяжелых углеводородов через сырой газ. Для того чтобы сделать сжижение газа возможным, газ сначала подвергается обработке. При его входе на завод обычно происходит первоначальное разделение фракций и отделяется конденсат, который стабилизируется.

Поскольку большая часть примесей (вода, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Hg, N<sub>2</sub>, He, карбонилсульфид COS, меркаптаны RSH и т.д.) замерзает при температурах СПГ или негативно влияет на качество продукта, соответствующее требуемой товарной спецификации, то и эти компоненты отделяются. Далее отделяются более тяжелые углеводороды для предотвращения их замерзания в процессе сжижения.

Проблему извлечения сероводорода приходится решать на каждом заводе, кроме завода СПГ в Омани. Ртуть присутствует в газе Сахалина, Норвегии, Ирана, Катар и Омани. Наличие гелия подтверждается только на проекте Катаргаз-2. Присутствие RSH, COS подтверждено в газе проекта СПГ Ирана. Состав и объемы газа влияют не только на количество производимого СПГ, но и на объемы и разнообразие побочных продуктов. Становится ясно, что

в первую очередь состав газа влияет на выбор и применение оборудования при обработке газа, а значит, и на весь процесс подготовки газа.

Для удаления кислых газов на заводах СПГ используется процесс «Hi-Pure». Это комбинация процесса с растворителем на основе  $K_2CO_3$  для удаления основного объема  $CO_2$  и процесса с аминовым растворителем на основе ДЭА (диэтанолamina) для удаления остающейся части  $CO_2$  и  $H_2S$  (рис. 1).



**Рисунок 1. Стандартная схема аминовой установки**

На заводах СПГ есть целый ряд преимуществ перед физическими процессами: лучшая абсорбционная и избирательная способность, более низкое давление паров, более оптимальные параметры эксплуатационной температуры, потребления энергии и т.д.

### Сжижение газа

По большинству оценок и наблюдений, на модуль сжижения газа приходится 45% капитальных затрат всего завода СПГ, что составляет 25%-35% всех затрат проекта и до 50% последующих эксплуатационных затрат. Технология сжижения основана на холодильном цикле, когда хладагент посредством последовательного расширения и сжатия переносит тепло от низкой температуры к высокой температуре. Объем производства технологической ветки в основном определяется процессом сжижения, используемым хладагентом, наибольшими доступными размерами комбинации компрессора и привода, которые осуществляют цикл, и теплообменников, которые охлаждают природный газ.

Основные принципы охлаждения и сжижения газа предполагают подгонку кривых охлаждения-нагрева газа и хладагента настолько близкую, насколько это возможно. Реализация этого принципа обуславливает более эффективный термодинамический процесс, требующий меньших затрат на единицу производимого СПГ, и это применимо ко всем процессам сжижения. Основные части установки сжижения газа – это компрессоры, обеспечивающие циркуляцию хладагентов, приводы компрессора и теплообменники, используемые для охлажде-

ния и сжижения газа и обмена теплом между хладагентами. Многие процессы сжижения отличаются только холодильными циклами.

Сравнительные характеристики процессов сжижения по всем анализируемым заводам показали, что схема технологии сжижения «С3/MR» (рис. 2), которая используется на заводах СПГ Омана и ОАЭ, является на сегодняшний день также и самой распространенной в мире. Рассмотрение и сопоставление всех ныне действующих северных заводов СПГ и заводов СПГ Ближнего Востока позволяет сделать следующий вывод: между ними существуют различия в дизайне, выборе технологий сжижения газа и эксплуатации. Это значит, что климат и месторасположение будут влиять на существующие и будущие арктические проекты СПГ.

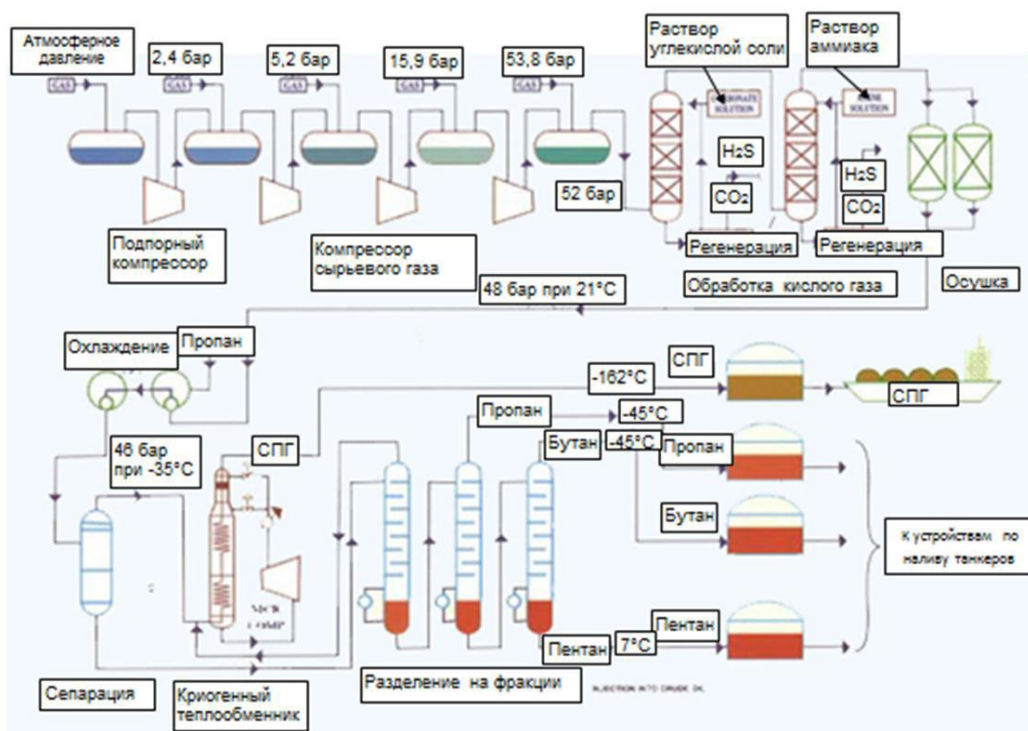


Рисунок 2. Технология сжижения «С3/MR» и подготовка газа на заводе СПГ в ОАЭ

Объемы производства и выбор технологии не в последнюю очередь определяется такими факторами, как природные условия. На примере норвежского и сахалинского заводов СПГ показано, что более продуктивно производить СПГ на северных территориях. Проведенный анализ не выявил причин, которые могли бы помешать использованию рассматриваемых технологий сжижения газа на заводах в климатических условиях юга и севера, за исключением новой технологии «DMR», которая была целенаправленно разработана для условий Сахалина.

Тем не менее, выбор той или иной технологии для определенного региона влияет на эффективность и энергопотребление при производстве сжиженного газа, поскольку эти параметры процесса сжижения определяются тем, работает ли установка на холоде. Важно также отметить, что все северные проекты требовали каждый раз нового технологического решения для процесса сжижения, тогда как на Ближнем Востоке распространено применение типовых технологий.

## Выводы

1. Набор установок, их технологические параметры и ассортимент продуктов СПГ зависят от свойств и объемов используемого газа. Анализ не выявил зависимости в последовательности расположения технологических установок, а также выбора технологий.

2. Любой технологический процесс подходит для свойств газа и условий применения, а наиболее эффективными являются процесс очистки МДЭА и “Sulfinol-D”.

3. Выявлены существенные различия в выборе и эксплуатации технологии сжижения между северными и южными заводами СПГ. Климат и место расположения заводов – факторы, которые влияют на существующие и станут фактором влияния на будущие арктические проекты СПГ РФ.

## Библиографический список

1. **Крюков, О.В.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 1. С. 56-62.

2. **Киянов, Н.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП / Н.В. Киянов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С. 29-34.

3. **Крюков, О.В.** Об отечественных технологиях производства сжиженного природного газа // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2019. № 3 (37). С. 19-28.

4. **Крюков, О.В.** Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа / О.В. Крюков [и др.] // В сборнике: Труды IX международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 428-432.

5. **Крюков, О.В.** Опыт проектирования АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 1. С. 2-7.

6. **Васенин, А.Б.** Энергоэффективные системы электроснабжения электроприводов нефтегазопроводов / А.Б. Васенин [и др.] // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь. 2016. С. 380-384.

7. **Иванов, А.Н.** Совершенствование буровых растворов, применяемых на месторождениях СП "Вьетсовпетро" / А.Н. Иванов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2019. № 12. С. 107-111.

8. **Захаров, П.А.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования ЭГПА / П.А. Захаров [и др.] // Контроль. Диагностика. 2008. № 11. С. 43-49.

9. **Бучнев, О.А., Саркисян В.А.** Перспективы сжиженного природного газа на энергетических рынках // Газовая промышленность, 2005, №2. С. 28-32.

10. **Дорожкин, В.Ю.** Подготовка газа к сжижению в зависимости от его свойств / В.Ю. Дорожкин, Р.К. Трегулов, Б.Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2013, №1. С. 44-48.

11. **Крюков, О.В.** Функциональные возможности энергетических установок при питании удаленных объектов / О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 2. С. 50-56.

12. **Воронков, В.И.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» / В.И. Воронков [и др.] // Газовая промышленность. 2013. №7 (693). С. 74-78.

13. **Изотов, Н.В., Никифоров В.Н.** Исследование технологий сжижения природного газа /



Н.В. Изотов, В.Н. Никифоров // Газовая промышленность, 2005, №1. С. 39-43.

14. **Савин, Е.М., Павлов М.Л., Крюков О.В.** Способ получения цеолита типа X // Авторское свидетельство SU 1739614 A1, 27.10.1996. Заявка № 4804940/26 от 26.03.1990.

15. **Гайрбеков, Т.М., Хаджиев С.Н., Суманов В.Т.** и др. Способ получения алкилбензина // Авторское свидетельство SU 1696415 A1, 07.12.1991. Заявка № 4750366 от 05.09.1989.

16. **Хаджиев, С.Н., Гайрбекова С.М., Крюков О.В.** Способ получения dealюминированного цеолита Y, используемого в качестве компонента катализатора // Авторское свидетельство SU 1682307 A1, 07.10.1991. Заявка № 4678058 от 11.04.1989.

17. **Sivtsev, Yu.S., Savin E.M., Videneev G.A., Parfyumova O.A., Kryukov O.V.** Suspension separation and washing of zeolite NAX under vacuum on synthetic filter cloth // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1991. T. 27. № 1. С. 44-47.

**S. E. Stepanov, V. G. Titov, O. V. Kryukov**

### **INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR LNG PRODUCTION AND HYDROCARBON PROCESSING**

ООО "Gazprom engineering", Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

Retrospective and topical issues of implementation of the latest technologies for the production and transport of liquefied natural gas, taking into account the peculiarities of domestic import-substituting equipment, are presented. It is shown that any technological process is suitable for specific properties of the gas and certain application conditions, and the most practical and effective in use of the considered processes are the chemical cleaning process. Significant differences in the choice and operation of liquefaction technology between Northern and southern LNG plants have been identified, and the climate and location of the plants are factors that affect existing and will be a factor in future Arctic LNG projects.

**Keywords:** liquefied natural gas, gas processing and preparation, gas liquefaction technology, Arctic project, technological installation, energy efficiency, import substitution.



Р.Б. Туганов, Д.А. Благодаров, О.В. Крюков

## ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

МБОУ школа № 122, г. Н. Новгород, НИУ «МЭИ», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Рассмотрены перспективы развития современных систем автоматизации в наиболее приоритетных отраслях промышленности, и, в частности, в машиностроении. Рост потребности в новых интеллектуальных системах обусловлен необходимостью модернизации и создания станочного и технологического оборудования с улучшенными функциональными свойствами. Применение интеллектуальных силовых модулей и развитых микропроцессорных средств с алгоритмическим обеспечением на основе новейших IT-продуктов позволяет идентифицировать параметры системы, осуществлять самонастройку регуляторов, адаптацию к изменению параметров, развитую диагностику. Появляются технические возможности реализовать новые способы управления и прогнозирования на базе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов. Кроме того, использование информационного обмена и сетевых технологий позволяет обеспечить связь между отдельными модулями энергетической части и с системами более высокого уровня.

**Ключевые слова:** системы автоматизации, технологические установки, электропривод, интеллектуальные датчики, автоматическое управление, прогнозирование состояния.

## Введение

Потребительские свойства локальных систем автоматизации, основу которых составляют преимущественно электроприводы, определяются их характеристиками и набором функциональных возможностей. Структурные и алгоритмические принципы формирования электроприводных станков как объектов управления и регулирования многообразны и определяются конкретными прикладными задачами [1,2]. Современная элементная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники позволяет комплексно и оптимально реализовать возрастающие требования технологических процессов и исполнительных механизмов в передовых отраслях промышленности [3,4].

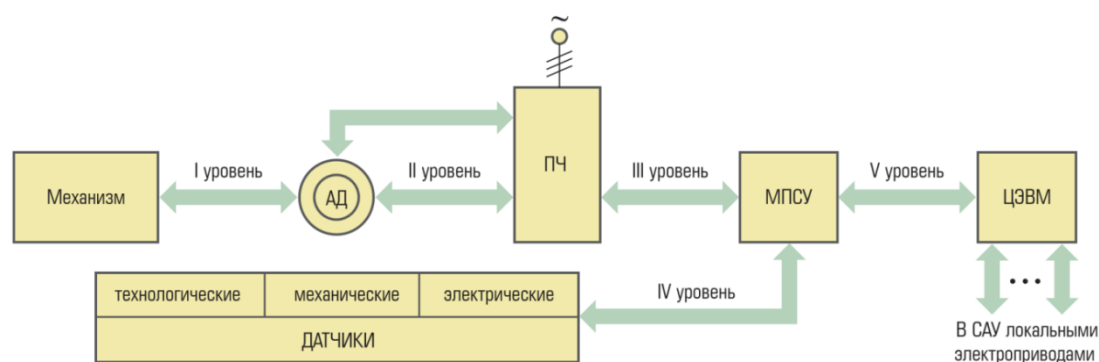


Рисунок 1. Структура интеллектуального электропривода

Силовые средства автоматизации являются сложной функционально взаимозависимой по элементам системой, которая формализуется совокупностью матриц дифференциальных, разностных и алгебраических уравнений. Отличительной особенностью структурообразования их является наличие следующих элементов (рис. 1) [5]:

- простого и эффективного асинхронного двигателя (АД), оптимизированного по конструктивным и энергетическим показателям, по динамике и надежности;
- преобразователей частоты на полностью управляемых приборах (ПЧ), определяющих регулировочные характеристики, а также энергетические показатели привода;
- датчиков электрических, механических и технологических параметров регулирования, обеспечивающих требуемую точность стабилизации координат в замкнутой системе;
- микропроцессорной системы управления (МПСУ) с функциями непосредственного регулирования выходных координат, формирования векторных законов ШИМ-управления, диагностики и защиты, взаимодействия с АСУТП верхнего уровня иерархии.

Каждый элемент данной системы в связи с историческими и организационными особенностями применения прошел значительный путь индивидуального совершенствования, теоретически обоснован и оптимизирован по наиболее важным для него критериям. В результате при синтезе всей мехатронной системы форма и способы представления внешней информации для взаимодействия различных элементов привода значительно отличаются, и наилучшая интерфейсная адаптация их всегда была важнейшим направлением развития и оптимизации электроприводов [6].

Совершенствование аппаратных средств силовой электроники и микропроцессорной техники стимулирует развитие функциональных и сервисных возможностей электроприводов. Все элементы и интерфейсы автоматизированного электропривода в последние годы получили значительное развитие. Среди основных направлений разработок для силового (энергетического) канала электропривода следует выделить следующие.

1. Создание мехатронных модулей, в которых двигатель интегрирован в конструкцию механизма (электрошпиндель, мотор-колесо, поворотный стол), а также модулей движения различных типов (линейные, поворотные, многоосевые) и изделий типа MotorControl. При этом обеспечивается прямое управление моментом механизма без промежуточных устройств и реализация новых типов электроприводов, например, вентильно-индукторного двигателя.

2. Развитие интегрированных электромеханических устройств, в которых функционально и конструктивно объединены электродвигатели с электрическими преобразователями. Расширение парка силовых «интеллектуальных» модулей ПЧ позволяет адекватно решать проблемы монтажа, паразитных индуктивностей и защиты. Сейчас применяются: тиристоры (SCR) в ПЧ до 20 МВт, напряжением до 20 кВ; запираемые тиристоры (GTO, IGCT, SGCT) в высоковольтных ПЧ; биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) в ПЧ до 25 МВт и напряжением до 20 кВ; силовые полевые транзисторы (MOSFET) в ПЧ до 50 кВт. В диапазоне мощностей от единиц до сотен кВт наиболее широкое применение находят двухзвенные ПЧ с автономными инверторами тока и напряжения, которые обеспечивают практически синусоидальный ток в обмотках статора двигателя и широкий диапазон частот.

Однако наиболее значимые достижения по интеллектуализации систем автоматизации получены в области аппаратных средств и алгоритмического обеспечения микропроцессорных систем управления. Основными направлениями развития специализированных микропроцессорных средств являются:

- рост производительности встроенных микроконтроллеров за счет совершенствования структуры центрального процессора и увеличения тактовой частоты; увеличение объема памяти программ и данных; модификация системы команд под требования потребителя;

- интеграция на кристалле микроконтроллера большого числа периферийных устройств, обеспечивающих интерфейс с силовой частью объекта управления и датчиками; реализация архитектуры мультипроцессорных распределенных систем управления;
- совершенствование характеристик контроллеров и нейрокомпьютеров [7-9].

Непрерывное совершенствование микропроцессорных средств обеспечивает возможность построения электроприводов с функциями прямого векторного управления координатами с решением большинства задач управления программным способом и интеграцию в АСУТП. Интеллектуальный электропривод наряду с основными локальными задачами (регулирование координат и воспроизведение требуемых законов движения) обеспечивает обмен с оператором и верхним уровнем управления (АСУТП), контроль и диагностику как собственно электропривода, так и приводимого им в действие механизма.

На базе совершенствования и повышения эффективности электроприводов расширяются и технологии их применения в следующих направлениях:

- методов и алгоритмов цифрового управления координатами э, обеспечивающих улучшение динамических и эксплуатационных свойств с прогнозированием координат;
- адаптивного управления, в том числе и с применением нечетких (fuzzy-) регуляторов;
- самообучающихся систем, в том числе и с использованием искусственных нейронных сетей в качестве обучаемых контроллеров.

Универсальные и специализированные микроконтроллеры применяются практически во всех разработках электроприводов, в том числе и в системах общепромышленного применения с интеграцией в АСУТП. При этом многие проблемы синтеза систем управления в настоящее время рассматриваются иначе, разрабатываются новые алгоритмы, позволяющие реализовать законы регулирования практически любой сложности, обеспечить новые потребительские свойства, такие как адаптацию под новые или изменяющиеся условия применения, самонастройку и оптимизацию регуляторов, контроль, диагностику и удобное для пользователя дистанционное или местное управление. Большое внимание уделяется точности математического описания процессов в электроприводе, в том числе с учетом насыщения магнитной цепи двигателя (особенно двигателей с изменяемым магнитным сопротивлением).

Значительное развитие получили принципы построения систем управления с наблюдателями (идентификаторами) состояния, представляющими собой динамическую модель объекта управления, корректируемую по отклонениям измеряемых переменных. Использование наблюдателей позволяет существенно улучшить качество управления привода, реализовать «бездатчиковое» регулирование в сложных динамических системах за счет автоматической идентификации параметров электропривода в процессе его функционирования.

Для преодоления (компенсации, парирования, подавления) неопределенностей различного вида предлагаются следующие пути построения интеллектуальных систем:

- развитие традиционных частотных методов при построении робастного управления, которое разработано для линейных задач с распространением на “гладкий” класс нелинейных объектов со стохастической динамикой;
- применение адаптивных систем управления с параметрическими законами, которые отличаются «негрубой» сходимостью алгоритмов;
- применение методов искусственного интеллекта на основе экспертных систем.

Нейросетевые и нечеткие структуры обладают аппроксимирующим свойством и даже структурным подобием. Поэтому применение систем с нечеткими регуляторами позволяет получить стабильность динамических характеристик в условиях ограниченной неопределенности и действующих возмущений, значительное упрощение структур регуляторов, комбинирование нечетких алгоритмов с традиционными для усиления эффективности последних.

Для управления процессами, модель которых не может быть однозначно получена, используются следующие способы реализации интеллектуальных электроприводов:

- векторный принцип управления с глубокой обратной связью, обеспечивая инвариантное движение системы при всех возможных изменениях случайных и неконтролируемых (стохастических) возмущений;
- введение в контур регулирования или диагностирования нечеткого (fuzzy-) регулятора с генетическими алгоритмами и нейронных сетей, используемых при функционировании сложных, плохо организованных объектов и многопараметрических систем;
- адаптивное управление с использованием эталонной модели для структурной и параметрической оптимизации процессов с переменными параметрами и автоподстройки САР.

Данные способы относятся к интеллектуальным принципам управления, позволяющим реализовать ИТ- алгоритмы управления при неполных сведениях об объекте и при нестабильности параметров. Рассмотрим примеры реализации данных алгоритмов.

**Инвариантные алгоритмы.** В практике станочного оборудования большинство механизмов и процессов функционируют в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры не остаются постоянными, а значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера (особенностями кинематики системы, колебаниями нагрузки и переходными режимами), так и иными внешними воздействиями (природными, метеорологическими, рельефными), которые носят преимущественно случайный характер.

Наиболее характерными примерами производственных механизмов со случайными возмущениями являются локальные системы, входящие в комплекс АСУТП [20-12]:

- насосы и вентиляторы градирен, входящих в водооборотные системы охлаждения;
- аппараты воздушного охлаждения газа после его компримирования;
- системы воздушного отопления промышленных и административных зданий;
- воздуходувки котлоагрегатов, оснащенных топкой “кипящего слоя”;
- теплообменники с паронагревателями, вентиляторы и транспортеры барабанных и трубных сушилок с поддержанием параметров продуктов с точностью  $\pm 1\%$  и т.п.

Так как скорость вращения вентиляторов  $\omega$  задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения стабильных параметров необходимо:

- получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков;
- вычислить оптимальную скорость по аналитическим регрессионным алгоритмам;
- скорректировать ее с учетом стабилизирующей обратной связи по координате (рис. 2).

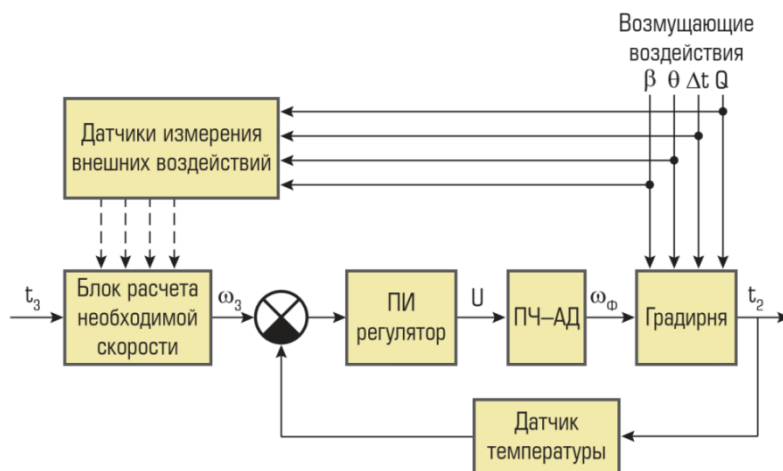


Рисунок 2. Инвариантная система с регрессионными алгоритмами

Для рассмотренной структуры инвариантного управления электроприводом вентилятора градирни разработано прикладное ПО GRADIRNY, которое является частью программно-аппаратного комплекса АСУТП водооборотными системами. Регрессионные алгоритмы реализованы на объектно-ориентированном языке Visual Basic с использованием программной среды разработки ADAMView. ПО функционирует в ОС Windows NT и предназначено для мониторинга и управления с рабочего места оператора на ПК аппаратной частью комплекса автоматизации водооборота предприятий.

### Лингвистические алгоритмы прогнозирования отказов

Несмотря на достаточно высокие показатели общей надежности современных электроприводов, к ним предъявляются требования по обеспечению необходимых для ТП и ответственных производств уровней ремонтпригодности и наработки на отказ [13-17]. Устройства диагностирования и прогнозирования верхнего уровня в этом случае могут быть универсальными, а устройства нижнего уровня сравнительно просты и индивидуальны для каждого типа привода. В устройствах нижнего уровня целесообразно объединить следующие функции: первичный датчик измеряемого параметра (ПД) и схему анализа (СА), которая дает на выходе информацию о том, вышел или нет данный параметр за установленные границы (рис. 3).

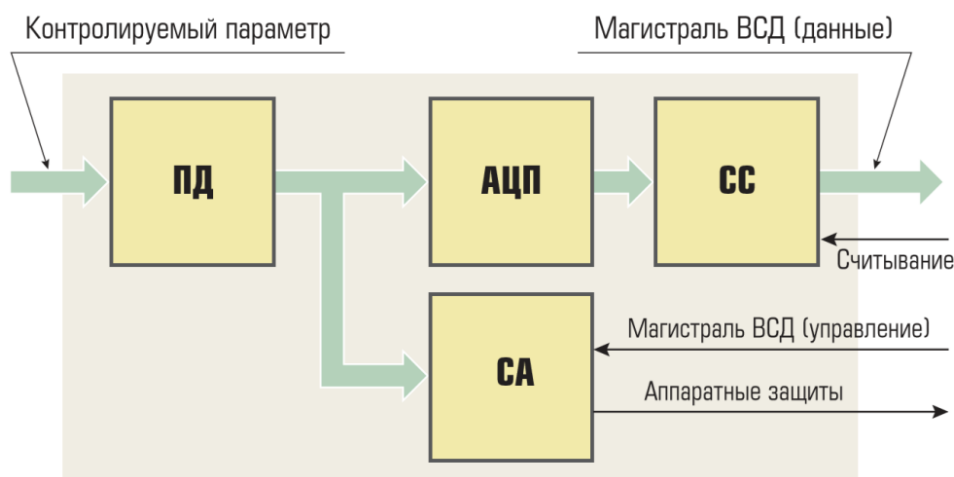


Рисунок 3. Интеллектуальный датчик диагностирования и прогнозирования

На выходе датчиков присутствует информация о контролируемом параметре с разной степенью точности (например – 001 – недопустимо низкое значение, 010 – слишком низкое, 100 – норма, 110 – слишком высокое, 111 - недопустимо высокое). Интеллектуальные датчики обладают достаточно высокой надежностью и могут быть унифицированы. Сфера применения таких датчиков не ограничивается оперативной диагностикой. С их помощью можно прогнозировать аварийные режимы и обнаруживать дефектные узлы, а также обеспечивать аппаратные средства защиты электропривода. Однако более практичной функцией является прогнозирование состояния для недопущения аварийных режимов в АСУТП.

В основе построения прогнозирующей системы лежит принцип экспертной системы. Генетический алгоритм реализует одновременно две системы: компенсирующую САР и экс-

пертную. Работа первой заключается в прогнозировании аварийных режимов и недопущении их путем превентивного изменения соответствующих параметров. Работа экспертной системы заключается в прогнозировании на основе статистических данных с сигнализацией, оповещением и советом оператору о том, как надо действовать в текущей ситуации.

Данный подход синтеза средств диагностирования и прогнозирования позволяет комбинировать диагностику узлов системы и интегрировать в одной системе свойства регулирования, диагностирования, прогнозирования и экспертной системы. Для составления алгоритма прогнозирования используется предварительная фаззификация текущих входных (измеряемых) переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения определяется прогнозируемое значение.

### Алгоритмы автоматической наладки

В процессе ввода в эксплуатацию и функционирования систем автоматизации необходимо осуществить самонастройку многочисленных контуров регулирования. Это связано с разбросом параметров элементов, отличием их от каталожных, наличием внешних и внутренних эффектов, неучтенных в расчетах. Настройка каждого цифрового регулятора на действующей установке требует больших материальных и временных затрат. Для приводов, обслуживающих энергоемкие объекты, это диктуется требованиями энергосбережения и надежной работы в продолжительном режиме.

Поэтому в сервисные возможности интеллектуальных систем входит режим автоматизированной настройки параметров регулирования с помощью ПО, позволяющего значительно упростить процедуру и повысить качество настройки и адаптации к изменяющимся параметрам. Настройка САР является итерационной процедурой, для реализации которой используются способы с использованием информации предыдущих шагов и "цикл в цикле".

### Выводы

Анализируя перспективы развития и использования современных систем автоматизации для задач машиностроения в России, можно прогнозировать рост потребности в них в связи с модернизацией и созданием нового технологического оборудования. Применение интеллектуальных модулей и микропроцессорных средств с ИТ-алгоритмами позволяет:

- идентифицировать параметры объектов, осуществлять самонастройку регуляторов, адаптацию к изменению параметров, мониторинг, что делает систему *контролируемой*;
- реализовать новые способы управления и прогнозирования на базе нейронных сетей и генетических алгоритмов, что делает систему *обучаемой*;
- использовать информационный обмен и сетевые технологии, обеспечивая связь между модулями и с системами управления высокого уровня, что делает ее *интеллектуальной*.

### Библиографический список

1. **Крюков, О.В.** Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Автореферат дисс. д.т.н. / ВНИИЭМ. 2015.

2. **Захаров, П.А.** Системы автоматизации технологических установок для эффективного транспорта / П.А. Захаров [и др.] // Автоматизация в промышленности. 2008. №6. С.6-10.
3. **Хлынин, А.С.** Реализация факторов энергоэффективности электроприводных ГПА в проектах / А.С. Хлынин, О.В. Крюков // Электротехника: СЭНЖ. 2014. Т. 1. № 2. С. 32-37.
4. **Крюков, О.В.** Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.3. №4. С. 53-58.
5. **Крюков, О.В.** Интеллектуальные электроприводы с IT-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. 2008. № 6. С. 36-39.
6. **Крюков, О.В.** Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. 2010. № 10. С. 50-53.
7. **Рубцова, И.Е.** Нейро-нечеткие модели мониторинга синхронных машин большой мощности / И.Е. Рубцова [и др.] // В сборнике: Материалы 6-й МНТК «Управление и информационные технологии» УИТ-2010. СПб. 2010. С.160-162.
8. **Kryukov, O.V., Serebryakov A.V.** Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 1. С. 66-74.
9. **Мещеряков, В.Н.** Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах автоматизированного электропривода / В.Н. Мещеряков [и др.] // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Липецк. 2017. С. 153-158.
10. **Крюков, О.В.** Методология оптимизации инвариантных систем электропривода турбокомпрессоров при случайных возмущениях // В сб.: Инженерные системы - 2013 Труды VI МНПК, посвященной 100-летию ректора РУДН проф. С.В. Румянцева. 2013. С. 255-261.
11. **Крюков, О.В.** Функциональные возможности энергетических установок удаленных объектов / О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №2. С.50-56.
12. **Крюков, О.В.** Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. 2008. № 9. С. 45-51.
13. **Крюков, О.В., Серебряков А.В.** Методы синтеза встроенных систем прогнозирования состояния высоковольтных двигателей / О.В. Крюков, А.В. Серебряков // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. XVIII Бенардосовские чтения. 2015. С. 69-73.
14. **Kryukov, O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 1. С. 56-62.
15. **Крюков, О.В.** Подход к прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 9. С. 30-34.
16. **Захаров, П.А.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования ЭГПА / П.А. Захаров [и др.] // Контроль. Диагностика. 2008. № 11. С. 43-49.
17. **Крюков, О.В.** Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.

**R. B. Tuganov, D. A. Blagodarov, O. V. Kryukov**

## **PROSPECTS FOR AUTOMATION OF ENGINEERING FACILITIES**

MBOU school No. 122, Nizhny Novgorod, NRU "MEI", LLC "Gazprom VNIIGAZ", Moscow

Prospects for the development of modern automation systems in the most priority industries, and, in particular, in mechanical engineering, are considered. The growing demand for new intelligent systems is due to the need to modernize and create machine and process equipment with improved functional properties. The use of intelligent power modules and advanced microprocessor tools with algorithmic support based on the latest IT products allows you to identify system parameters, perform self-adjustment of regulators, adapt to changes in parameters, and develop diagnostics. There are technical opportunities to implement new methods of management and forecasting based on artificial neural networks and genetic algorithms. In addition, the use of information exchange and network technologies allows for communication between individual modules of the energy part and with higher-level systems.

**Keywords:** automation systems, technological installations, electric drive, intelligent sensors, automatic control, state prediction.



А.С. Хлынин, С.Е. Степанов, О.В. Крюков

## НЕЙРОННЫЕ СЕТИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГПА

АО «Гипрогазцентр», ООО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Рассмотрены новые методы оперативной диагностики и прогнозирования ресурса основных технологических установок компрессорных станций магистральных газопроводов. Приведены методологии и примеры прогнозирования технического состояния статорных обмоток методами искусственных нейронных сетей и методом рядов. Получены тесты селекционированных сетей, нечеткая модель Бокса-Дженкинса, модели метода анализа динамики спектральных составляющих с прогнозированием величин тока и температур статора. Сопоставительные результаты анализа ожидаемых состояний электрических машин большой мощности, исходя из учета различных эксплуатационных факторов работы электроприводов, позволили выработать рекомендации по применению новых прогностических методов.

**Ключевые слова:** технологическая установка, электродвигатель мегаваттного класса, прогноз технического состояния, искусственные нейронные сети, тесты селекционированных сетей, метод анализа динамики спектральных составляющих.

### Введение

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов мониторинга и прогнозирования технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА), как и других электромеханических систем с мегаваттными машинами является хорошо апробированный в некоторых технических системах математический аппарат автоматизированной настройки параметров диагностических алгоритмов на основе *искусственных нейронных сетей* (ИНС), объединенных в систему принятия решений (СПР) по идентификации различных дефектов [1-4].

Особенностью ИНС является то, что они обладают характеристиками, позволяющими автономно решать проблемы классификации переменных объекта и их форм, а также самообучения алгоритмам прогнозирования, исходя из опыта отказов [5-8]. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное/неисправное техническое состояние (ТС) ЭГПА и аппроксимировать свою идентификацию [9-12].

Такая модель способна запоминать примеры событий, распределяя на их основании веса соединений структуры, вплоть до устранения нейронов или соединений, которые не влияют на запоминание этих примеров.

Архитектура встроенных систем мониторинга и прогнозирования (ВСМП) ТС ЭГПА на ИНС представляет собой 2 подсистемы [13-16]:

- подсистему приема и обработки информации, которая соответствует ВСМП работы STD-12500-2 ЭГПА с приемом данных по ТС приводного высоковольтного синхронного

двигателя (ПВСД) и их последующую обработку (распределение данных и оценку переменных);

- подсистему интерпретации полученной информации о ТС с использованием алгоритмов ИНС с распознаванием неисправностей и рекомендациями по реализации дальнейших ее действий.

### **Порядок построения ИНС ПВСД**

Применение при прогнозировании ТС большого числа контролируемых переменных ПВСД (напряжений, токов, частичных разрядов и температуры обмоток статора) позволяет увеличить достоверность процедуры мониторинга и сделать ее более эффективной. Для реализации модуля ИНС в начале определяют его размеры, то есть число ее входов и выходов (у нас целесообразно эти значения выбрать равными 3 и 1).

Затем архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов мониторинга и перспектив прогнозирования ТС с определением остаточного ресурса.

Прежде, чем встраивать блок ИНС в подсистему интерпретации информации в структуре ВСМП, необходимо изучить функционирование трех ИНС с входами различной архитектуры. При этом входы данных трех ИНС не одного и того же размера, а, следовательно, и их структуры, выбранные после фазы обучения, будут отличаться и иметь разное число внутренних слоев и число нейронов в этих слоях. В результате выбора наиболее целесообразной сети ВСМП ТС ПВСД на основе объемного параметрического исследования трех ИНС необходимо принять следующие четыре решения.

#### ***1. Окончательный выбор диагностируемых переменных***

Наиболее информативными входными переменными, характеризующими ТС изоляции обмотки статора СТД-12500-2, являются температура меди, интенсивность частичных разрядов (ЧР) и уровень перенапряжений питающей сети. Это обусловлено тем, что, как показали экспериментальные исследования в натуральных условиях, именно эти параметры могут адекватно оценить ТС и заранее спрогнозировать наступление нештатных режимов. К тому же эти переменные доступны прямому измерению штатными техническими средствами и непосредственному их представлению в нейронной базе знаний (НБЗ). В публикациях [17-19] представлены результаты замеров данных эксплуатационных факторов и общая статистика наблюдений за период 1985-2016 гг. с фиксацией 62 случаев выхода из строя СТД-12500-2.

#### ***2. Конструкция НБЗ***

Для создания на основе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояние статорной обмотки ПВСД ЭГПА, необходимо создать такую оптимальную конструкцию НБЗ, в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах, возникающих в различных режимах работы. Для этого на основе анализа существующей статистики неисправностей (и симуляции возможных нарушений) машины СТД-12500-2 все они группируются в 12 видов (включая исправные состояния), и по каждому состоянию оцениваются текущие изменения трех выбранных ранее входных переменных в течение всего периода измерений. В итоге НБЗ каждой переменной составила 3000 различных значений (векторов), характеризующих возможные режимы работы двигателя. Это значение, соответствующее количеству замеров и результатов поставленных экспериментов, необходимо ввести в конструкцию ИНС.

### 3. Создание блока ИНС

Определившиеся нейронные сети являются многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения. Для встраивания блока ИНС в ВСМП ПВСД предлагается исследовать три нейронные сети (рис. 1).

После фазы их тестирования и сравнения между собой можно выбирать наиболее подходящую для решения всего комплекса задач прогнозирования ИНС. При этом этапы конструирования и пригодности нейронных сетей разделяются на три фазы. Первая связана с выбором входов и конструкцией НБЗ исходя из файлов, полученных при анализе всех упомянутых трех параметров мониторинга. Вторая связана с выбором выходов сетей (для каждой отдельно) и их кодов, а третья – с выбором архитектуры сетей.

### 4. Определение тестов селекционированных сетей

При числе используемых входов блока ИНС, равном десять (на рис. 2 –  $p = 10$ ) для каждой контролируемой переменной в табл. 1 приведены полученные результаты тестирования.

Таблица 1

Результаты тестирования трех ИНС

№ ИНС	Число нейронов			
	Входной слой	Внутренний слой	Выходной слой	Среднеквадратичная ошибка
1	10	13	11	$3,24221 \cdot 10^{-15}$
2	20	8	11	$3,71314 \cdot 10^{-16}$
3	30	6	11	$3,26580 \cdot 10^{-17}$

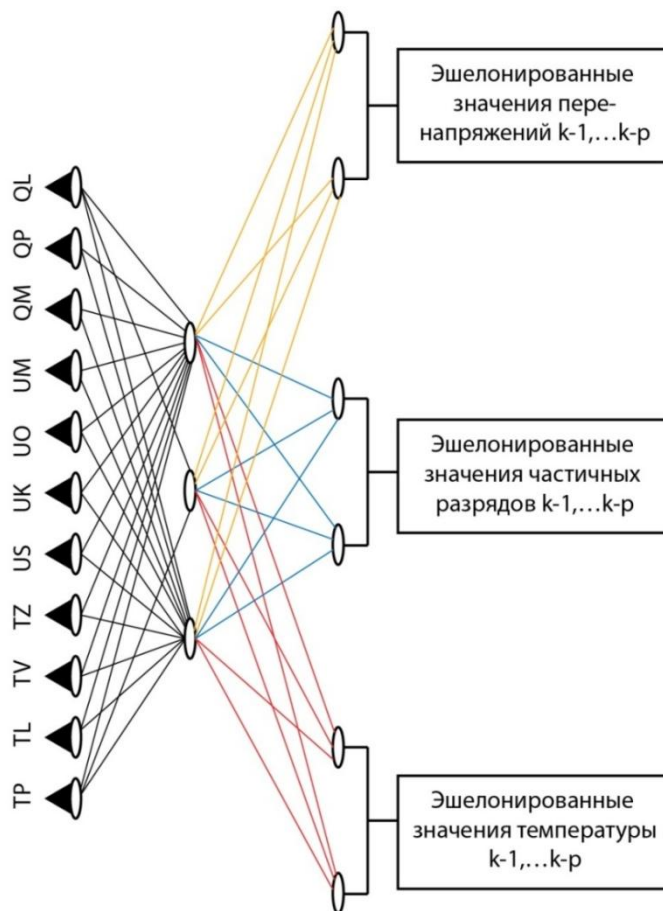


Рисунок 1. Структура третьей ИНС

Для трех сетей этап селекционирования выполняется после того, как вторая сеть завершает свое тестирование после 148 презентаций каждого примера. При этом тестирование выполняется в 2 этапа: на первом сеть делает 100 повторяющихся исследований для каждого примера неисправного состояния, на втором – они вновь вводятся в программу тестирования, которая прекращается после 48 итераций со среднеквадратичной ошибкой результатов тестирования, равной  $3,7 \text{ Ве}^{-16}$ .

### Тесты сетей нейронов

После построения трех сетей нейронов и достижения желаемых точностных показателей при их обучении, важнейшим этапом становится их комплексное сопоставление между собой. При этом сравнение производится путем тестирования входов и выходов каждой ИНС. Эта процедура связана с фазой обучения и определением базы тестов, с помощью которых приступают к тестированию способности ИНС распознавать “скрытые” дефекты, ранее не рассматриваемые при оценке работоспособности ЭГПА, и оценки способности ИНС к обобщению результатов.

Так ВСМП технического состояния ПВСД типа СТД-12500-2 предусматривал выбор из трех ИНС (рис. 3) наилучшей сети путем тестирования их для ранее приведенных дефектов. Он позволил идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов мониторинга, близких к нулю (табл. 1). При тестировании третьей сети для дефектов СТД-12500-2, которые были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправностей, связанных с перегревом в пазовой части рашочки, представлены в табл. 2.

Таблица 2

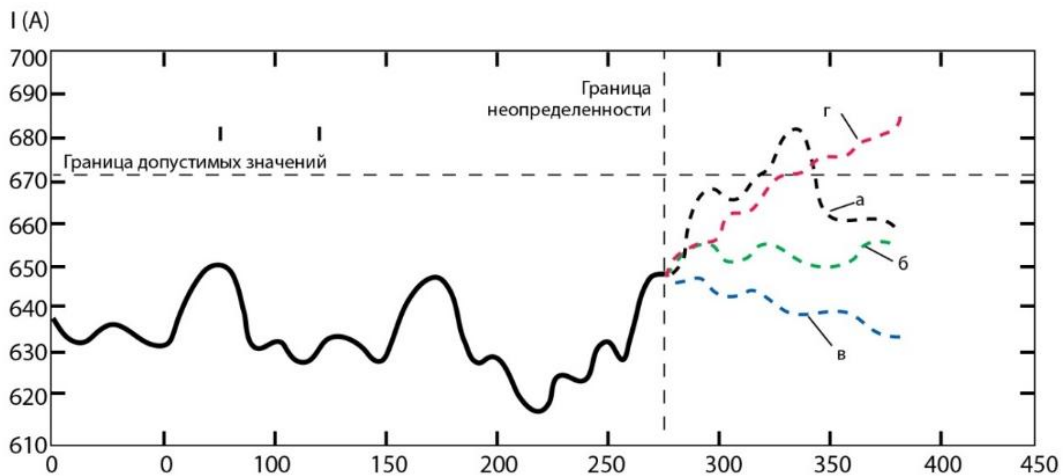
Результаты тестирования третьей ИНС

Выходы ИНС	Нагрузка, % номинала					
	90 %	80 %	60 %	40 %	20 %	10 %
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,8570	1,0000	0,9605
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005
3	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0034
4	0,0049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
8	0,2310	0,0000	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трех ИНС, выявлено, что третья сеть нейронов (см. табл. 1 и 2) наиболее производительна и, следовательно, именно она целесообразна для применения в ВСМП ЭГПА. Что же касается выходов третьей сети, которые близки к желаемому значению, они должны быть приближены к “0” или к “1”, чтобы обеспечить достоверность идентификации неисправности в изоляции статора ПВСД с указанием первопричины и места его появления. При этом обоснование объективных рекомендаций для устранения подобных неисправностей является главным результатом работы ВСМП с ИНС.

## Сопоставление результатов прогнозирования ЭГПА

Рассмотрим временной ряд, описывающий суточные колебания температуры статора (рис. 2) и произведем анализ эффективности инерционных прогностических методов.



**Рис. 2. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2:** *а* – фактический временной ряд, *б* – прогноз, полученный с использованием ИНС (Ворда), *в* – прогноз, полученный с использованием модели Бокса-Дженкинса, *г* – прогноз, полученный с использованием метода временных рядов

Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьем на две части до «границы неопределенности», первая из которых (левая) будет являться основанием прогноза, а вторая (правая) – использоваться для апостериорной точности.

Применение методов на основе ARMA-моделей, в частности, использовался метод Бокса-Дженкинса, возможно, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика видно, что методы на основе моделей Бокса-Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (рис. 2, *б*). На основе полученных данных нельзя достоверно определить момент выхода значений температуры за допустимые пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23–58% ( $\bar{A} = 0.23 - 0.58$ ).

Так же для проверки эффективности использовался метод на основе искусственных нейронных сетей. Для этого использовалась сеть Ворда, на входы которой подавались предыдущие значения временного ряда. Выбор именно этого типа ИНС связан с тем, что нейронные сети способны производить классификацию значимости входных значения.

Моделирование показало, что построенная и обученная искусственная нейронная сеть на границе неопределенности температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но дает пессимистичный прогноз (рис. 2, *в*). На основании полученного прогноза возможно определение общих тенденций развития процесса, но невозможно достоверно определить момент выхода значений температуры статора за пределы допустимых значений. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 16–46% ( $\bar{A} = 0.16 - 0.46$ ).

Для прогнозирования временного ряда методом на основе АДСС использовалась предыстория температурного ряда размером  $N=400$  отсчетов. Полученный многошаговый

прогноз позволяет выделить возрастающую тенденцию временного ряда и с точностью определить момент выхода значений температурного ряда за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 8–34% ( $\bar{L} = 0.08 - 0.34$ ).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что использование метода АДСС позволяет делать более точные прогнозы относительно дрейфа температурных параметров статоров электродвигателей СТД-12500-2 по сравнению с широко применяемыми методами на основе ARMA-моделей и ИНС.

### Выводы

Разработана система мониторинга оценки влияния эксплуатационных факторов ЭГПА на ресурс изоляции статора электродвигателей ЭГПА, которая показала, что все машины СТД-12500 имеют ЧР различной амплитуды и интенсивности, а “on-line” мониторинг ЧР позволяет адекватно оценивать ТС ЭГПА. Результаты исследований эффективности ВСМП ЭГПА на основе методов нечёткой логики (Бокса-Дженкинса) и ИНС (Ворда) при прогнозировании технических параметров СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что они дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции и позволяет принимать более адекватные и своевременные решения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-20720.*

### Библиографический список

1. **Епишин, Д.В.** Устройство лингвистического диагностирования отказов асинхронного электропривода / Д.В. Епишин [и др.] // Патент на полезную модель RU 30444, 27.06.2003. Заявка № 2002134289/20 от 23.12.2002.

2. **Серебряков, А.В.** Нейронные сети прогнозирования ресурса основных агрегатов автономных систем нефтегазопроводов / А.В. Серебряков, О.В.Крюков // В сборнике: "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017. Материалы докладов XXIII МНТК, посвященной 100-летию НГТУ - Нижегородского политехнического института. 2017. С. 273-280.

3. **Крюков, О.В.** Новые методы мониторинга технического состояния электроприводных агрегатов компрессорных станций газопроводов / О.В.Крюков [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 3 (79). С. 78-87.

4. **Крюков, О.В.** Методы мониторинга технического состояния электрооборудования компрессорных станций // В сборнике: Наука. Технология. Производство - 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики. Материалы ВНТК, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. УГНТУ, филиал в г. Салавате. 2016. С. 149-153.

5. **Крюков, О.В.** Исследование условий эксплуатации приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 6 (119). С. 32-42.

6. **Крюков, О.В.** Повышение искробезопасности электрооборудования в газовой промышленности / О.В.Крюков, С.Е. Степанов // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2014. № 8. С. 18-21.

7. **Степанов, С.Е.** Инновационные экологические технологии работы вентиляторных градирен в системах охлаждения / С.Е. Степанов, О.В.Крюков // В сборнике: Великие реки' 2019 труды научного конгресса: 3-х томах. 2019. С. 75-78.

8. **Васенин, А.Б.** Средства мониторинга ветроэнергетических установок автономного электроснабжения линейных участков / А.Б. Васенин, О.В.Крюков // В сборнике: Наука. Технология. Производство - 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики. Материалы ВНТК, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. УГНТУ, филиал в г. Салавате. 2016. С. 64-67.

9. **Васенин, А.Б.** Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на компрессорных станциях / А.Б. Васенин [и др.] // Контроль. Диагностика. 2019. № 11 (257). С. 52-58.

10. **Крюков, О.В.** Исследование электроприводных газоперекачивающих агрегатов по нормативным требованиям мониторинга в процессе эксплуатации // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2017. № 6. С. 20.

11. **Kryukov, O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y.** Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. Т. 90. № 7. С. 473-478.

12. **Киянов, Н.В., Крюков О.В., Захаров П.А., Бабичев С.А., Сыса А.Ю.** Устройство для контроля изоляции электродвигателя // Патент на полезную модель RU 91631, 20.02.2010. Заявка № 2009136880/22 от 05.10.2009.

13. **Крюков, О.В.** Прогнозирование технического состояния объектов ГТС средствами искусственных нейронных сетей / О.В.Крюков, С.Е. Степанов // В книге: Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019). Тезисы докладов VIII МНТК. Москва. 2019. С. 83.

14. **Podrigalo, M., KletsD., BoboshkoO., al.** Braking performance of the one side wheels for the realization of the crab motion for the front-wheel vehicle // SAE Technical Papers. 2019. Т. 2019-September.

15. **Крюков, О.В.** Система контроля технического состояния трубопроводной обвязки компрессорных станций // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2018. № 3 (33). С. 50-55.

16. **Крюков, О.В.** Средства повышения искробезопасности электрооборудования в энергетических отраслях // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2019. № 1 (35). С. 5-9.

17. **Степанов, С.Е.** Методология и результаты экспериментальных исследований по локализации источников высокой разрядности на статоре электродвигателя / С.Е. Степанов [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 8 (121). С. 32-39.

18. **Крюков, О.В.** Автоматизация процедур диагностики электродвигателей на объектах топливно-энергетического комплекса // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2019. № 4. С. 22-28.

19. **Васенин, А.Б.** Оценка эксплуатационных факторов электроприводных газоперекачивающих агрегатов / А.Б. Васенин, О.В.Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 7. С. 6-15.

**A. S. Khlynin, S. E. Stepanov, O. V. Kryukov**

**NEURAL NETWORKS FOR MONITORING AND PREDICTING THE TECHNICAL  
CONDITION OF THE HPA ELECTRIC DRIVE**

JSC "Giprogazcenter", LLC "Gazprom engineering", Nizhny Novgorod,  
Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow

New methods of operational diagnostics and resource forecasting of the main technological installations of compressor stations of main gas pipelines are considered. Methods and examples of predicting the technical state of stator windings using artificial neural networks and the series method are given. Tests of selected networks, a fuzzy Box-Jenkins model, and models of the method for analyzing the dynamics of spectral components with prediction of current values and stator temperatures are obtained. Comparative results of the analysis of the expected States of high-power electric machines, based on the consideration of various operational factors of electric drives, allowed us to develop recommendations for the use of new predictive methods.

**Keywords:** technological installation, megawatt-class electric motor, technical condition forecast, artificial neural networks, tests of selective networks, method for analyzing the dynamics of spectral components.



## НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ПРОЕКТОВ В САПР QUARTUS II

Филиал АО «НЭСК-электросети» «Новороссийскэлектросеть»,  
г. Новороссийск

Рассмотрена оптимизация проектов САПР Quartus II. Программное обеспечение позволяет проводить настройку параметров, предотвращающих усложнение схем и потери времени, связанные с разработкой для микросхем фирмы ALTERA.

**Ключевые слова:** ALTERA, Quartus II, MAX7000S, САПР, Pin Planner, TimeQuest Timing Analyzer, ячейка.

При реализации необходимых алгоритмов на элементной базе фирмы ALTERA разработчик может воспользоваться современным программным обеспечением, созданным компанией - производителем чипов, которое можно получить на сайте [1].

Для удобства все опции представлены в виде оконного интерфейса, что делает работу нагляднее, а выполнение заданий быстрее. Однако на практике при выборе кристалла для программирования могут возникать непредвиденные сбои отлаженного алгоритма. Сбои могут наблюдаться на разных этапах, в том числе на этапе моделирования. Например, на рис.1 отражен статус проекта, успешно скомпилированного и реализованного на микросхеме семейства MAX7000S.

Flow Status	Successful - Sun Dec 15 20:49:39 2019
Quartus II Version	9.1 Build 350 03/24/2010 SP 2 SJ Web Edition
Revision Name	Sorko
Top-level Entity Name	Sorko
Family	MAX7000S
Device	EPM7032STC44-6
Timing Models	Final
Met timing requirements	No
Total macrocells	19 / 32 ( 59 % )
Total pins	34 / 36 ( 94 % )

Рисунок 1. Общая информация после компиляции

На рис.2 представлена ожидаемая часть сигналов, участвующих в обработке и управлении механизмами.

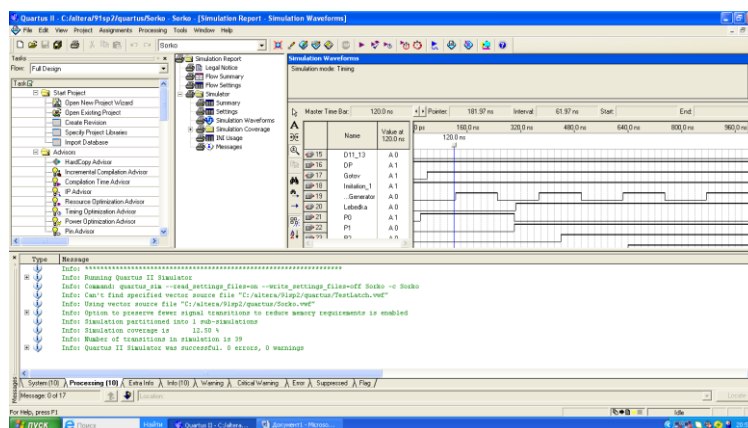


Рисунок 2. Временные диаграммы

Рис.3 показывает частный случай довольно распространённой проблемы - возникновения «иголок», когда на этапе компиляции схема считается успешно завершённой, а вот на этапе проверочного моделирования выявляются нежелательные результаты, представленные на рис.4. Сигналы Lebedka и Gotov содержат «провалы» логических уровней.

Flow Status	Successful - Sun Dec 15 20:55:53 2019
Quartus II Version	9.1 Build 350 03/24/2010 SP 2 SJ Web Edition
Revision Name	Sorko
Top-level Entity Name	Sorko
Family	MAX7000S
Device	EPM7064SLC84-5
Timing Models	Final
Met timing requirements	Yes
Total macrocells	19 / 64 ( 30 % )
Total pins	34 / 68 ( 50 % )

Рисунок 3. Общая информация после компиляции

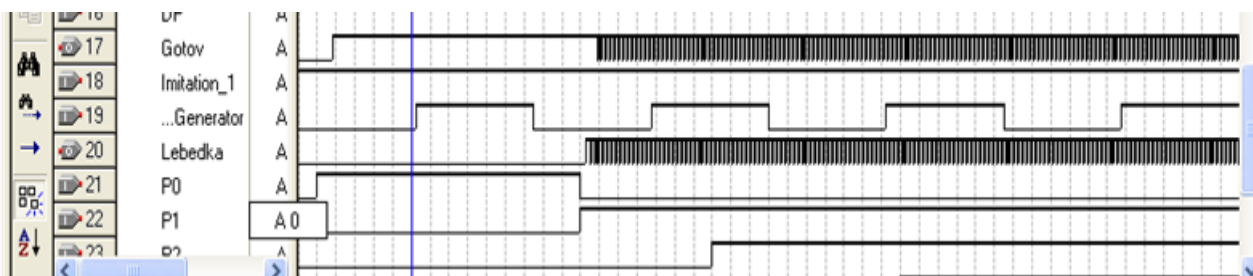


Рисунок 4. Временные диаграммы

Данный результат может свидетельствовать лишь о частном случае возникновения неожиданных «провалов» или задержек, что в каждом случае устраняется индивидуально. Нередко проектировщик может начать вести борьбу путём усложнения схемы, что требует дополнительной работы и дополнительного времени, отодвигая сроки завершения проекта. В более общей ситуации в решении подобных осложнений заметную роль мог бы сыграть Pin Planner, позволяющий определять местоположение выходных и входных выводов, а также Timing Analyzer, создающий временные ограничения для «трассировщика» при проведении внутренней упаковки проекта.

В доступной версии программного обеспечения Quartus II целый ряд опций позволяет анализировать быстродействие разработанной схемы. Это становится возможным благодаря Classic Timing Analyzer или TimeQuest Timing Analyzer. Сервис позволяет получить отчет о задержках между входами и выходами, причем как о имеющихся, так и о минимально возможных в схеме. После имплементации проекта на микросхемах серии MAX7000S и в результате систематизации наблюдений был составлен ряд таблиц. Характеристики этой серии пользователь может найти на [2].

Таблица 1

## Временные задержки прохождения напряжения от входа P1 к выходу Lebedka

Выводы-скорость		44-5	44-6	44-7	44-10
Ячейки	Время	нс			
32	задержка	23,4	28	34,7	42
	минимум	5	6	7,5	10
64	задержка	23,7	28,3	27,5	42
	минимум	5,1	6,1	7,5	10

В табл. 2 отражена статистика изменения временных задержек распространения сигнала от управляющего импульса «P1» к механизму исполнения «Lebedka» в зависимости от изменения скорости программирования и количества выбранных ячеек. Согласно этим наблюдениям были получены графики, представленные на рис. 5-6.

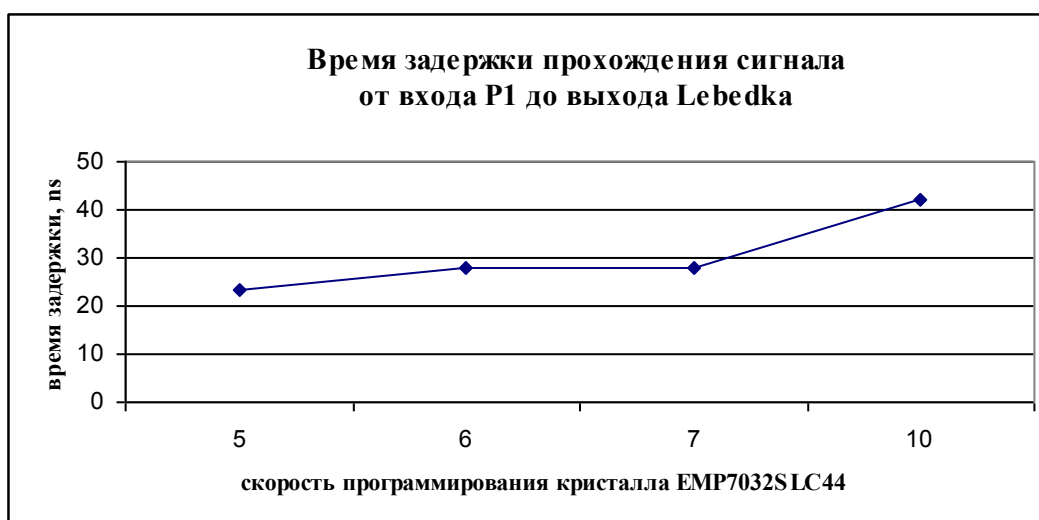


Рисунок 5. Временная характеристика алгоритма на 32 ячейках



Рисунок 6. Временная характеристика алгоритма на 64 ячейках

При увеличении числа выводов с 44 до 84 наблюдается повторяющаяся зависимость между временем задержки прохождения сигнала и выбором скорости программирования см. табл. 2 и рис. 7.

## Временные задержки прохождения напряжения от входа P1 к выходу Lebedka

Выводы-скорость		84-5	84-6	84-7	84-10
Ячейки	Время	нс			
64	задержка	23,4	28	27,5	42
	минимум	5	6	7,5	10

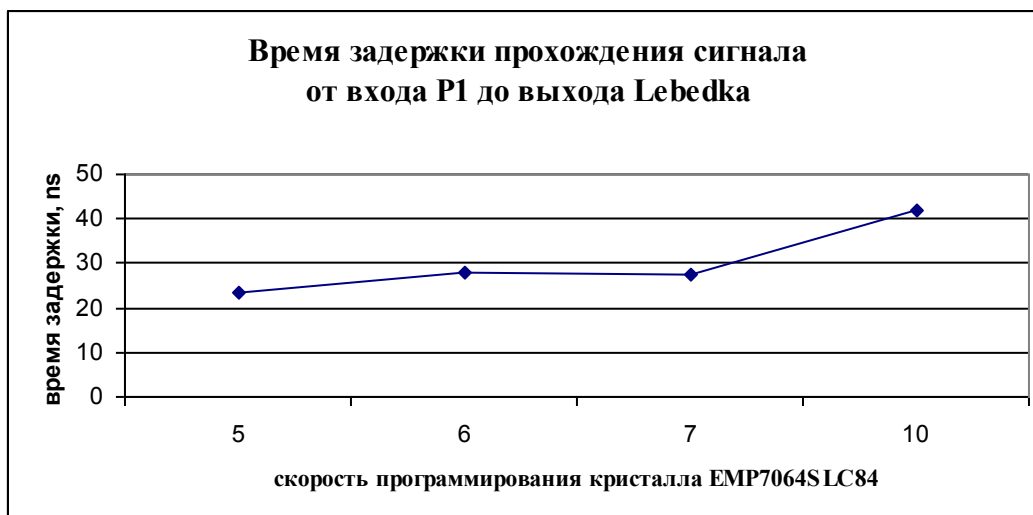


Рисунок 7. Временная характеристика алгоритма на 64 ячейках

Функционал – Show Fitter Placements [3] в разделе Pin Planner дает возможность проверки и редакции в автоматическом режиме оптимальности использования вводов/выводов. В качестве результата можно получить новое размещение входов – выходов, как то показано на рис. 8.

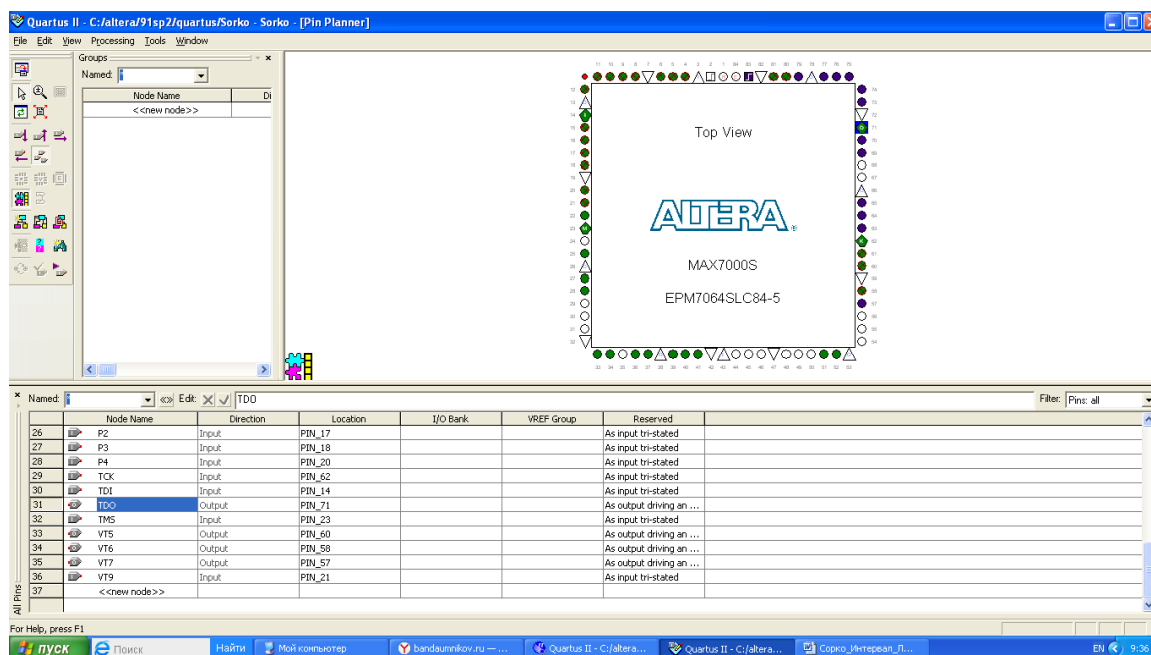


Рисунок 8. Рабочее окно Pin Planner

При отключении Pin Planner получаем отсутствие функции уплотнения и снижение максимальной частоты работы схемы, как это видно на рис. 9 и 10.

Fmax Summary		
	Fmax	Restricted Fmax
1	94.77 MHz	94.77 MHz

Рисунок 9. Максимальная частота алгоритма до отключения Pin Planner

Fmax Summary		
	Fmax	Restricted Fmax
1	91.02 MHz	91.02 MHz

Рисунок 10. Максимальная частота алгоритма после отключения Pin Planner

Кроме этого меняется время распространения интересующего нас сигнала P1 – Lebedka с 17,121 до 18,441 ns (данные для микросхемы EP1C3T100A8).

Краткое резюме практического применения полученных результатов исследования говорит о целесообразности установки скоростного режима на минимальной отметке (для данного проекта Speed = 6) и там, где возможно, использования Pin Planner.

### Библиографический список

1. <https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/downloads/software/quartus-ii-we/120.html> (дата обращения 06.03.2020)
2. <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ds/archives/m7000.pdf> (дата обращения 06.03.2020)
3. <https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/documentation/grc1529967026944.html> (дата обращения 06.03.2020)

**А.М. Pogorelov**

### **SOME OPPORTUNITIES OF OPTIMIZATION DIGITAL PROJECTS IN AUTOMATIC PROJECT SYSTEM QUARTUS II**

Filial of JSC «NESK-Electroseti», «Novorossiysk – Electrose»

This article shows optimization of projects in Quartus II. Software allows set the parameters to easy program the schemes and reduce time resource for creating projects on base ships of ALTERA.

**Keywords:** ALTERA, Quartus II, MAX7000S, Automatic Project System, Pin Planner, TimeQuest Timing Analyzer, Cell.

## Секция 3. Информационные технологии (автоматизация проектирования)

УДК 681.3

Д.И. Булатицкий, В.Н. Филиппов

### ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ И СМЯГЧЕНИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Брянский государственный технический университет

В статье рассматриваются основные аспекты применения беспилотной авиации для предотвращения чрезвычайных ситуаций и смягчения их последствий. Целью системы применения беспилотной авиации является организованное и правомерное использование (применение) стоящих на оснащении беспилотных авиационных систем (БАС), сил и средств управления ими, сбор, обработка и доведение до заинтересованных лиц получаемой с помощью беспилотных воздушных судов (далее – БВС) информации для принятия грамотных управленческих решений в ходе выполнения задач по предупреждению чрезвычайных ситуаций (ЧС) и ликвидации их последствий, выполнению аварийно-спасательных, поисково-спасательных и других неотложных работ.

**Ключевые слова:** беспилотная авиационная система, БАС, чрезвычайные ситуации, организационные структуры, беспилотник, квадрокоптер.

#### Введение

Беспилотная авиация может найти широкое применение для решения специальных задач, когда использование пилотируемой авиации невозможно или экономически невыгодно: осмотр труднодоступных участков границы, наблюдение за различными участками суши и водной поверхности, определение последствий стихийных бедствий и катастроф, выявление очагов лесных пожаров, выполнение поисковых и других работ.

Применение беспилотных авиационных систем (БАС) позволяет дистанционно, без участия человека, и не подвергая его опасности, проводить мониторинг ситуации на достаточно больших территориях в труднодоступных районах при относительной дешевизне [2].

Задачи для применения беспилотных авиационных систем можно классифицировать на следующие группы: обнаружение ЧС, поиск и спасение пострадавших, а также оценка ущерба от ЧС [1].

В таких задачах начальник группы по применению БАС должен оптимальным образом выбрать маршрут, высоту полета БАС, чтобы охватить район наблюдения за минимальное время или количество пролетов с учетом секторов обзора видеокамер и тепловизионной камеры. При этом необходимо исключать многократный пролет одних и тех же мест с целью экономии материальных и людских ресурсов.

Данные об опасных и стремительно распространяющихся ЧС, таких как пожары, разливы рек и наводнения, следует передавать в реальном времени для принятия возможных срочных мер по их ликвидации и оповещения людей в зоне бедствия.

Рассмотрим применение беспилотных авиационных систем на примере Главного управления МЧС России по Брянской области.

### **Организационные структуры, занимающиеся применением БАС в ГУ МЧС России по Брянской области**

В состав ГУ МЧС России по Брянской области входит три основных отдела, которые занимаются применением БАС:

1. Центр управления в кризисных ситуациях главного управления (ЦУКС ГУ) – это подразделение, оперативно реагирующее на все возможные ЧС, координирующее работу управляющих ведомств (структур). ЦУКС организывает мониторинг пожароопасных участков, а также аэрофотосъемку очагов возгорания лесных массивов и торф содержащих земель. В процессе подготовки к весеннему периоду, выполняет аэросъемку для создания ортофотоплана, дальнейшего построения 3D модели и моделирования паводковой ситуации.

2. Специальная пожарно-спасательная часть (СПСЧ) – это подразделение, предназначенное для мониторинга ЧС, а также наблюдение за дорожно-транспортной обстановкой в осенне-зимний период. СПСЧ производит топографическую съемку для построения топографических карт, по которым в свою очередь можно будет провести анализ типов циклических рисков, характерных для региона.

3. Государственная инспекция по маломерным судам (ГИМС) – это подразделение, которое производит обеспечение в пределах своей компетенции безопасности людей на водных объектах. Осуществляет учет аварий и происшествий с маломерными судами, а также несчастных случаев с людьми на воде. Участвует в поиске и спасании людей на водных объектах с применением БАС. Производит мероприятия по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на водных объектах.

### **Основные виды БВС и навесного оборудования, применяемых в деятельности ГУ МЧС России по Брянской области и решаемые с их помощью задачи**

На вооружении в ГУ МЧС России по Брянской области находятся 11 БАС следующих видов: два аппарата самолетного типа (один Zala 421-04M, и один Дельта М) и 9 аппаратов вертолетного типа (Phantom 3 Advanced, Phantom 4 PRO, DJI Inspire)

Можно выделить следующие преимущества БАС по сравнению с применением наземной техники и работой личного состава в полевых условиях:

- осуществляют полеты при различных погодных условиях.
- проводят воздушный мониторинг в труднодоступных и удаленных местах.
- являются достоверным источником информации при ЧС.
- обнаруживают ЧС (лесные пожары, горение торфяников) на ранних стадиях.
- исключают риск для жизни и здоровья человека.

Беспилотная авиационная система предназначена для решения следующих задач:

- дистанционный мониторинг лесных массивов с целью обнаружения лесных пожаров;
- мониторинг и передача данных по радиоактивному и химическому заражению местности и воздушного пространства в заданном районе;

- обнаружение и мониторинг ледовых заторов и разлива рек;
- топографическая съемка местности, для дальнейшего построения 3D модели и прогнозирования ЧС;
- определение точных координат районов ЧС и пострадавших объектов.

Мониторинг возможно осуществлять в дневное и ночное время суток, в благоприятных и ограниченных метеоусловиях. Наряду с этим БАС обеспечивает поиск потерпевших и пропавших групп людей. Поиск проводится по заранее введенному полетному заданию или по оперативно изменяемому специалистом маршруту полета. Беспилотная авиационная система оснащена приборами наведения, бортовыми радиолокационными комплексами, датчиками и видеокамерами.

Во время полета управление беспилотной авиационной системой автоматически осуществляется посредством бортового комплекса навигации и управления, в состав которого входят:

- навигационной системой (GPS/ГЛОНАСС);
- система датчиков, обеспечивающая определение ориентации и параметров движения, а также измерение высоты и скорости БАС;
- полётный контроллер.

Бортовое оборудование связи функционирует в разрешенном диапазоне радиочастот и обеспечивает передачу данных с БАС на пульт оператора и обратно.

Теперь рассмотрим более детально каждый из беспилотников.

### **Zala 421-04M**

Беспилотный самолет тактической дальности с системой автопилот, навигационной системой (GPS/ГЛОНАСС), встроенной цифровой системой телеметрии, навигационными огнями, встроенным трехосевым магнитометром, встроенным цифровым фотоаппаратом, цифровым широкополосным видеопередатчиком, радиомодемом с приемником, системой самодиагностики и поисковым передатчиком [5]. Беспилотный самолет ZALA 421-04M при продолжительности полета 1,5 часа в режиме реального времени передает высококачественную фото-, видео- и тепловизионную информацию на территории радиусом до 25 км. Аппарат позволяет решать сложнейшие задачи в различных погодных и климатических условиях. Обладает малыми габаритами и низкой удельной массой. Собственная независимая инерциальная система определения положения платформы, а также гиросtabilизированный подвес позволяют значительно нивелировать механические помехи и колебания.

### **Delta-M**

Беспилотное авиационное судно Delta-M может применяться для широкого спектра задач, куда входит разведка местности, проведение патрульных и наблюдательных полётов, геологическая и геодезическая разведка, осуществление задач, связанных с аэрофотографированием и аэросъёмкой местности, проведением картографических работ и составлением планов и карт местности, осуществлением поисковых операций, применяться для патрулирования автомобильных дорог и др.

Дрон Delta-M обладает небольшими габаритными размерами. В качестве средства наблюдения, на беспилотном летательном аппарате Delta-M применяется электрооптическая камера высокого разрешения, что позволяет получать высокоточные и высококачественные снимки и вести съёмку местности. Назначение БАС - это аэрофотосъёмка и видеонаблюдение в реальном времени. Решает такие задачи как: создание карт и планов



крупных масштабов до 1:500, построение трёхмерных моделей местности. При ЧС Delta-M производит мониторинг стихийных бедствий, а также обнаружение объектов и людей.

### **Квадрокоптер DJI Phantom 3 Advanced**

Представляет собой усовершенствованную модель летательного аппарата. Имеет высокую манёвренность, точное управление. На квадрокоптере установлена камера, изображение с которой передаётся управляющему устройством оператору [4].

Автоматический 3-х осевой стабилизатор помогает ровно удерживать 12-ти мегапиксельный сенсор. А также способен защитить камеру от порывов ветра, устраняя ненужное дрожание кадров. Фотосъёмка производится при максимальном разрешении 12 Мп. Широкоугольный объектив высокого качества обеспечивает чистое, без искажения, поле зрения с углом обзора в 94°.

Потоковая трансляция видео в HD-разрешении поступает напрямую на смартфон/планшет благодаря оригинальному приложению DJI GO. Phantom3 поддерживает передачу HD видео в реальном времени с разрешением 720 p. Расстояние, на котором возможна трансляция доходит до 1 км.

### **Phantom 4 Pro**

Модель Phantom 4 Pro оснащена емким аккумулятором, который позволяет находиться в полёте до 30 минут, а также сенсорами по бокам, которые помогают огибать препятствия, не задевая их. В режиме автопилота Phantom 4 Pro может развивать скорость до 50 км/ч [3].

### **DJI Inspire 1 V2.0**

Модель взяла всё самое лучшее от предыдущей версии: комплектацию с 4K видеокамерой, возможность управления с мобильного приложения DJI GoApp, систему позиционирования и контроля Vision. Также в новом квадрокоптере сохранилась трансляция HD-видео на далёкие расстояния с использованием системы , а также интеллектуальная система электрического питания для контроля заряда [6].

При помощи данного вида техники решаются различные виды задач, такие как:

- построение ортофотопланов для 3D моделирования паводковых ситуаций.
- поиск заблудившихся или пропавших людей.
- мониторинг очагов возгорания пожаров.
- мониторинг ЧС в режиме реального времени и оценка масштабов ЧС.

В ближайшее время планируется поставка всепогодного БВС самолетного типа Supercam S350 с дальностью полёта 270-350 км и высотой полёта до 5000 м, а также колёсный комплекс на базе автомобиля КАМАЗ с прицепом, на котором размещается конвертоплан.

## **Заключение**

Анализ задач и процедуры их решения показал, что практически вся интеллектуальная обработка данных, полученных с БВС, выполняется людьми и автоматизирована недостаточно. Это приводит к двум основным негативным последствиям. Во-первых, в условиях многочасовых штатных наблюдений или авральные мероприятий высока вероятность ошибок оператора, связанных с пропуском искомым событий или объектов. Во-вторых, нерационально используются трудовые ресурсы.

Таким образом, выявлена потребность в создании средств автоматизации интеллектуальной обработки данных в системах применения БАС. В рамках перспективных

разработок планируется реализовать автоматизированную систему поиска целевых объектов различного типа: людей, автомобилей, возгораний и других на основе применения искусственных нейронных сетей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00844.*

### **Библиографический список**

1. Временная программа профессиональной подготовки специалистов подразделений беспилотной авиации МЧС России от 11.10.2019 г.
2. Воздушный кодекс Российской Федерации. 19 марта 1997 г. №60-ФЗ . М., 1997. Ред. 06.07.2016 г., (ФЗ-462)
3. <https://clck.ru/MBcJu> Коптер DJI Phantom 4 PRO Plus: полный обзор
4. <https://clck.ru/MBcKP> Обзор + сравнение DJI Phantom 3 Professional, Standard и Advanced
5. <https://www.youtube.com/watch?v=DmCiMJPjQ4o> Беспилотный вертолет Zala 421-04M
6. [https://yandex.ru/efir?t=6&stream\\_id=49d316524d9e158caec29b4f312e2fb6](https://yandex.ru/efir?t=6&stream_id=49d316524d9e158caec29b4f312e2fb6) Квадрокоптер DJI Inspire 1 V2.0.

**D.I. Bulatitskiy, V.N. Filippov**

### **USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO PREVENT EMERGENCIES AND MITIGATE THEIR CONSEQUENCES**

Bryansk State Technical University

**Purpose:** the purpose of this article is to analyze the use of unmanned aircraft systems to prevent emergencies and mitigate their consequences, as well as finding ways to improve such systems.

**Design / methodology / approach:** methodology is that the unmanned aerial vehicle flies over the search area, reports images, photos, the neural network searches for people, advanced search according to parameters (color of clothes, object size, movement speed), the mapping of the object in multiple images, elimination of false targets (persons involved in the search) based on their location

**Originality / value:** an approach to improving the efficiency of solving problems of searching people and other objects using unmanned aircraft based on the use of artificial neural networks is proposed.

**Keywords:** unmanned aircraft system, emergency situations, organizational structures, drone, quadrocopter.

В.В. Комбаров<sup>2</sup>, И.В. Полозов<sup>1</sup>, Е.Н.Соснина<sup>1</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИНЯТИЯ КОНСЕНСУСА В СИСТЕМЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Теком»

Разработан итерационный алгоритм управления регуляторами напряжения в узлах распределительных энергетических сетей. Для обеспечения надёжного децентрализованного управления сетью применён алгоритм Raft принятия консенсуса при управлении вычислительным кластером.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, выравнивание нагрузки, кластер, задача консенсуса.

### Введение

Работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов управления устройствами плавного регулирования напряжения в узлах распределительных энергетических сетей для компенсации внешних возмущений и локальных перегрузок, приводящих к аварийным режимам и соответствующим отключениям сегментов сети. Регулирование осуществляется твердотельными регуляторами напряжения (ТРН). Данная работа продолжает исследования [1,2], посвящённые разработке интеллектуальной системе управления (ИСУ) энергетическими сетями, обладает научной новизной и имеет практическую ценность.

Согласно Концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [3] «электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режимов работы энергосистемы». Для реализации этого положения используются «современные системы автоматизации управления нормальными и аварийными режимами работы с использованием мощных компьютерных средств и единой сети связи для управления и оценки состояния режимов работы ИЭС».

Для динамичной адаптации к внешним возмущениям интеллектуальная сеть должна иметь функцию автоматического управления потоками активных и реактивных мощностей.

При этом достигаются следующие положительные эффекты:

- а) выравнивание загрузки питающих трансформаторов;
- б) стабилизация уровня напряжения на шинах потребителей;
- в) увеличение надёжности электроснабжения;
- г) повышение пропускной способности линий электропередач.

Перераспределение потоков мощности в такой сети не будет строго детерминированным и это предполагает, что такая сложная неструктурированная сеть должна иметь мощную управляющую систему, согласовывающую между собой работу всех компонентов сети посредством специальной сети связи. Поскольку в данной работе предполагается, что

автоматическое регулирование децентрализовано, то оно выполняется согласно алгоритмам, реализуемым программным обеспечением промышленных компьютеров, установленных в каждом узле сети в блоках управления регуляторами (БУ ТРН). При этом результаты работы указанных алгоритмов должны с минимальными задержками и с высокой надёжностью распространяться к соседним узлам. Это задаёт высокие требования для информационной сети, построенной параллельно электрической.

Каждый узел состоит из трёх связанных элементов:

- БУ ТРН;
- ТСУ (технологическая система управления);
- ТРН.

ТСУ реализует физическое выполнение команд управления ТРН, измерение параметров его функционирования и передачу их в вышестоящий блок управления (БУ ТРН).

БУ ТРН обеспечивает функции оперативного управления ТРН, диагностики его состояния, сбор данных мониторинга и реализацию алгоритмов интеллектуального управления сетью ТРН с целью эффективного управления потоками мощности, обеспечения более высоких стандартов поставки электроэнергии потребителям и снижения потерь при передаче электроэнергии.

БУ ТРН представляет собой компьютер промышленного образца, географически расположенный рядом с ТРН (максимальная удаленность диктуется спецификацией интерфейса соединения с ТСУ ТРН). Также БУ ТРН оснащен интерфейсом связи с другими БУ ТРН для организации сети обмена данными о режимах работы подконтрольных им устройств и реализации работы алгоритмов активно-адаптивного управления сетью передачи электроэнергии.

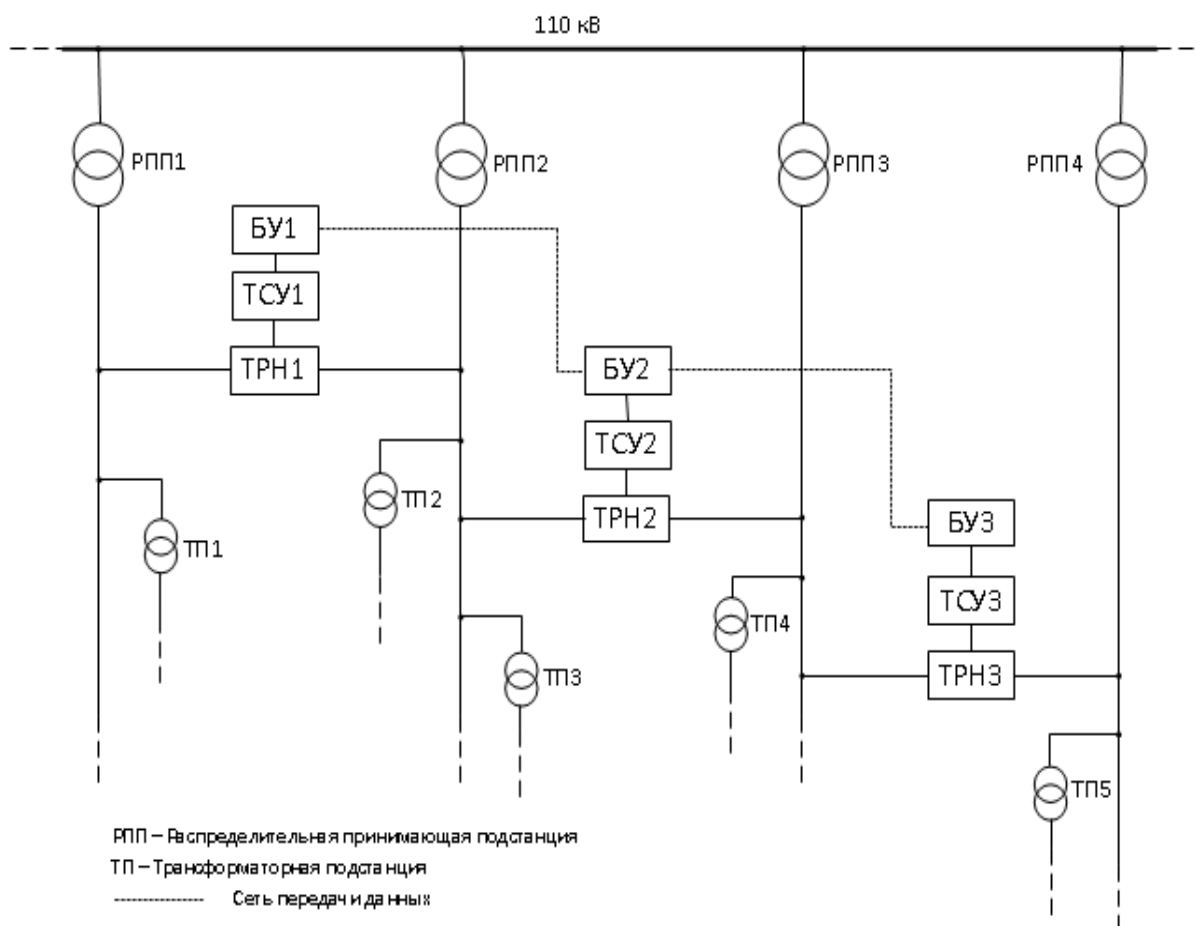
БУ ТРН имеет следующие интерфейсы:

а) «южный» интерфейс – интерфейс связи с ТСУ ТРН. Выбор конкретного типа физического интерфейса и протокола взаимодействия производится на этапе эскизного проектирования. Интерфейс должен обеспечивать скорость передачи данных, достаточную для работы алгоритмов управления ТРН и быть физически достаточно защищенным для того, чтобы работать в непосредственной близости от ТРН;

б) «западный» интерфейс – интерфейс связи с другими БУ ТРН, подключенными к другим ТРН, находящимися в одной сети передачи электроэнергии. Интерфейс нужен для обмена информацией для отработки алгоритмов интеллектуального управления сетью ТРН. Физически он может быть реализован с использованием разных технологий, включая волоконно-оптические линии связи, беспроводные каналы и технологию связи по линиям электропередачи (PLC);

в) интерфейс клиента оперативного управления БУ ТРН. Интерфейс, позволяющий оператору подключиться к работающему БУ ТРН для того, чтобы посмотреть текущие параметры его работы и, при необходимости, произвести коррекцию параметров работы алгоритмов управления конкретным ТРН и сетью ТРН в целом.

На рис. 1 показана схема участка распределительной сети с множеством трансформаторных подстанций (ТП) и цепями для управления перетоками мощности, содержащими ТРН с соответствующими ТСУ и БУ. БУ при этом выполняют функцию маршрутизации информационных потоков.



**Рисунок 1. Структура ИСУ ТРН для сети Ethernet и сотовой связи**

Поскольку автоматическое управление ИСУ децентрализовано, функции регулирования выполняются в каждом БУ ТРН локальным программным обеспечением (ПО), реализованным на базе *алгоритма управления электрической сетью*.

Функцию распространения информации о состоянии узлов сети выполняет ПО управления группой промышленных компьютеров БУ, работающей как единая система, называемая кластером. В качестве алгоритма данного ПО используется *алгоритм управления кластером RAFT* [4,5], решающий задачу согласования узлов.

Функциональная схема использования указанных алгоритмов в системе показана на рис.2.

### **Алгоритм управления кластером**

Основная функция по управлению кластером заключается в согласовании узлов.

Несмотря на относительную простоту, Raft обеспечивает безопасную и эффективную реализацию машины состояний (конечного автомата) поверх кластерной вычислительной системы. Существует множество реализаций Raft с открытым исходным кодом на разных языках программирования.

Raft имеет следующие особенности:

- предполагает, что на кластере всегда существует явно выделенный лидер. Только этот лидер отправляет новые записи на другие узлы кластера. Таким образом, остальные узлы следуют за лидером и не взаимодействуют между собой (за исключением фазы голосо-

ния). Если внешний клиент подключается к кластеру через обычный узел, то все его запросы перенаправляются лидеру и только оттуда приходят на узлы;

- предполагает декомпозицию задачи управления кластером на несколько, слабо связанных, подзадач, основные из которых: выбор лидера (голосование) и репликация журналов (логов). Каждая из этих задач допускает более детальное разделение. Это упрощает понимание алгоритма и снижает риск ошибок при его реализации;
- журналы-логи не могут содержать пропусков. То есть записи добавляются строго последовательно. Это позволяет очень сильно упростить алгоритм. Кроме того, специфика прикладных задач, чаще всего, не позволяет корректно работать с журналами, содержащими пропуски;
- позволяет легко менять конфигурацию кластера, не останавливая работы: добавлять или удалять узлы.

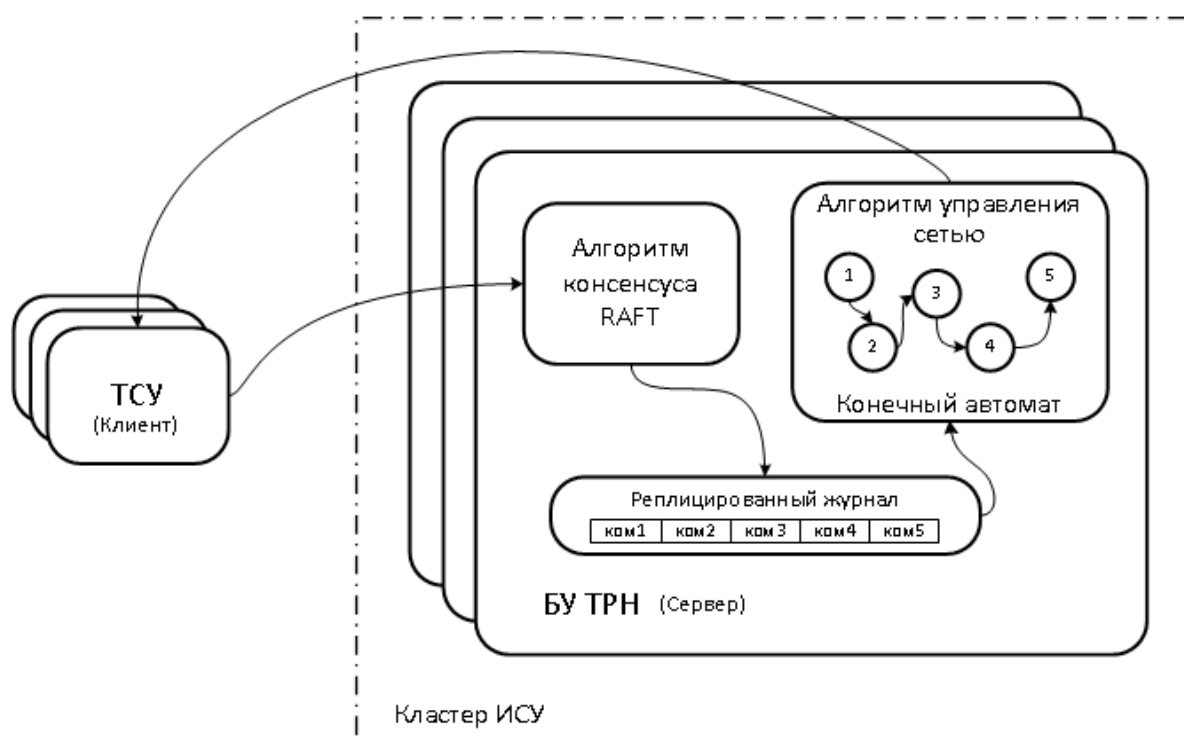


Рисунок 2. Функциональная схема ИСУ

Raft строится поверх кластера, на каждом из узлов которого работает некая машина состояний. Raft обеспечивает надёжную доставку сигналов на все узлы в заданном порядке. Таким образом, обеспечивается переход всех машин состояний по одним и тем же последовательностям состояний, и каждый узел гарантированно приходит в согласие с другими узлами.

Важным обстоятельством является то, что Raft строго нумерует все записи в журнале. Записи должны идти строго последовательно. По их номерам определяется степень актуальности состояния узла. При выборе лидера лидером всегда становится самый актуальный узел. Эти же номера используются для нумерации сессий голосования. В запросе на голосование узел может проголосовать только единожды.

## Алгоритм управления сетью

Разрабатываемый алгоритм управления для ИСУ базируется на Raft и использует его основные функции:

- надёжное обеспечение выбора лидера;
- гарантированную доставку широковещательных сообщений от лидера к узлам.

Целью балансировки потоков мощности электрической сети является выравнивание нагрузки на отдельных частях сети, что ведет к увеличению надежности сети в целом, а также оптимизации использования энергетических ресурсов.

Для оптимизации работы электросети необходима информация о том, в каких пунктах электросети параметры электроэнергии, предоставляемые потребителям, отклонились от стандартных значений. Эти данные используются для формирования управляющих воздействий на сеть для того, чтобы привести эти параметры к ожидаемым значениям. Рассмотрим, как это реализовано в алгоритме.

Известно, что ТРН способен измерять следующие параметры:

- действующее значение напряжения в фазах до регулятора;
- действующее значение напряжения в фазах после регулятора;
- действующее значение тока в линии фазы;
- фазовый угол тока линии относительно фазового напряжения.

Также известно, что ТРН позволяет управлять следующими параметрами:

- абсолютное значение напряжения в фазе после регулятора;
- фазовый угол тока линии относительно фазового напряжения в фазе.

Соответственно оценив нагрузку до регулятора и после, используя ресурсы соседней части сети, можно произвести коррекцию потока мощности через регулятор, тем самым поделив нагрузку между соседними частями сети.

Для реализации адаптивного алгоритма управления сетью поверх электрической распределительной сети образуется логический вычислительный кластер, образованный из промышленных компьютеров, каждый из которых управляет своим отдельным ТРН. В рамках данной работы предполагается, что все узлы, входящие в кластер, могут обмениваться информацией друг с другом без потерь и без задержек.

Управление параметрами кластера осуществляется лидером кластера. Лидер — это произвольный узел кластера, выбранный голосованием между всеми узлами кластера, посредством алгоритма поиска консенсуса Raft. Задача лидера состоит в управлении потоками мощности между частями электрической сети посредством изменения параметров узлов кластера.

Алгоритм управления электрической сетью является итеративным. Каждая итерация алгоритма состоит из нескольких шагов, перечисленных далее.

На первом этапе каждым узлом считываются собственные значения напряжения, фазы и тока. Затем проводится анализ значений параметров по заданным критериям. Критерии учитывают максимальный поток мощности через текущий узел и возможность делить нагрузку с соседней частью сети. Критерии формируются отдельно для каждого узла кластера.

Далее, на основе произведенных вычислений формируется желаемая коррекция значений параметров каждого узла и происходит передача желаемых параметров коррекции лидеру кластера.

После получения текущих значений с каждого узла кластера лидер принимает решение об изменении определенных значений на одном из узлов кластера. Предполагается, что изменение параметров должно происходить итеративно и последовательно, на небольшое значение

и только на одном узле в каждую итерацию. Лидер выбирает среди узлов узел с максимальной требуемой коррекцией параметра и посылает запрос этому узлу на изменение значения параметра на определенный шаг. Размер шага задается настройками кластера.

Один из узлов кластера получает от лидера запрос на изменение его параметров работы, производит эти изменения и посылает лидеру сообщение о том, что изменения были успешно произведены. На этом итерация работы алгоритма заканчивается.

Признаком того, что коррекция значений параметров узла была проведена, является изменение поля номера итерации. Если значение номера итерации больше текущего номера (на стороне лидера), то лидером делается вывод, что узел пересчитал коррекции своих параметров и прислал обновленные значения. Далее лидер опять производит сбор данных анализа со всех узлов кластера. Если изменения коррекции значений параметров от узлов получены, в таком случае лидер инкрементирует свой текущий номер итерации и повторяет шаги по анализу и изменению данных.

Таким образом, на каждой итерации алгоритма вносятся небольшие изменения в работу сети на одном из ее узлов. За счет того, что изменения вносятся в работу только одного узла и на небольшое значение, работа алгоритма является устойчивой и предсказуемой и не приводит к дисбалансу сети.

Отказоустойчивость алгоритма достигается за счет того, что все элементы сети объединяются в кластер, каждый из участников которого является равнозначным. Лидер кластера, который принимает решения об управлении сетью, заранее неизвестен и выбирается случайно из всех элементов кластера. То есть каждый элемент кластера содержит в себе всю необходимую логику для того, чтобы стать лидером, если остальные участники кластера его выберут. Процедура выбора лидера является конечной и отказоустойчивой, и обеспечивается зарекомендовавшим себя в кластерном вычислении алгоритмом Raft. В случае если текущий лидер кластера становится недоступным из-за проблем в сетевой связности и/или программных или аппаратных сбоев, то кластер производит выборы нового лидера и алгоритм продолжает работу. В случае если из кластера из-за различных сбоев выбывает слишком много участников, то алгоритм начинает считать, что у него нет достаточного кворума для принятия решений об управлении сетью, и останавливается. В этом случае оператору отправляется оповещение о сбое.

## Выводы

В настоящей работе показано применение известного алгоритма принятия консенсуса Raft для управления кластером промышленных компьютеров, обеспечивающих плавное регулирование напряжения распределительной электрической сети с помощью разработанного итерационного алгоритма управления узлами сети.

Работоспособность ИСУ, построенной с использованием предложенных алгоритмов, проверена с помощью разработанной программной имитационной модели ИСУ экспериментального образца ТРН.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-07-00160.*

## Библиографический список

1. **Анисимов, С.А.** Разработка архитектуры системы управления трансформаторно-тиристорными регуляторами напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока



(ТТРИМ ОТ) / С.А. Анисимов, А.Б. Лоскутов, И.В. Полозов, А.И. Смирнов, Е.Н. Соснина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №1(98). – С. 184-193

2. **Анисимов, С.А.** Алгоритмы управления отказами в верхних уровнях равномерно-распределенных энергетических сетей / С.А. Анисимов, А.Б. Лоскутов // Системы управления и информационные технологии. 2015.№2(60), с.56-64.

3. **Дементьев Ю.А.** Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) / Ю.А. Дементьев, Р.Н. Бердников, Ю.И. Моржин, Ю.Г. Шакарян // XII Всемирный электротехнический конгресс. Сборник докладов. М., 2011, –С. 76-91.

4. The Raft Consensus Algorithm [Электронный ресурс]. - URL: <https://raft.github.io/> (дата обращения 11.10.2018).

5. **Ланцов, А.В.** Исследование алгоритмов принятия консенсуса в сети ненадёжных вычислителей // Магистерская диссертация. МФТИ – 2015. – 59 стр.

**V.V. Kombarov<sup>2</sup>, I.V. Polozov<sup>1</sup> L.N. Sosnina<sup>1</sup>**

## **USING SEARCH OF CONSENSUS SOFTWARE IN DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM OF DISTRIBUTION POWER NETWORKS**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alekseev,

<sup>2</sup>Tecom LLC<sup>2</sup>, Nizhny Novgorod

An iterative algorithm for controlling voltage regulators in the nodes of distribution power networks has been developed. To ensure reliable decentralized network management, the consensus algorithm Raft for managing the computing cluster is applied.

**Key words:** intelligent control system, load balancing, cluster, consensus task.

Д.А. Кротов<sup>1</sup>, Ю.А. Скудняков<sup>2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИКИ GPGPU ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ БОЛЬШИХ МАССИВОВ ДАННЫХ

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В данной работе рассматриваются различные методы интеллектуального анализа данных. Описаны основные особенности методов интеллектуального анализа данных. Рассмотрена техника интеллектуального анализа GPGPU, значительно ускоряющая обработку данных.

**Ключевые слова:** большие данные, интеллектуальный анализ данных, техника GPGPU.

### Введение

С наступлением цифровой революции информацию стало легко получать, обрабатывать, хранить и распространять. В настоящее время в базах данных содержится огромное количество информации. И это количество стремительно растет, наряду с развитием вычислительных технологий. К тому же постоянно расширяется их использование в различных сферах жизни. Можно даже провести аналогию между законом Мура и увеличением обрабатываемой информации. Согласно закону Мура, количество транзисторов в одном микрочипе удваивается каждые 24 месяца, и, на данный момент, этот закон применим. Именно это и можно сравнивать с наблюдениями из области данных, где размер и количество баз данных увеличиваются соответствующим образом. Так происходит во всех областях человеческой деятельности, от повседневных (таких как сведения об использовании кредитной карты, о покупках в магазине, записи о телефонных разговорах и т.д.), до научных (таких как изображения астрономических тел, молекулярные базы данных и т.д.). Неудивительно, что в последнее время появился особенный интерес к вопросу извлечения из баз данных только той информации, которая действительно очень ценна для обладателя этой базы. Дисциплина, занимающаяся данной задачей, стала известной как Data Mining (Интеллектуальный анализ данных).

### Интеллектуальный анализ данных

Не стоит путать Data Mining с простыми выборками данных из баз данных по некоторым “хитрым” условиям. Data Mining – это, в первую очередь, “обнаружение знаний”, “раскопка данных”, “интеллектуальный анализ”. Data Mining – это процесс обнаружения в “сырых данных” ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации, знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности. Другими словами, сама по себе машинная форма представления данных содержит информацию, необходимую человеку, в скрытом виде, и для ее извлечения нужно использовать специальные методы.

Разные авторы выделяют различные категории методов интеллектуального анализа и связанные с ними типы закономерностей, которые можно выявлять. Так, к примеру, российский ученый Дюк В.А. выделяет следующие пять категорий: ассоциация, последовательность,

классификация, кластеризация, прогнозирование [1]. При этом во многих зарубежных работах можно встретить иное представление об основных категориях, среди которых, наряду с классификацией и кластеризацией, присутствуют моделирование зависимостей, обнаружение изменений и т.д. [2].

Data Mining является мультидисциплинарной областью, возникшей и развивающейся на базе достижений прикладной статистики, распознавания образов, методов искусственного интеллекта, теории баз данных и др. Из-за этого и используется множество различных методов и алгоритмов, реализованных в различных действующих системах Data Mining. Некоторые наиболее используемые методы и подходы кратко рассмотрены в настоящей работе.

Интерес к интеллектуальному анализу данных у исследователей и практиков, с различным уровнем подготовки, неуклонно возрастает с каждым годом. Этот рост обусловлен следующим рядом причин:

1. Интеллектуальный анализ данных, на сегодняшний день, играет фундаментальную роль в анализе и обработке огромного количества накопленной информации. Способность обрабатывать большие массивы данных и извлекать из них соответствующие знания стала ценным преимуществом для большинства организаций, которые работают в условиях жесткой глобализации и конкурентной бизнес арены.
2. Постоянно улучшаются методы и инструменты, которые разрабатываются в этой области.
3. Математические методы извлечения данных используются во многих областях. По существу, сфера применения Data Mining ничем не ограничена – она везде, где имеются какие-либо данные [1].

### **Процесс обнаружения знаний**

Интеллектуальный анализ данных это, прежде всего, процесс, цель которого – обнаружение знаний. Он используется в том случае, когда данных слишком много, или же они слишком сложны для анализа “вручную”, либо с помощью простых запросов. Интеллектуальный анализ данных состоит из двух основных этапов – предварительной обработки данных и построения моделей.

Предварительная обработка данных часто является трудоемким, но критически важным первым шагом. В зависимости от типа добываемых данных, этап предварительной обработки может включать в себя несколько подзадач. Если исходные данные слишком велики, то можно разделить входную выборку на части и работать с меньшим числом исследуемых объектов. С другой стороны, в определенных случаях, можно применить к данным методы кратномасштабного анализа и работать с данными “более низкого разрешения”. Далее, насколько возможно, удаляется шум из данных, путем исключения из выборки “зашумленных” параметров (признаков) исследуемых объектов. В некоторых случаях может потребоваться слияние данных по некоторым признакам. В итоге получается вектор признаков для каждого исследуемого элемента данных. После получения таких векторов, в зависимости от задачи и природы данных, возможна необходимость повторного сокращения количества признаков. Это делается путем ручного исключения не сильно значимых признаков, и\или при помощи методов снижения размерности, таких как, к примеру, метод главных компонент или его линейные и нелинейные аналоги. После этой предобработки, данные готовы для построения моделей с использованием алгоритмов классификации, кластеризации, регрессии и т.д. Полученные модели необходимо проверить на правдивость. Таким образом, следует заключить, что Data Mining – это пошаговый и интерактивный процесс [3].

Окончательная оценка ценности добытого знания выходит за рамки анализа, автоматизи-

рованного или традиционного, и может быть проведена только после реализации решения, принятого на основе полученного знания, и проверки нового знания практикой. Исследование полученных результатов завершает оценку ценности добытого средствами Data Mining нового знания.

### **Техника GPGPU**

Как уже отмечалось ранее, вне зависимости от предметной области, объемы данных имеют тенденцию экспоненциально возрастать. Более того, сегодня все чаще и чаще появляются прикладные вычислительные задачи, которые не разрешимы стандартными средствами центрального процессора отдельного персонального компьютера, по крайней мере, за разумное время. Это могут быть классические задачи биоинформатики, медицины, астрофизики и т.д. Data Mining исследования не являются исключением, вне зависимости от сферы их применения. Именно поэтому, вместе с тем, как наборы данных продолжают расти в размерах, использование высокопроизводительных, масштабируемых, параллельных и распределенных вычислений становится крайне важным в задачах интеллектуального анализа данных. На сегодняшний день существует множество способов и техник организации таких вычислений. Одной из таких техник является General-purpose computing on graphics processing units, или, сокращенно, GPGPU. Ее уже начинали применять, как для ускорения выполнения вышеупомянутых классических задач биоинформатики, медицины, астрофизики и многих других, так и для ускорения отдельных Data Mining алгоритмов [4]. Тем не менее, в силу новизны данной техники, а также в силу сложности написания программ с ее применением, конечных программных продуктов с использованием GPGPU на данный момент, фактически и нет.

### **Общее описание техники GPGPU**

Начиная с 2003 года, активные исследования ведутся в области использования современных графических процессорных устройств GPU для решения вычислительных задач. В настоящее время графические процессорные устройства используются для решения ряда вычислительных задач, таких как матричные операции, решение уравнений в частных производных при помощи сеточных методов, решение задач машинного зрения, обработки изображений и звука, в том числе преобразования Фурье, и многих других, для которых традиционно использовались суперкомпьютерные архитектуры. При грамотном использовании ресурсов графического процессора удастся добиться прироста реальной производительности во много раз по сравнению с использованием ресурсов только центрального процессора. На некоторых задачах достигается реальная производительность в сотни ГФлопс, которая до недавнего времени была доступна лишь на компьютерных кластерах и суперкомпьютерах [5]. Продаваемые сейчас процессоры предназначены для обычных приложений, и они используют MIMD (Multiple Instruction Multiple Date) – множественный поток команд и множественный поток данных. К этому классу относятся практически все современные многопроцессорные системы. Каждое ядро работает отдельно от остальных, исполняя различные инструкции для разных процессов.

Специализированные векторные возможности (SSE2 и SSE3) для четырехкомпонентных (одинарная точность вычислений с плавающей точкой) и двухкомпонентных (двойная точность) векторов появились в универсальных процессорах, из-за возросших требований графических приложений. Именно поэтому для решения определенных задач применение графических процессоров GPU выгоднее, ведь они изначально сделаны для них.

Самое главное – несколько ядер мультипроцессора в GPU являются SIMD ядрами (оди-

ночный поток команд, множество потоков данных). И эти ядра исполняют одни и те же инструкции одновременно. Такой стиль программирования является обычным для графических алгоритмов и решения многих научных задач, но требует специфического программирования. Однако такой подход позволяет увеличить количество исполнительных блоков за счёт их упрощения.

Итак, перечислим основные различия между архитектурами центрального CPU и графического GPU процессоров. Ядра CPU созданы для исполнения одного потока последовательных инструкций с максимальной производительностью, а GPU проектируются для быстрого исполнения большого числа параллельно выполняемых потоков инструкций. Универсальные процессоры оптимизированы для достижения высокой производительности единственного потока команд, обрабатывающего и целые числа, и числа с плавающей точкой.

Разработчики CPU стараются добиться выполнения как можно большего числа инструкций параллельно, для увеличения производительности. Но у параллельного выполнения последовательного потока инструкций есть определённые базовые ограничения, и увеличением количества исполнительных блоков кратного повышения скорости не добиться.

У видеочипов работа простая и распараллеленная изначально. Видеочип принимает на входе группу полигонов, проводит все необходимые операции, и на выходе выдаёт пиксели. Обработка полигонов и пикселей независима, их можно обрабатывать параллельно, отдельно друг от друга. Поэтому из-за изначально параллельной организации работы в GPU используется большое количество исполнительных блоков, которые легко загрузить, в отличие от последовательного потока инструкций для CPU. Кроме того, современные GPU также могут исполнять больше одной инструкции за такт (dual issue).

GPU отличается от CPU и по принципам доступа к памяти. В GPU он связанный и легко предсказуемый – если из памяти читается текстель текстуры, то через некоторое время придёт время и для соседних текстелей. При записи происходит то же самое – пиксель записывается во фрейм-буфер, и через несколько тактов будет записываться пиксель, расположенный рядом с ним. Поэтому организация памяти отличается от той, что используется в CPU. Примечательно, что и сама по себе работа с памятью у GPU и CPU несколько отличается.

В универсальных процессорах большие количества транзисторов и площадь чипа идут на буферы команд, аппаратное предсказание ветвления и огромные объёмы начиповой кэш памяти. Все эти аппаратные блоки нужны для ускорения исполнения немногочисленных потоков команд. В видеочипах используются транзисторы на массивы исполнительных блоков, управляющие потоками модули, разделяемую память небольшого объёма и контроллеры памяти на несколько каналов. Вышеперечисленное не ускоряет выполнение отдельных потоков, но позволяет чипу обрабатывать несколько тысяч потоков, одновременно исполняющихся чипом и требующих высокой пропускной способности памяти [6].

### **Использование GPU для ускорения вычислений в алгоритмах интеллектуального анализа данных**

Все сказанное можно перефразировать следующим образом: если решение вычислительной задачи хорошо подходит для обеспечения параллелизма на уровне данных, то оно применимо и для вычислений на GPU. Примечательно, что в алгоритмах интеллектуального анализа встречается множество задач, решение которых позволяет обеспечить параллелизм на уровне данных.

В методе главных компонент необходимым шагом является спектральное разложение ис-

ходной матрицы с данными. Такое разложение заключается в представлении квадратной матрицы в виде произведения трёх матриц:

- векторов исходной матрицы;
- диагональной матрицы с соответствующими собственными значениями на главной диагонали;
- матрицы, обратной исходной матрице.

Любой из возможных последовательных алгоритмов нахождения всех (или нескольких первых) собственных значений симметричной матрицы является вычислительно сложной процедурой. Однако решение данной задачи хорошо подходит для выполнения через множество параллельных программных процессов.

Неметрический подход многомерного шкалирования является многоэтапной итерационной процедурой. На одном из этапов каждой из итераций необходимо ранжировать по возрастанию элементы симметричной матрицы. Сортировка элементов посредством GPU, при огромном их количестве, гораздо эффективнее сортировки средствами CPU:

- в методе Naïve Bayes можно параллельно рассчитывать вероятности;
- в алгоритме Apriori можно параллельно определять поддержки множеств;
- в кластерном анализе можно параллельно производить пересчет расстояний между группами кластеров.

### Заключение

В рамках данной работы было проведено исследование методов и алгоритмов интеллектуального анализа данных. Была выявлена проблематика, присутствующая в этом направлении – большие объемы анализируемых данных. Кроме того, было предложено решение – использование технологии GPGPU для организации многопоточных вычислений в Data Mining задачах.

### Библиографический список

1. **Дюк, В.** Data Mining: Учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – Спб.: Питер, 2001. – 368с.: ил. CD-ROM.
2. **Kantardzic, M.** Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms / M. Kantardzic. – Hoboken: John Willey & Sons, 2003. – 304 p.
3. **Abbass, H. A.** Data Mining: A Heuristic Approach / H. A. Abbass, R. A. Sarker, C. S. Newton. – Hershey: Idea Group Publishing, 2002. – 310 p.
4. NVidia GPU applications: Data Mining, Analytics, and Databases // NVidia [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: [http://www.nvidia.com/object/data\\_mining\\_analytics\\_database.html](http://www.nvidia.com/object/data_mining_analytics_database.html) (дата обращения 05.01.2020).
5. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии: Сборник научных трудов / под ред. Вл. В. Воеводина и Е. Е. Тыртышниковой. – М: Издательство Московского Университета, 2008. – 320 с.
6. **Полетаев, С. А.** Параллельные вычисления на графических процессорах / Технологии Microsoft в теории и практике программирования / С. А. Полетаев. – Томск: изд-во ТПУ, 2009. – 31 с.

**D.A. Krotov<sup>1</sup>, Y.A. Skudnyakov<sup>2</sup>**

**APPLICATION OF GPGPU TECHNOLOGY FOR INTELLIGENT  
ANALYZING BIG DATA SETS**

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>2</sup>

In this paper we discuss various data mining techniques. The main features of data mining methods are described. The GPGPU mining technique which significantly accelerates data processing is considered.

**Keywords:** Big Data, Data Mining, GPGPU technique.

## ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Брянский государственный технический университет, Брянск

В статье рассмотрен процесс управления процессом формирования индивидуальных образовательных траекторий на основе интеллектуального анализа текстовых данных. Предложена структура программного комплекса, позволяющего сократить время, затрачиваемое преподавателем на решение задачи формирования индивидуальных образовательной траектории. Приведены примеры, как методы обработки текстовых данных могут помочь в составлении “портрета студента”. Продемонстрирован пример работы автоматизированной системы для анализа текстовых данных на примере задачи, связанной с анализом тематики предыдущих работ студента.

**Ключевые слова:** компетентностный подход, обработка естественного языка, интеллектуальный анализ данных, программное обеспечение.

### Введение

Стремительная цифровизация социально-экономической сферы жизни, наблюдаемая в последние годы, ставит перед обществом новые вызовы. Одним из которых является постоянное устаревание получаемых практических знаний и навыков. Для решения проблемы подготовки конкурентоспособных кадров ВУЗам необходимо решать ряд вопросов, связанных с задачей управления образовательным процессом - как с актуализированием программ высшего образования, так и с решением задачи переподготовки и дополнительного образования для уже работающих специалистов. Всё это требует большого объёма работы людей, занятых в управлении образовательным процессом, преподавателей и методистов. Высокие темпы изменения рынка труда формируют спрос не только на новые теоретические знания, но также конкретные навыки и компетенции специалистов [1]. Это, помимо прочего, привело к внедрению в России компетентностного подхода [2], например, на его основе разработан действующий федеральный государственный образовательный стандарт.

На волне общей гуманизации и увеличения внимания к каждой конкретной личности обучающегося, повышается интерес к методикам построения персонализированному, адаптированному под учащегося процессу обучения. Подобных персонализированный подход позволяет улучшить освоение учащимся необходимых компетенций.

Помимо непосредственно педагогических методологий управления адаптивным обучением на основе компетентностного подхода (предложенных, например, в работах были предложены в работах И. Д. Столбова, Л. Р. Фионовой), большой интерес в последние годы привлекают автоматизированные методы построения процесса адаптивного обучения, так как это позволяет снизить нагрузку на управленцев различных уровней.

Чаще всего под понятием “адаптивного обучения” понимается именно **электронная** образовательная система, которая изменяет представление материала в ответ на успеваемость учащихся. Лучшие в своем классе системы собирают подробные данные и используют ин-



теллектуальный анализ, чтобы обеспечить наилучшее освоение компетенций учащимися. Соответствующие системы управления обучением (LMS) обеспечивают комплексное администрирование, документирование, отслеживание и отчетность о ходе работы, а также управление индивидуальной учебной траекторией учащегося - персонального пути реализации личностного потенциала каждого ученика в образовании. [3]

Однако поскольку часть образовательной программы высшей школы представляют из себя предметы по выбору, технологии адаптивного обучения применимы также и к этой части “традиционного” обучения. В соответствии с новым законом об образовании, в РФ устанавливается возможность применения сетевой формы реализации вузовских образовательных программ с возможностью использования ресурсов сторонних организаций посредством разработки и реализации совместных образовательных программ и учебных планов. [4] Список подобных модулей необходимо формировать исходя из запросов рынка, предсказывая тенденции, технологии и программное обеспечение, активно используемое при выполнении той или иной профессиональной деятельности.

Кроме того, существует ряд работ, которые рассматривают адаптивные подходы при построении индивидуальных образовательных траекторий при реализации, так называемого, смешанного обучения - образовательный подход, который совмещает обучение с участием учителя (лицом к лицу) и онлайн-обучение. [5]

В данной статье рассмотрено, как последние достижения в области информационных технологий и интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка могут способствовать реализации систем персонализированного обучения в рамках российской высшей школы.

### **Концепция адаптивного обучения**

Адаптивное обучение не является новой идеей в образовательной науке, его история уходит своими корнями в когнитивную психологию, начиная с работы бихевиориста Б.Ф. Скиннера в 1950-х годах и заканчивая движением искусственного интеллекта 1970-х годов. В настоящее время прогрессивные поставщики онлайн-обучения внедряют технологии, которые когда-то ограничивались лишь теоретическими исследованиями или были применены в сфере коммерции, включая технологии, которые увеличивают интерес пользователей к определенным товарам, предсказывают предпочтения, и выстраивают дальновидные стратегии управления. Как проверенный метод создания «модели пользователя» он используется во многих различных средах, в том числе для более эффективного преподавания и обучения.

Достижения в реализации платформ адаптивных систем обучения, с их циклами обратной связи, используются при смешанном обучении для большей персонализации. Способность учащихся отслеживать свое собственное обучение означает, что они могут развить ценные навыки самоконтроля и участвовать в своем личном процессе обучения.

Кроме того, собираемые в электронной системе данные могут также помочь и преподавателю в составлении индивидуальной траектории учащегося, составить “портрет учащегося”. Но, если речь идет о больших студенческих группах, преподавателю, в силу ограниченного времени, сложно удерживать в памяти все предыдущие успехи и неудачи каждого из студентов. Решением данной проблемы может стать разработка программного комплекса, которая будет помогать преподавателю в принятии решений по выбору индивидуальной образовательной траектории для каждого студента. Постоянное сохранение прогресса студента и динамический анализ собранных данных позволяет анализ не только прогнозировать действия

пользователя, но и создавать “модель обучаемого”, с помощью которой далее выстраивать индивидуальную образовательную траекторию. Принцип работы подобного программного комплекса представлен на рис. 1.

В данном программном комплексе преподаватель сможет: контролировать подключение внешних и внутренних источников данных, проверять их корректность и релевантность решаемой задаче, настраивать предобработку данных, запускать анализ этих данных для задач формирования индивидуальных образовательных траекторий и получать отчет. Кроме того, важной частью данного процесса является его повторяемость во времени.

Возвращаясь к вопросу составления индивидуальных учебных траекторий и формированию списка предметов по выбору (вариантов выполнения лабораторных работ, темы курсовой и т.д.), то первым этапом в выполнении данной работы может быть анализ рынка труда. Более того, анализ рынка труда необходимо выполнять постоянно, т.к. динамика рынка труда постоянно увеличивается. В исследовании рекрутинговой компании Antal 27% работодателей заявили, что текучесть персонала за прошедший год в их компаниях выросла. [6] Также увеличились темпы появления новых профессий и специализаций.

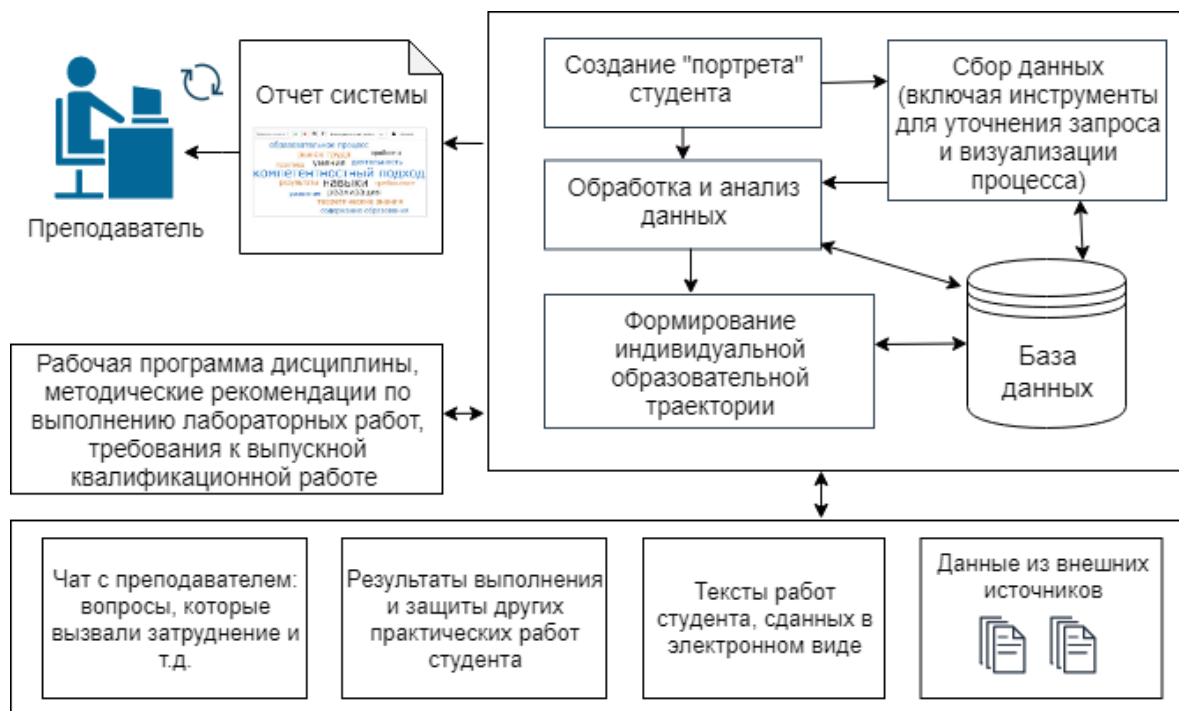


Рисунок 1. Общая схема работы автоматизированной системы

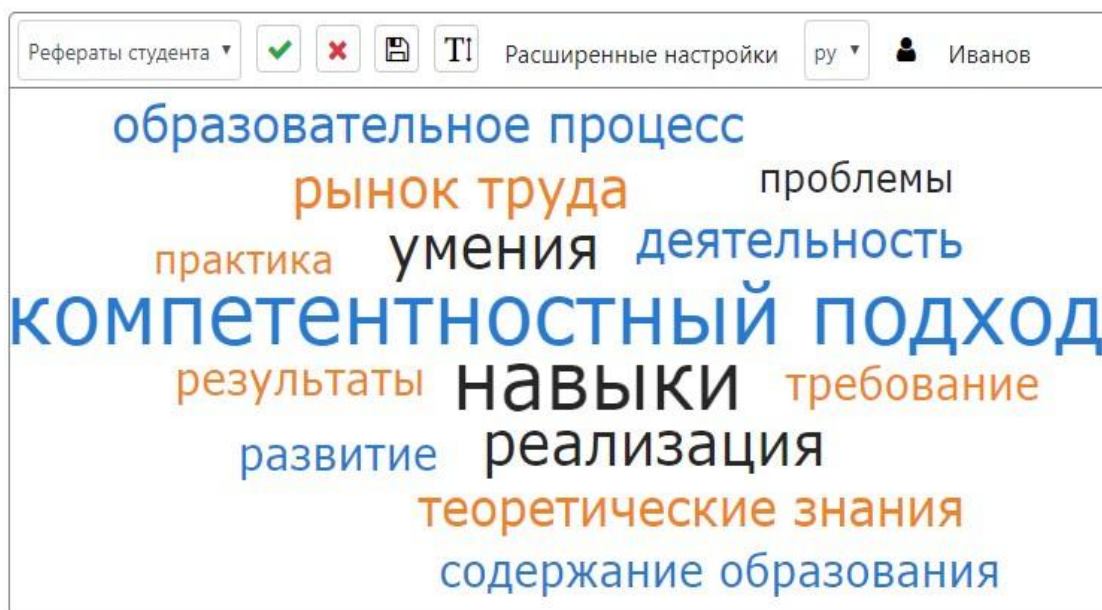
### Анализ текста для построения индивидуальных образовательных траекторий

В то же время, технологии глубокого обучения продвинули область автоматизированной обработки естественного языка далеко вперед. Готовые инструменты для обработки естественного языка уже сейчас возможно применять для анализа вакансий, размещенных на различных сайтах. Например, касательно вакансий в области информационных технологий, можно выделить ключевые языки программирования и технологии, используемые в реальном производстве, и на основе повышения или снижения популярности тех или иных технологий принимать решения о включении их в образовательные траектории.

Но выбор предметов по выбору - это лишь первая ступень построения индивидуальной образовательной траектории. В структуре каждой дисциплины также присутствует возмож-

ность персонализации: индивидуальные темы лабораторных и курсовых работ, выбор темы для написания выпускной квалификационной работы и т.д. Все эти этапы индивидуальной образовательной траектории возможно персонализировать под учащегося, используя накопленные ранее данные: склонности и интересы, темы, вызвавшие наибольшее затруднение, темы, повторение которых необходимо в данный момент и т.д.

В качестве источников этих данных могут выступать как структурированные источники: оценки (зачеты) по отдельным модулям учебных дисциплин, ответы на тесты и т.д., так и слабоструктурированные данные. Примерам таких данных могут выступать: работы учащегося, сданные им в электронном виде, ответы на вопросы со свободной формой решения, чат с преподавателем (если он доступен в образовательной онлайн-системе). Из данных источников с помощью современных инструментов обработки языка возможно извлечь множество полезных данных, которые дадут новую информацию для принятия решения. Так как итоговое решение принимает преподаватель, а программный комплекс может лишь “советовать”, необходимо создание пользовательских интерфейсов, которые позволят эффективно демонстрировать данные, обработанные в системе. В предыдущих работах авторами был рассмотрен метод эффективного представления больших массивов данных из открытых источников, которые позволяют сократить время работы аналитика. [7] На рис. 2 представлен программный модуль, реализующий данный метод на примере предыдущих работ студента на темы, связанные с компетентностным подходом в образовании.



**Рисунок 2. Пример визуализации вида «облако слов», построенная на ключевых словах, извлеченных из работы студента**

Кроме того, достижения в области семантического (смыслового) анализа текстов позволяют программному комплексу находить интересные студенту темы из имеющегося списка вариантов для выполнения лабораторных и курсовых работ. Или же, в случае, если какой-то модуль вызвал ранее у студента затруднения, можно быстро найти тему индивидуальной работы, которая будет наиболее близка к пройденной теме. Проведенные ранее эксперименты показали, что наилучший результат для подобных задач показывают методы, построенные на векторном представлении слов [8].

## Заключение

Разработка индивидуальных образовательных траекторий позволяет лучше раскрыть потенциал обучаемого. При этом использование моделей интеллектуального анализа данных позволяет снизить нагрузку на преподавателя, учесть большое количество параметров и получение и обработку данных из различных источников. Кроме того, использование моделей обработки текстовых данных позволяет оперировать не только структурированными данными, но также визуализировать большие массивы неструктурированных данных для преподавателя, извлекать из них полезные знания и, за счёт этого, повысить точность моделей анализа и составления индивидуальных образовательных траекторий. Разработка программного обеспечения моделей для сбора, обработки и анализа текстовых данных позволяет добавить новые данные в процесс принятия управленческих решений, в том числе в сфере образования.

Развитие данных подходов и методологий может помочь ускорить процесс разработки персонализированных программ обучения и улучшить освоение компетенций каждым отдельно взятым студентом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00844.*

## Библиографический список

1. **Акрам, Ш. М.** Автоматизированная информационная система адаптивного обучения на основе компетентностного подхода: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.25.05 / Ш. М. Акрам; - Ростов-на-Дону, 2014.- 182 с.
2. **Дубова, М.В.** Компетентностный подход среди современных педагогических подходов в системе общего образования / М.В. Дубова – Интеграция образования. 2010. № 1.
3. **Вайнштейн, Ю.В.,** Адаптивная модель построения индивидуальных образовательных траекторий при реализации смешанного обучения /Ю.В.Вайнштейн, Р.В.Есин, Г.М. Цибульский – Информатика и образование. 2017. № 2. С. 83-86
4. Федеральный закон РФ от 29 декабря 2012 г (ред. от 03.07.2016) N 273 ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»(с изм. и доп., вступающими в силу с 01.09.2016).
5. **Вдовина, С. А.** Сущность и направления реализации индивидуальной образовательной траектории /С. А.Вдовина , И. М. Кунгурова– Интернет-журнал Науковедение. 2013 г.
6. За прошедший год текучесть персонала в компаниях увеличилась // Электронный ресурс – URL:<https://antlrussia.ru/news/staff-turnover-2018/>
7. **Макарова, Е. А.** Подходы к визуализации больших массивов текстовых данных на этапе их сбора и предобработки (2019) / – Е. А.Макарова, Д.Г.Лагерев,Ф. Ю.Лозбинев – Научная визуализация 2019, №4, С. 13-26. DOI: 10.26583/sv.11.4.02
8. **Макарова, Е. А.** Оценка семантической ценности текстовой информации для разработки управленческих решений /Е. А. Макарова, Д. Г.Лагерев, А.А. Захарова // Междунар. конф. СРТ2019 (13-17 мая 2019 г., ЦарьГрад, Моск. обл.). – Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ и НИЦФТИ, 2019. – С. 356-360.

**E.A. Makarova, D.G. Lagerev**

**APPLICATION OF THE AUTOMATED SYSTEM OF INTELLECTUAL ANALYSIS  
OF TEXT DATA FOR MANAGING THE PROCESS OF FORMING  
INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORIES**

Bryansk state technical university

This paper discusses the process of controlling the formation of individual educational trajectories based on the intellectual analysis of text data. The structure of the software complex is proposed, which allows to obtain the necessary time to solve the problems of forming an educated trajectory. Examples are given as methods of processing text data can help in compiling a "portrait of a student." An example of the operation of an automated system for analyzing text data is demonstrated using the example of a task related to the analysis of the topics of previous student work.

**Key words:** competency-based approach, natural language processing, data mining, software.

## МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассмотрен вариант построения системы технического обслуживания и текущего ремонта «по состоянию». В результате анализа предложено ввести на всех этапах технического обслуживания и текущего ремонта использование информационных технологий, в частности использование баз данных и баз знаний. Проведен анализ моделей представления знаний и предлагается смешанное использование сетей фреймов и правил продукций.

**Ключевые слова:** радиотехническое средство, система технического обслуживания и текущего ремонта, информационная система, база знаний, фреймовая модель, семантическая сеть, продукционная модель.

### Введение

В процессе эксплуатации требуемый уровень готовности радиотехнических средств (РТС) обеспечивается качественным проведением технического обслуживания и текущего ремонта. Под техническим обслуживанием [1] понимается комплекс мероприятий или операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, хранении и транспортировании. Текущий ремонт РТС [1] – это комплекс операций по восстановлению его работоспособности и состоящий в замене и (или) восстановлении отдельных частей.

Система технического обслуживания и текущего ремонта (ТО и ТР) представляет собой совокупность взаимосвязанных сил и средств, документации технического обслуживания и текущего ремонта, необходимых для поддержания и восстановления эксплуатационно-технических характеристик РТС на требуемом уровне.

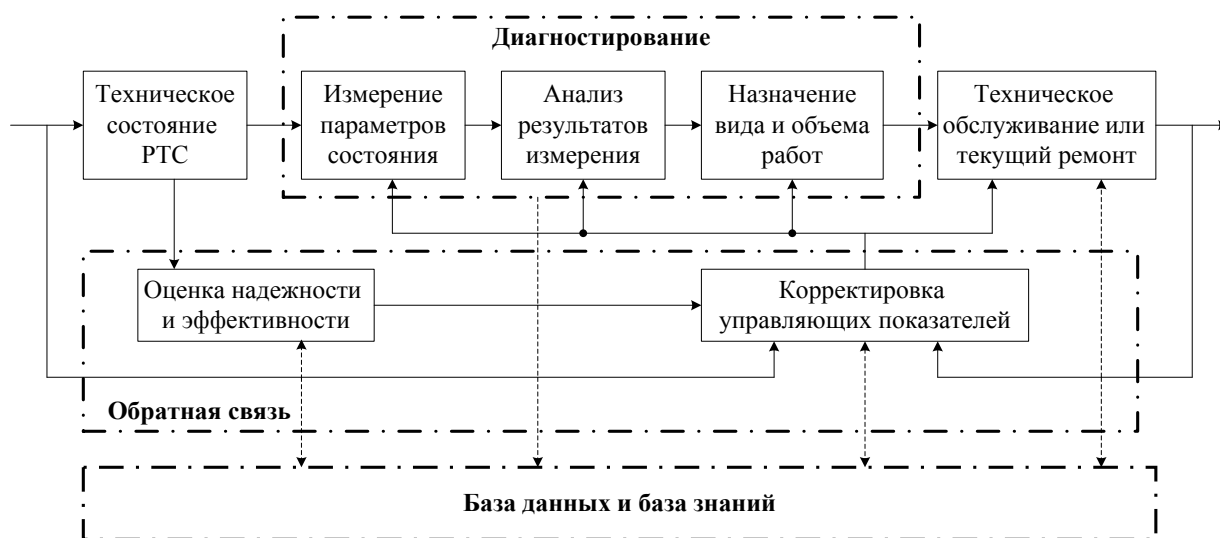
При этом классическая система технического обслуживания и текущего ремонта, базирующаяся на календарном и регламентном принципах планирования, является крайне ресурсоемкой и не учитывает тенденции снижения надёжных характеристик РТС в сложившихся условиях, для которых характерными являются: значительная выработка ресурса РТС, некомплект штатного квалифицированного обслуживающего персонала и недостаточное обеспечение необходимыми материальными ресурсами.

### Теоретический анализ

Одним из возможных путей снижения ресурсоемкости рассматриваемой системы является переход к обслуживанию техники по ее техническому состоянию. Работа по созданию системы ТО и ТР «по состоянию» ведется в направлении развития новых технологий контроля и диагностирования в связи со все более широким применением интеллектуальных средств измерения и обработки диагностической информации на базе программных комплексов.

Исследование процесса управления техническим состоянием РТС позволяет определить роль и необходимость использования информации для принятия решения. В общем случае

управление техническим состоянием конкретного образца включает измерение параметров состояния ее составных частей, сравнение установленных значений с допускаемыми или предельными величинами, определение остаточного ресурса составных частей, назначение вида и объема обслуживающих воздействий и выполнение всех установленных работ по ТО и его составных частей. В результате предложено ввести на всех этапах использование информационных технологий, в частности использование баз данных и баз знаний, что отражено на рис. 1.



**Рисунок 1. Схема управления техническим состоянием радиотехнических средств**

Для повышения эффективности использования РТС, снижения затрат при их функционировании назрела необходимость в решении проблемы совершенствования методов ТО и ТР путем разработки и внедрения информационных систем (ИС) поддержки принятия решений при обслуживании техники.

Эффективность ИС зависит от ее структуры (количество и состав автоматизированных рабочих мест, перечень решаемых задач, используемые технические средства и т.д.), а применение ИС увеличивает эффективность работы инженерно-технического состава (ИТС).

Необходимость внедрения информационных систем и использования современных информационных технологий при совершенствовании системы ТО и ТР связано со следующими аспектами:

- во-первых, происходит усложнение конструкций оборудования РТС, что находит свое отражение в соответствующих потоках информации;
- во-вторых, в связи с ростом стоимости и рассредоточения информации по многочисленным РТС, недоступностью значительной доли информации для использования в системах диагностирования, обслуживания и прогнозирования неисправностей, необходима концентрация информации в специализированных информационных базах.

Создание новой информационной среды на базе компьютерных сетей и интернета требует ее наполнения базы знаний, экспертными и советующими системами, способными функционировать в качестве общедоступных и обеспечивать расширение информационного сервиса.

Полнота базы знаний (БЗ) будет определять в значительной степени функциональные возможности системы ТО и ТР и оптимальность решений в планировании мероприятий технической эксплуатации. Создание БЗ составляет наиболее трудоемкую часть работ.

При формировании БЗ ИС важно выбрать модель представления знаний, среди которых можно выделить следующие основные классы [2]:

- фреймовые модели;
- модели семантические сети;
- продукционные модели;
- формальные логические модели.

Фреймовая модель – модель представления знаний, введенная М. Минским в 1975 году [3], как один из подходов к описанию знаний, пригодных для понимания сцен и языка. Основной единицей информации является фрейм. Он описывается совокупностью понятий и данных.

Каждый фрейм имеет имя и определенную структуру на множестве слов, которые в свою очередь имеют свою внутреннюю структуру. Фрейм может быть представлен как список некоторых свойств, задаваемых в слотах, и связанных с отдельными слотами присоединенных процедур. Структура слота имеет следующий вид (рис. 2).

Имя фрейма			
Имя слота	Значение слота	Способ получения значения	Присоединенная процедура

**Рисунок 2. Структура фрейма**

В первых двух столбцах определяют имя и его значение. В качестве значения может выступать имя другого фрейма, в этом случае образуется сети фреймов. Два последних столбца описывают способ получения знания и наименование присоединенной к ней процедуры. Организация вывода во фреймовой модели основывается на обмене сообщениями между фреймами и запуске присоединенных процедур.

Достоинство системы, использующей фреймы, заключается в том, что те элементы, которые традиционно присутствуют в описании устройства или события, группируются и, благодаря этому, могут извлекаться и обрабатываться как единое целое. Ценность этого свойства фреймов в том, что предметная область диагностики аппаратуры РТС (пространство поиска решений) факторизуема и это позволяет эффективно организовать поиск в этой области. Другое важное свойство фреймов – возможность представления значений слотов другими фреймами. Это позволяет связать множество фреймов в единую информационно-поисковую сеть. В случае, когда предложенный фрейм не удастся привести в соответствие с создавшейся ситуацией, то есть для его терминалов не удастся найти значений, удовлетворяющих условиям маркеров терминалов, то эта сеть предлагает заменяющий его фрейм. Так осуществляется поиск во фреймовых структурах.

Но у фреймовой структуры имеется существенный недостаток. В задачах, где имеется существенная неопределенность при реализации диагностических процедур, приходится обрабатывать большое количество данных, что приводит к непродуктивному использованию памяти и быстродействия ЭВМ. Кроме того, необходимо реализовать знания, позволяющие управлять изменением технического состояния РТС. Знания такого типа являются трудно формализуемыми и слабоструктурированными, содержат много информации о специфике предметной области.

Семантические сети ввел Квилян в 1968 году для исследования искусственного интеллекта как образ описания человеческой памяти. Понимание смысла с помощью семантиче-



ских сетей позволяет выйти за пределы возможностей программного обеспечения обычных интеллектуальных систем. В моделях семантической сети знания предметной области описываются в виде ориентированного графа. Вершинам ставятся в соответствие конкретные объекты предметной области, а дугами – семантические отношения (связи) между ними. Характерной особенностью моделей семантической сети является наличие трех классов [2]: класс (элемент класса), свойство (значение) и пример элемента класса.

На рис. 3 приведен пример фрагмента семантической сети.

Проблема поиска решения на базе данной модели представления знаний сводится к задаче поиска подсети, отражающий поставленный запрос к базе знаний. Таким образом, недостатком данной модели является сложность вывода на семантической сети.



**Рисунок 3. Пример фрагмента семантической сети**

В интеллектуальных системах существуют также логические модели представления знаний, когда предметная область описывается в виде набора аксиом. Однако данная модель в системах, занимающихся вопросами эксплуатации РТС, практически не встречаются в связи с высокими требованиями и ограничениями в предметной области.

Наиболее широкое применение получили продукционные модели представления знаний. Основоположителем представления знаний в виде продукционных правил является Э. Посту [4, 5].

В общем случае знания представляются в виде правил, которые имеют следующий вид

«ЕСЛИ<перечень условий>ТО<множество действий>»,

где ЕСЛИ и ТО – ключевые слова продукционного правила.

Левая часть правил называется антецедентом (посылка), а правая – консеквентом (заключение). Если антецедент является истинным, то следует выполнить консеквент. Условия и множество действий могут описываться логическими выражениями с применением операторов «И», «ИЛИ», и «НЕ».

Продукционные модели обладают следующими преимуществами:

- значительная часть человеческих знаний можно представить в виде продукций;
- простота построения и применения;
- высокая интерпретируемость;
- наличие развитых механизмов логического вывода.

Поэтому в рамках данного исследования предлагается смешанное использование сетей фреймов и правил продукций.

Условиями при решении задач диагностики могут быть внешние признаки проявления отказа, а действие означает выдвигаемую гипотезу о месте отказа, то есть о конкретной иерархической единице. КО – коэффициент определенности правила, показывающий степень уверенности СППР в данном правиле. При решении задач технического обслуживания в качестве условий может выступать текущая и прогнозная информация о контролируемых параметрах, а действие будет заключаться в выдаче рекомендаций о проведении регулировочных работ. В таком представлении сети фреймов обеспечивают структурирование знаний и группирование продукционных правил по ситуациям.

### **Выводы**

Таким образом, при использовании в базе знаний смешанных форм представления знаний, которые могут позволить реализовать несколько условий и действий, дает возможность интерпретатору (блоку логического вывода) анализировать правила и оперировать данными на различных уровнях в зависимости от конкретно решаемой задачи. Множество описательных слотов позволяют использовать фреймы более высокого уровня для связи и управления, а также накапливать информацию о порядке применения каких либо правил.

### **Библиографический список**

1. ГОСТ 28.001-83. Система технического обслуживания и ремонта. М.: Изд-во стандартов. 1983.
2. **Гаврилова, Т.А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т.В. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. 384 с.
3. **Минский, М.** Фреймы для представления знаний: Пер. с англ. / Под ред. Ф.М. Кулакова. – М.: Энергия, 1979. – 342 с.
4. **Попов, Э.В.** Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ / Э.В. Попов. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
5. **Таунсенд, К.** Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 170 с.

**I. S. Nazmutdinov, E. P. Kaydash**

### **KNOWLEDGE BASE REPRESENTATION MODELS FOR MANAGING THE TECHNICAL STATE OF RADIO EQUIPMENT**

Military Educational and Scientific Center of the Air Force  
«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article considers a variant of building a system of maintenance and current repairs "as of". As a result of the analysis, it is proposed to introduce the use of information technologies at all stages of maintenance and current repairs, in particular the use of databases and knowledge bases. The analysis of knowledge representation models is carried out and the mixed use of networks frames and production rules is proposed

**Keywords:** radio engineering tool, maintenance and maintenance system, information system, knowledge base, frame model, semantic network, production model.

А.А. Бойтяков

## АСПЕКТЫ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА КОНВЕРТАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В РАЗНОРОДНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Разработана модель конвертации параметров между разнородными автоматизированными системами с использованием фреймов для анализа основных типовых сценариев взаимодействия на примере САД- и PDM-систем. От корректного взаимодействия разнородных автоматизированных систем, результативности руководства работами на стадии проектирования, введения в общую структуру единого информационного пространства зависит конкурентоспособность производственных предприятий.

**Ключевые слова:** геометрическая модель, формат передачи данных, конвертация параметров, САД-система, PDM-система, фрейм.

### Введение

При постоянном усложнении инженерно-технических проектов, а также планов по разработке новой продукции, имеют конкурентоспособное преимущество те производственные предприятия, на которых хорошо отлажен процесс проектирования, производства, поставки и сопровождения изделия. В случае необходимости выхода нового продукта предприятие должно за определенный срок разработать и поставить продукт на рынок.

В процессе передачи данных в рамках крупных холдингов, между предприятиями при реализации технологий поддержки жизненного цикла изделий наблюдается переход к созданию единого информационного пространства (ЕИП). Переход к ЕИП является важной задачей для организаций и предприятий, что позволяет более быстро и эффективно управлять деятельностью сотрудников и принимать решения. Достаточно часто бывают распространенными состояния, когда часть учреждений, организаций автоматизированы только частично, на некоторых отдельных стадиях жизненного цикла изделий. В таких случаях часто применяются самые разные программные комплексы. Могут применяться разные вендоры для них на производственных предприятиях в рамках разных стадий жизненного цикла, а также часто на предприятиях бывает несколько поставщиков программного обеспечения в качестве систем разнородных автоматизированных систем. Форматы программных комплексов на предприятиях и различных крупных холдингах часто не совместимы, это может дойти до такой ситуации, при которой потребуются дополнительные временные затраты и персонал при реализации информационной поддержки жизненного цикла (рис.1). Предприятия и организации постепенно переходят на полную поддержку жизненного цикла с целью оптимизации временных затрат.

Существуют проблемы при использовании программных пакетов, средств, комплексов различных вендоров, имеющих свои форматы при сохранении геометрических моделей (ГМ). Такие форматы могут быть закрытыми. Потери при передаче данных между автоматизированными системами с несовместимыми форматами может привести к затратам на восстановление, важно это учитывать при передаче параметров между крупными холдингами.



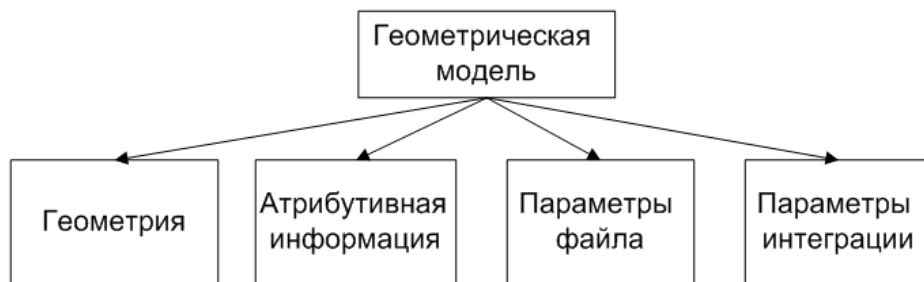
**Рисунок 1. Информационная поддержка этапов жизненного цикла изделий**

### **Возможные варианты поддержки конвертации геометрических моделей**

В состав разнородных систем автоматизации входят системы автоматизированного проектирования (САД-системы), системы управления данными об изделии (PDM-системы). Как показывает практика, на отечественных предприятиях применяется несколько САД-систем [1] под управлением PDM-систем, переход к единой автоматизированной системе затруднен в связи с большим объемом конструкторских данных и специализированных особенностей данных автоматизированных систем. От качества интеграции САД и PDM-систем [2] в общую структуру единого информационного пространства зависит конкурентоспособность предприятий. Отличительной особенностью функционирования становится широкое использование геометрических моделей (ГМ) на этапах жизненного цикла, высокая трудоемкость процесса конвертации ГМ в среде разнородных автоматизированных систем в случае использования разных вендоров, возможные потери параметров ГМ могут негативным образом отразиться при разработке и эксплуатации изделий.

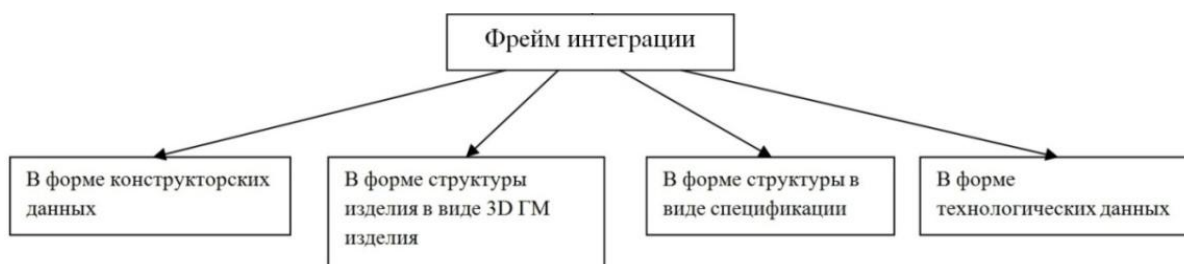
Разнородные автоматизированные системы дают возможность проводить необходимые расчеты при подготовке модели изделия в системах автоматизированного проектирования через данные, хранящиеся в системах управления данными об изделии. Имеется множество решений, автоматизирующих отдельные аспекты по конвертации в разнородных автоматизированных системах, которые разработаны для конкретных вендоров. Это говорит об отсутствии общего подхода к процессам интеграции разнородных автоматизированных систем. Однако разработаны специализированные нейтральные форматы для передачи параметров между разнородными автоматизированными системами, это STEP, IGES и др. При применении нейтральных форматов возможны потери во время передачи данных между разнородными системами автоматизации. Требуется определить, с помощью каких средств провести поддержку передачи данных между разнородными автоматизированными системами в нейтральных форматах.

В настоящее время непростым и затратным по ресурсам является процесс конвертации ГМ между разнородными автоматизированными системами. Это связано с тем, что ГМ состоит из нескольких групп параметров (рис.2). Одно из предполагаемых решений данного вопроса представляет введение машинно-независимой модели конвертации данных между разнородными автоматизированными системами, предназначенной для оценки конвертации ГМ, в том числе с применением метрик.



**Рисунок 2. Составляющие пространства параметров ГМ**

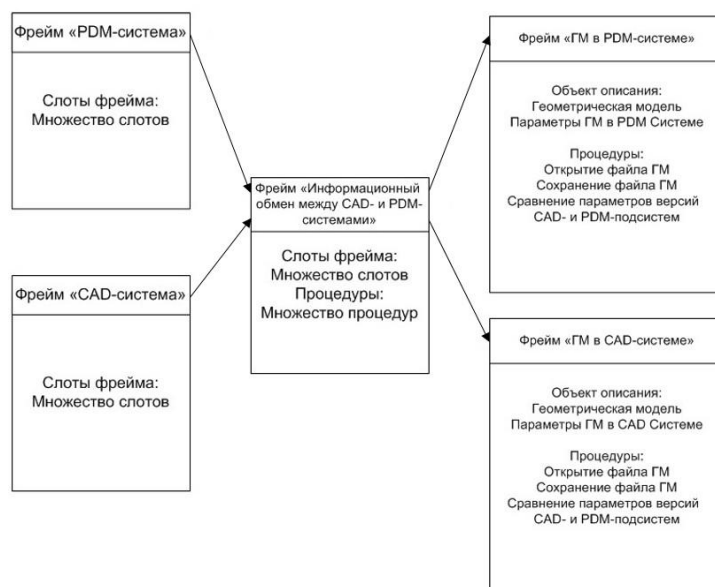
Одной из целей введения специализированной машинно-независимой модели конвертации ГМ представляется формализация процесса конвертации параметров между разнородными автоматизированными системами с учетом особенностей функционирования. Для достижения поставленной цели предполагается применение алгоритмов и принципов интеллектуализации посредством введения аппарата фреймовых сетей. Для оценки эффективности конвертации предлагается расширение фреймовой классификации в части введения алгоритмов интеграции разнородных автоматизированных систем (рис.3). Применяется для анализа основных сценариев конвертации разнородных автоматизированных систем (рис.4).



**Рисунок 3. Расширенная классификация М. Минского**

На основании данной модели имеется возможность построить метрики эффективности конвертации параметров между разнородными автоматизированными системами, предназначенные для оценки качества конвертации ГМ. Для реализации метрики разработан программный комплекс поддержки конвертации геометрических моделей. Программный комплекс позволяет производить автоматизированный расчет функционально-ориентированных, размерно-ориентированных метрик, метрик оценки эффективности конвертации параметров ГМ при взаимодействии разнородных автоматизированных систем.

Расчет оценки конвертации ГМ [3,4] содержит: определение данных структуры ГМ по классам сложности и выявление данных на основании иерархической структуры параметров ГМ; получение значений абсолютного объема каждого параметра по всему классу на основании сведений по файлам нейтральных форматов; получение данных по объему потерь конвертации геометрической модели из разнородной автоматизированной системы А в систему В в формате С. Данный расчет включает параметры интеграции разнородных автоматизированных систем. С помощью экспертных оценок (метод непосредственных оценок), получены сведения от специалистов по работе с программными комплексами разных вендоров.



**Рисунок 4. Обмен данными между разнородными автоматизированными системами  
Поддержка конвертации ГМ на основании оценки**

Средняя оценка (вес) каждого параметра получается на основании математико-статистического метода [5]:

$$a_i^3 = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad (1)$$

где  $a_i^3$  – вес параметра данных  $i$  иерархической структуры ГМ, на основании всех оценок;  $a_{ij}$  – вес параметра данных  $i$  иерархической структуры ГМ, который дал эксперт  $j$ ,  $n$  – количество параметров,  $m$  – количество экспертов.

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – вес параметра  $i$  иерархической структуры ГМ, данный экспертом  $j$ ;  $x_{ij}$  – оценка параметра  $i$  иерархической структуры ГМ, данная экспертом  $j$ ;  $n$  – количество параметров.

В результате проведен сбор тестовых данных, проведены проверки, числовые значения получены с помощью расчета оценки конвертации данных с применением метрики

$$a_i^{3c} = \frac{a_i^3}{a_i^c \sum_{i=1}^n \frac{a_i^3}{a_i^c}}, \quad (3)$$

где  $a_i^{3c}$  – весовой коэффициент параметра  $i$  иерархической структуры ГМ, который содержит данные о сложности восстановления данных и специализированные принципы структуры графа ГМ;  $a_i^3$  – весовой коэффициент иерархической структуры ГМ, отражающий только данные от экспертов;  $a_i^c$  – весовой коэффициент для иерархической структуры ГМ, отражающий только особенности структуры, представленной в виде графа ГМ.

В результате проведенных исследований по конвертации данных между различными разнородными автоматизированными системами была проверена возможность оценки потерь параметров ГМ, возможность оценки сложности восстановления ГМ на основании экспертного мнения и с учетом особенностей структуры ГМ. Рассмотрены форматы STEP, IGES, JT, получены значения по оценке конвертации данных, потери будут более высокими при использовании IGES.

## Заключение

На основании проведенного исследования процесса передачи ГМ при взаимодействии разнородных автоматизированных систем выявлено отсутствие обобщенной машинно-независимой модели передачи данных. Предложен вариант обобщенной модели конвертации данных с использованием фреймов. Предложен метод поддержки конвертации ГМ на основании значений оценки конвертации параметров ГМ на примере взаимодействия САД- и PDM- систем.

## Библиографический список

1. **Райкин, Л.И.** Информационный обмен между САД-системами / Л.И. Райкин [ и др.] // Доклады конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» САД/САМ/PDM – 2016. Труды XVI-ой международной молодёжной конференции. С. 377-379.
2. **О. Shilolitsky.** How to re-invent САД / PDM integration? / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://beyondplm.com/2014/05/19/how-to-re-invent-cad-pdm-integration/> (дата обращения: 15.01.2020).
3. **Филинских, А.Д.** Анализ передачи параметрической и графической информации на основе экспериментальных данных / А.Д. Филинских, А.Х. Бяшеров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 164-166.
4. **Филинских, А.Д.** Функционально-ориентированная оценка передачи и восстановления геометрических моделей / А.Д. Филинских, Л.И. Райкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. №4. С. 176-179.
5. **Бешелев, С.Д.** Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. - М.: Статистика, 1980. 263 с.

**Boytyakov A.A.**

## ASPECTS SUPPORTING THE PROCESS OF CONVERTING GEOMETRIC MODEL IN DISSIMILAR AUTOMATED SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The paper contains the design of a conversion model using frames between dissimilar automated systems. The model is designed for the analysis of basic typical interaction scenarios between САД and PDM systems. Industrial enterprises competitiveness depends heavily on the qualitative interaction between САД and PDM systems, the efficiency of work management at the design stage, and their successful integration into the common information space structure.

**Key words:** geometrical model, data transfer format, converting parameters, САД system, PDM system, frame.

М.Б. Волков

## ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ КЛАССИФИКАЦИИ ИНТОНАЦИЙ НА ОСНОВЕ ИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

**Предметная область:** Нейросетевое распознавание речи.

**Цель работы:** Исследовать возможность нейросетевого распознавания интонационных конструкций фраз, произнесенных на русском языке.

**Постановка проблемы:** Каждая фраза содержит в своем составе данные о ее интонационной конструкции. Причем доля этих данных незначительна по сравнению с полной информацией, содержащейся во фразе. Необходимо локализовать эти данные об интонации и на их основе провести обучение нейронной сети.

**Метод:** Первоначально локализация данных об интонации осуществлялась на основе анализа различных характеристик аутентичных фраз, имеющих сопоставимую длительность, сходную структуру и относящихся к одной интонационной конструкции. Для группы фраз, принадлежащих к одной интонации, отыскивались общие признаки, а для группы фраз, принадлежащих к разным интонационным конструкциям, - отличия. В дальнейшем локализация продолжалась при подготовке данных для обучения и в процессе обучения нейронной сети.

**Результат:** Выявлены закономерности для частотных характеристик типовых интонационных конструкций фраз. Разработан алгоритм подготовки исходных данных для обучения нейронной сети классификации интонаций. Алгоритм учитывает закономерности для частотных характеристик интонационных конструкций и уменьшает первоначальную размерность вектора входных данных до количества, равного числу нейронов во входном слое сети. На основе аутентичных данных проведено обучение нейронной сети классификации интонаций в рамках процедуры «победитель получает все».

**Сфера применения:** Полученные результаты можно использовать для контроля в системах обучения русскому языку иностранцев, для выполнения вспомогательных функций в системах распознавания и синтеза речи.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, интонация фразы, интонационная конструкция, частотная характеристика интонации, уменьшение размерности данных, обучение нейронной сети, нейросетевая классификация интонаций.

### Введение

Решаемая в работе задача относится к активно развиваемому в настоящее время направлению – обработке речевых сигналов [1]. В качестве инструмента используем нейросетевые технологии, изучаемые бакалаврами университета уже в течение ряда лет [2,3]. Область возможного применения нейросетевой классификации интонаций может оказаться достаточно широкой. Можно использовать, например, для контроля в системах обучения русскому языку иностранцев, для выполнения вспомогательных функций в системах распознавания и синтеза речи.



## **Интонационные конструкции и акустические характеристики интонации**

Вопросы интонации русского языка с лингвистической точки зрения к настоящему времени достаточно глубоко проработаны, с получением практических результатов и многолетнего опыта их применения при обучении русскому языку иностранцев [4]. В работе [5] приведена для русского языка фонетическая классификация фраз по интонациям. Построены модели интонаций, названные в работе интонационными конструкциями (ИК). Каждая модель состоит из трех частей - центральной, содержащей логическое ударение, предцентровой и постцентровой. Для каждой из трех частей введено пространство состояний, имеющее очевидную математическую интерпретацию для ее уровня - постоянный, высокий, низкий, растущий, падающий, резко падающий, резко растущий, растущий и падающий, растущий и сразу же резко падающий. Смена интонации всегда происходит лишь в центральной части фразы. Вид модели определяется по совокупности состояний всех трех ее частей. На основании этих параметров для каждого вида модели построена ее графическая интерпретация, позволяющая однозначно отличать одну модель от другой. Подобный подход соответствует пониманию интонации фразы в узком смысле слова лишь как изменение тона и совпадает с понятием мелодики. Следует отметить, что именно эта модель и получила широкое практическое применение.

Наряду с этим для описания интонации применяются как чисто фонетические характеристики, например, с оценочной окраской, с экспрессивной оценкой, гортанная смычка, так и характеристики фразы в целом, например, интонация завершенности с отсутствием смыслового противопоставления или сопоставления, специальный вопрос, повествование, общий вопрос, сопоставительный вопрос, восклицание [5]. Подобное описание, понятное с фонетической точки зрения и построения фразы, уже не позволяет получить соответствующую ему относительно простую математическую или графическую интерпретацию как в случае мелодики. Учет кроме параметров мелодики одновременно и приведенных выше характеристик соответствует уже, с точки зрения лингвистики, пониманию интонации в широком смысле слова.

Акустика [6] и цифровая обработка речевых сигналов [1] определяют интонацию как изменение частоты основного тона. Частота основного тона фразы может меняться от 70 до 450 Гц в зависимости от ударения, выделения отдельных звуков и слов, проявления эмоций. Импульсы основного тона имеют пилообразную форму с эквидистантным спектром. Огибающая спектра основного тона имеет спад в сторону высоких частот с крутизной порядка 6дБ на октаву. Огибающая спектра, ее временное изменение и изменение основного тона содержат основную часть информации речевого сообщения [1, 6].

### **Частотные характеристики интонационных конструкций**

В качестве исходных данных для выявления характерных признаков каждой ИК должен использоваться аудио файл, размерность которого определяется соответствующей ему фразой, принадлежащий к одной из интонаций. Этот исходный файл должен содержать в интегрированном виде чисто информационную составляющую фразы (текст сообщения), его ИК, эмоциональную составляющую фразы, аутентичные фонетические данные говорящего, шумы, данные о паузах, громкости и т.п. При этом информация об интонации составляет незначительную часть среди всех данных исходного файла.

В результате выявления признаков интонации должны получить новый файл с числовыми данными, содержащими в качестве доминанты информацию об ИК фразы. Наряду с данны-

ми об интонации в файле может содержаться и сопутствующая избыточная информация, которая в дальнейшем должна быть отфильтрована процедурой обучения нейронной сети.

Для выявления признаков интонации должны быть решены две задачи. Первая - выявить сходство в экземплярах, принадлежащих одной ИК, и наличие отличий между данными из разных интонационных конструкций. Вторая - существенно уменьшить размерность данных исходного файла. При этом необходимо перейти от размерности данных, соответствующих аудиоматериалу к размерности, равной числу входов нейронной сети.

Для решения первой задачи необходима графическая интерпретация, как исходных данных, так и данных, полученных в процессе преобразования, что позволит визуально выявить сходство и отличия в экземплярах в зависимости от принадлежности к той или иной ИК. Вторая задача решается эвристически, при этом необходимо сохранить найденные признаки интонации и отбросить сопутствующую избыточную информацию, не относящуюся к ним. Отметим, что решение второй задачи также требует наличие графической интерпретации обрабатываемых данных.

Для выявления закономерностей в пределах одной ИК использовали наборы аутентично произнесенных фраз. В каждом наборе фразы обладали сопоставимой длительностью и относились к одному виду интонационной модели. Графическую интерпретацию и необходимую обработку фраз осуществляли в звуковом редакторе Audacity 2.5.

Таблица 1

Осциллограммы трех разных фраз, относящихся к первой ИК

Номер экземпляра	Осциллограмма экземпляра
1	
2	
3	

Применение во временной области осциллограмм фраз без привязки их к соответствующему им тексту, без деления их на три части и без сравнения состояния каждой из частей с ее ожидаемым поведением, определяемым структурой ИК, не позволило визуально выявить сходство среди сравниваемых экземпляров, имеющих первую интонационную модель, (табл.1). Аналогичная ситуация наблюдалась и для других интонаций. В рамках принятых выше условий работа с осциллограммами во временной области положительных результатов не дала.

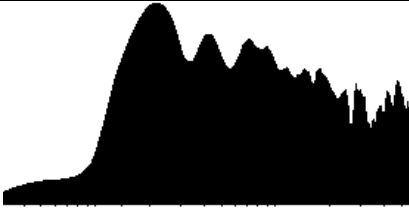
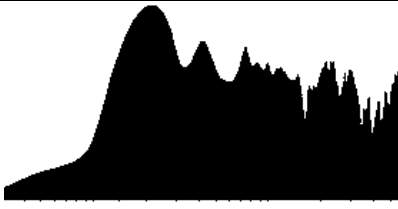
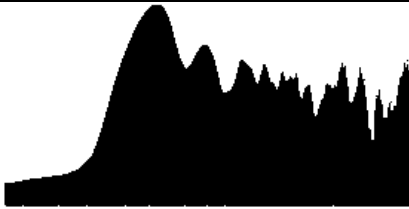
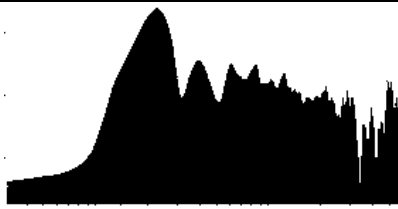
Для построения спектральных характеристик аудиозаписей использовали преобразование Фурье [1] с частотным диапазоном, содержащим весь диапазон речи, и включающим как основную частоту тона, так и частоты его гармоник.

Амплитудный спектр сигнала, построенный на линейной шкале частот, охватывал равномерно весь частотный диапазон. При этом представляющая наибольший интерес низкочас-

тотная часть спектра (от 70 до 450 Гц) занимала незначительную часть графика и не позволяла визуально обнаружить закономерности, присущие каждой ИК.

Таблица 2







Частотные характеристики четырех разных фраз, имеющих первую ИК

Номер экземпляра	Частотная характеристика экземпляра	Номер экземпляра	Частотная характеристика экземпляра
1		2	
3		4	

При построении спектра в логарифмическом масштабе диапазон изменения частоты основного тона занимал уже значительную часть графика, что позволило визуально констатировать сходство в зависимостях для разных экземпляров, принадлежащих одной модели интонации. Так, например, для всех 4-х экземпляров первой ИК характерен для амплитуды спектра переход от плавного к резкому подъему в области частот от 100 до 200 Гц с последующим немонотонным спадом (табл.2).

Таблица 3

Частотные характеристики интонационных конструкций

Вид ИК	Частотная характеристика	Вид ИК	Частотная характеристика	Вид ИК	Частотная характеристика
И К-1		ИК -2		И К-3	
И К-4		ИК -5		И К-6	

### Формирование исходных данных и обучение нейронной сети

Для оставшихся моделей интонаций аналогично провели визуальное сравнение спектральных зависимостей экземпляров, входящих в каждый набор. Это позволило выявить ха-

ракетные признаки спектров еще для пяти ИК в диапазоне частот до 1000 Гц. При этом наблюдаются и характерные отличия, присущие каждой интонации (табл.3).

При формировании библиотеки данных для обучения нейронной сети использовали 80 аутентичных записей для каждой из шести ИК с максимальной частотой спектра 1000 Гц. Для проверки обученной сети применяли неаутентичные данные.

Подготовка входных данных для нейронной сети начиналась с формирования с помощью микрофона wav-файла. В звуковом редакторе Audacity 2.5 проводили нормировку сигнала, удаляли шум, вырезали тишину, переходили на основе преобразование Фурье к спектру с диапазоном до 8000 Гц. С помощью скрипта на C++ вырезали фрагмент, соответствующий частотному диапазону до 1000 Гц. В Matlab проводили интерполяцию и восстанавливали значения спектра с шагом в 100 Гц.

В качестве эталонных данных формировали целочисленный вектор с размерностью равной 6. Одно из чисел, соответствующее номеру ИК, подаваемому на вход в данной обучаемой паре, имело всегда значение 1, а все остальные пять - 0. Подобная модель позволяла, используя процедуру «победитель получает все», правильно принимать решение при значительном отклонении выходного значения от эталонного и одновременно оценивать степень приближения выходного значения к эталонному результату.

Объединяли входные и эталонные данные, используемые при обучении и тестировании сети, в txt файл для последующего импорта в нейронную сеть.

Обучение нейронной сети проводили в пакете NeuroShell. В качестве модели взяли многослойный персептрон с двумя скрытыми слоями. Распределение нейронов по слоям 11 – на входе, 22 – на скрытых слоях и 6 - на выходе. В качестве функции активации взяли гиперболический тангенс.

## Выводы

Полученные для входного экзаменационного набора значения на выходе нейронной сети показали результативность обучения при использовании процедуры «победитель получает все». Это подтверждает возможность применения частотных характеристик ИК для решения задач классификации интонаций с помощью нейронных сетей.

Наблюдаемое при обучении несоответствие между эталонными и реальными значениями на выходе сети говорит о сильной «зашумленности» входных данных, от которой полностью избавиться в процессе обучения не удалось. Для оптимизации результатов обучения управляли значениями некоторых параметров нейронной сети: числом нейронов в скрытых слоях, моментом обучения, скоростью обучения, видом и параметрами функции активации, числом эпох. Использовали автоматическую запись наилучшего результата для весовых коэффициентов. Все это позволило несколько уменьшить отклонения на выходе от эталонов.

Экспериментальная проверка основных изложенных ранее положений проводилась бакалавром Шывыревой А.П., при выполнении ею выпускной квалификационной работы под моим руководством.

## Библиографический список

1. **Ахмад, Х.М.** Введение в цифровую обработку речевых сигналов: учеб. пособие / Х.М. Ахмад, В.Ф. Жирков; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 192 с.
2. **Волков, М.Б.** Искусственные нейронные сети в курсе «Представление знаний в ин-

формационных системах» // Инновационные технологии современного учебного процесса: стратегия, задачи, внедрение: Материалы Всерос. науч.-метод. конф., г. Н. Новгород, 29 апреля 2009 г. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. - Н. Новгород, 2009. - С. 87-89.

3. **Волков, М.Б.** Применение искусственных нейронных сетей для обработки данных // Инновационные технологии в образовательной деятельности: Материалы Всерос. науч.-метод. конф., г. Н. Новгород, 5 февраля 2014 г. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. - Н. Новгород, 2014. - С.317-319.

4. **Брызгунова, Е.А.** Практическая фонетика и интонация русского языка: пособие для преподавателей / Е.А. Брызгунова – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. – 307 с.

5. **Брызгунова, Е.А.** Звуки и интонация русской речи / Е.А. Брызгунова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Русский язык, 1977. – 300 с.

6. Акустика: справочник / А.П. Ефимов, А.Н. Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров; под ред. А.М. Сапожкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 336с.

**M.B Volkov**

## **TRAINING OF A NEURAL NETWORK FOR CLASSIFICATION OF INTONATIONS BASED ON THEIR FREQUENCY CHARACTERISTICS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.A. Alekseev

**Subject area:** Neural network speech recognition.

**Purpose of work:** Explore the possibility of neural network recognition of intonational constructions of spoken language Russian phrases.

**Problem statement:** Each phrase contains data about its intonational construction. Moreover, the proportion of this data is insignificant in comparison with the complete phrase information. It is necessary to localize such intonation data and based on them perform training of the neural network.

**Method:** Initially, localization of intonation data was done based on the analysis of various characteristics of authentic phrases that have a comparable duration, a similar structure and pertain to the one intonational construction. For a group of phrases from the same intonation found common attributes, but for different intonational constructions found distinctions. Subsequently, localization continued during the preparation of data for a training and during neural network training itself.

**Outcome:** The regularities for the frequency characteristics of typical intonational constructions of phrases are revealed. An algorithm of initial data preparation for neural network training for classifying intonations has been developed. The algorithm considers the regularities for frequency characteristics of intonational constructions and reduces the initial dimension of the input data vector to an amount equals to the number of neurons in the input neural network layer. Based on authentic data trained neural network of classification intonations within the "winner takes it all" procedure.

**Application area:** The results obtained can be used to control foreigners in Russian language teaching systems, to perform auxiliary functions in the systems of recognition and synthesis of the speech.

**Keywords:** neural network, phrase intonation, intonational construction, frequency response of intonation, data dimension reduction, neural network training, neural network classification of intonations.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫМИ ДАННЫМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Статья посвящена проблеме выбора системы управления базами данных (СУБД) для работы с гетерогенными данными. Проводится сравнительный анализ основных технических характеристик СУБД, предназначенных для работы с гетерогенными данными. Описываются общие требования к современной СУБД. Обращается внимание на альтернативные NoSQL-системы. Рассматриваются перспективы их применения.

**Ключевые слова:** гетерогенные данные, базы данных, модель данных, системы управления базами данных, NoSQL СУБД.

## Введение

На сегодняшний день ни одна крупномасштабная разработка в области информационных систем и технологий не обходится без использования баз данных. Полноценные информационные системы нередко используют полуструктурированные или неструктурированные данные. Они присутствуют в геоинформационных, транспортных, любых корпоративных системах и др. Ярким примером управления такими данными служат PDM-системы[1], которые могут выступать в двух основных ролях:

- как рабочая среда сотрудника предприятия;
- как средство интеграции данных на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Для интеграции гетерогенных, данных важен выбор логики архитектуры системы и системы управления данными.

На рис. 1. представлена диаграмма развертывания web-приложения[2]. Сервер баз данных (БД), который обеспечивает их хранение, реализуется средствами системы управления базой данных (СУБД). Подключение к этому компоненту возможно только с уровня сервера приложений, обеспечивающего организацию взаимодействия клиентов и сервера БД. Сервер приложений (web-сервер) – связующий слой, на нем сосредоточена большая часть бизнес-логики. Слой клиента – это интерфейсный компонент комплекса, предоставляемый конечному пользователю через web-браузер.

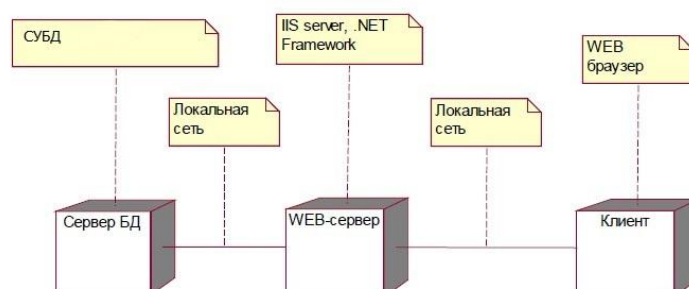


Рисунок 1. Диаграмма развертывания web-приложения

Опыт разработки системы взаимодействия клиентов и сервера БД приведен в [3], что говорит об актуальности выбранного подхода.

Для проектирования подобной системы данных актуален выбор СУБД, целью которой и является настоящий обзор.

### Обзор существующих решений

Сначала обратимся к отечественным разработкам.

Российские производители СУБД находятся в сложном положении, поскольку разработки устоявшихся брендов крупных компаний и корпораций вытесняют с рынка российские системы. Отечественные СУБД «держатся» за счет внедрения в государственные структуры. В табл. 1 приведен сравнительный анализ российских СУБД.

Таблица 1

Сравнение отечественных СУБД

Критерий сравнения \ БД	PostgreSQL	«Заря»	«Линтер Бас-тион»	«Ред База Данных»	HyTech
Открытость кода	Открытый	Закрытый	Закрытый	Открытый	Не удалось найти информацию
Лицензия	Свободное и открытое программное обеспечение, разрешительная лицензия	Не удалось найти информацию	Коммерческая	GNU GPL	Не удалось найти информацию
Поддержка определенных аппаратных платформ	x64, x86, IBM Power, System Z, ARM	x64, x86, IBM Power, System Z	x64, x86, IBM Power, System Z, ARM	x64, x86	x64, x86
Реализация стандартов SQL	SQL2011	SQL2008	SQL:2003	SQL:2003	SQL:2003
Поддержка и возможность управления транзакциями	полноценная транзакционная модель, удовлетворяющая требованиям ACID (англ. atomicity, consistency, isolation, durability – «атомарность, согласованность, изоляция, долговечность хранения»)	полноценная транзакционная модель, удовлетворяющая требованиям ACID (англ. atomicity, consistency, isolation, durability – «атомарность, согласованность, изоляция, долговечность хранения»)	полноценная транзакционная модель, удовлетворяющая требованиям ACID (англ. atomicity, consistency, isolation, durability – «атомарность, согласованность, изоляция, долговечность хранения»);	полноценная транзакционная модель, удовлетворяющая требованиям ACID (англ. atomicity, consistency, isolation, durability – «атомарность, согласованность, изоляция, долговечность хранения»)	полноценная транзакционная модель, удовлетворяющая требованиям ACID (англ. atomicity, consistency, isolation, durability – «атомарность, согласованность, изоляция, долговечность хранения»);

			отсутствие механизмов двухфазной фиксации транзакций		невозможность управлять режимами изоляции транзакций;  отсутствие механизмов двухфазной фиксации транзакций
Документация	русскоязычная	русскоязычная	русскоязычная	русскоязычная	русскоязычная

В [4] говорится о СУБД, которые потенциально можно использовать и которые используются в качестве платформы для создания автоматизированных систем специального назначения:

— PostgreSQL из состава операционной системы Astra Linux Special Edition 1.4 разработки АО «НПО «РусБИТех»;

— «Заря» от АО «ЦНИИ ЭИСУ», созданная на базе открытой СУБД PostgreSQL. Работает под управлением ОС «Заря» и ОС «Заря-ЦОД»;

— «Линтер Бастион» разработки ЗАО НПП «РЕЛЭКС». Работает под управлением ОС МСВС;

— «Ред База Данных» компании «Ред Софт», созданная на базе открытой СУБД Firebird. Работает под управлением ОС Windows, семейство Linux, BSD Unix и др.;

— НуТех компании «Открытые информационные технологии». Работает под управлением ОС Windows, Linux.

Для работы с гетерогенными данными необходимо отказаться от рассмотрения СУБД НуТех, так как она не позволяет управлять режимами изоляции транзакций, что снижает возможности системы при оптимизации производительности. Также необходимо отметить отсутствие в СУБД «Линтер Бастион» и НуТех механизмов двухфазной фиксации транзакций, что затрудняет построение гетерогенных систем или реализацию транзакционного взаимодействия с внешними системами.

Из анализа механизмов индексирования (можно говорить о сравнении скорости поиска данных) и методов кластеризации[5]вытекает, что самыми «сильными» из отечественных СУБДявляются PostgreSQL и «Заря».

В России большим опытом использования обладает СУБД PostgreSQL. Например, она может применяться при создании геоинформационной системы вуза [6].

Работе с этой системой посвящены многие обучающие курсы и видеоуроки, а открытость кода позволяет постоянно модернизировать и систему. Но, к сожалению, функционал отечественной разработки сильно уступает западным.

### **NoSQL – новое решение для работы с гетерогенными данными**

До этого речь шла о реляционных СУБД. Эта модель хранения данных с середины 90-х годов фактически являются стандартом для СУБД[7]. Разработчики отходили от этого стандарта почти исключительно при проектировании собственных баз данных под отдельные высоконагруженные проекты. Примерно с 2006 года ситуация начала меняться, стали появлять-



ся серийные решения, не поддерживающие SQL-стандарт. Термин NoSQL получил распространение в 2009 году, он объединяет очень большой набор различных решений в области СУБД. Можно выделить два основных признака конкретной СУБД, наличие которых позволяет отнести ее к классу NoSQL:

1) отсутствие либо частичная поддержка реляционной модели данных. Более того, большинство NoSQL-баз данных просто неструктурированы: в отдельные строки и документы можно добавлять произвольные поля, отсутствующие в соседних строках или документах и т.п.;

2) как следствие первого пункта — внешний интерфейс базы данных полностью (реже частично) не соответствует SQL-стандартам [8]

Разнообразие потока информации различного типа и различной структуры не всегда дает возможность их реализовать в рамках классических реляционных баз данных. Также у систем растут требования к масштабируемости. Постоянно повышать мощность отдельных вычислительных узлов нельзя, т.е. использовать вертикальное масштабирование, экономичнее и надежнее – добавлять новых мощностей к уже существующим. Этим обуславливается высокий интерес научного сообщества к исследованию NoSQL-баз данных.

NoSQL имеют как преимущества, так и недостатки перед реляционными СУБД[9].

#### **Преимущества NoSQL перед реляционными СУБД:**

- Широкий выбор типов хранилищ;
- Хорошая горизонтальная масштабируемость;
- Простота администрирования;
- Отсутствие жестко заданной схемы данных;
- Простой API для манипуляции данными.

#### **Недостатки NoSQL перед реляционными СУБД:**

- Отсутствие единого стандартного языка запросов;
- Большинство NoSQL баз данных не гарантируют выполнение требований ACID, что может повлечь потерю данных при отказе оборудования;
- Отсутствие поддержки целостности данных;
- Простой API для манипуляции данными затрудняет выполнение сложных выборок.

NoSQL жертвуют согласованностью ради доступности и устойчивости к разделению.

#### **Виды NoSQL баз данных**

Выделяют 4 вида NoSQL-баз данных[10]:

1. **Хранилище "ключ-значение"**. Каждый ключ ставится в соответствие значению, в форме произвольных данных. Хранилища пар ключ-значение отличаются простотой их модели запросов, обычно состоящей из примитивов для установки, получения и удаления значений, но не предусматривают возможности добавления простых функций фильтрации на уровне базы данных. Такие БД очень производительны, просты в обращении и легко масштабируются.

**Примеры таких хранилищ:** *Cassandra, Berkeley DB, Memcache DB, Redis, Riak, Amazon-Dynamo DB.*

2. **Хранилище семейств колонок.** Основная идея колоночных СУБД — это хранение данных не по строкам, а по колонкам, что обеспечивает отличную масштабируемость и высокую производительность. Кроме того, при колоночном хранении данных появляется возможность компрессии данных, так как в одной колонке таблицы данные, как правило, однотипные. Недостатком колоночных СУБД является низкая скорость выполнения операций на запись.

*Примеры: HBase, Big Table, Hyper Table.*

3. **Документно-ориентированная СУБД** – компьютерная система, разработанная для хранения, получения и управления документно-ориентированной или слабо структурированной информацией. Документы внутри документно-ориентированных БД некоторым образом похожи на записи или строки в реляционных БД, но являются более гибкими. Документы адресуются в БД посредством уникального ключа (строка, путь к файлу, др.), который представляет конкретный документ. При этом обычно СУБД строят индексы по таким ключам, что делает получение документа из базы весьма быстрым.

*Примеры документно-ориентированных СУБД: MongoDB, IBM Lotus Notes, Couch DB, Oracle NoSQL и др.*

4. **Граф-ориентированная база данных** – база данных, основная модель хранения данных в которой — классический математический граф. Граф состоит из вершин и связей, где вершины представляют собой объекты данных, а связи – отношения между объектами. В последнее время наблюдается бурный рост интереса к графовым БД в связи с тем, что такая система представления данных оказалась естественной и востребованной в современном мире социальных связей (Интернет, социальные сети и т. д.). К достоинствам графовых моделей БД относят не только возможность естественной реализации графовых операций (поиска путей, выделения сообществ и т. п.), но и гибкую схему данных, позволяющую унифицировать хранение разнородных объектов.

*Примеры графовых СУБД: Neo4j, Allegro Graph, Big Data, Infinite Graph.*

Иногда в отдельный вид выделяют объектно-ориентированные БД (ООБД) – БД, в которых данные моделируются в виде объектов, их атрибутов, методов и классов. Объектно-ориентированные системы управления базами данных (ООСУБД) позволяют работать с объектами баз данных так же, как с объектами при программировании на объектно-ориентированном языке программирования. ООСУБД расширяет языки программирования, прозрачно вводя долговременные данные, управление параллелизмом, восстановление данных, ассоциированные запросы и другие возможности. Некоторые объектно-ориентированные базы данных разработаны для плотного взаимодействия с такими объектно-ориентированными языками программирования, как Java, C#, C++, и т.п.; другие имеют свои собственные языки программирования. ООСУБД обычно рекомендуется использовать в тех случаях, когда требуется высокопроизводительная обработка данных, имеющих сложную структуру. *Примерами ООСУБД являются Jasmine, ObjectDB, Caché, Matisse.*

Наиболее популярными базами данных NoSQL являются **MongoDB, CouchBase, Cassandra, Document DB, HBase**. Рассмотрим их достоинства и недостатки.

На основе [11-14] была составлена сравнительная характеристика NoSQL СУБД (табл. 2).

Сравнительная характеристика NoSQL СУБД

Параметры	HBase	Redis	Cassandra	MongoDB
Тип БД	Семейство колонок	«Ключ-значение»	«Ключ-значение»	Документо-ориентированная
Открытость кода	Открытый	Открытый	Открытый	Открытый
Хранение данных	HDFS	Файловая система с энергозависимой памятью	SSD	Файловая система с энергозависимой памятью
Язык запросов	Вызовы API, Rest, XML, Thrift	Вызовы API	Вызовы API, CQL, Thrift	Вызовы API
Соотношение скорости на чтение/запись	Одинаково высокая	Высокая скорость чтения в сравнении со скоростью записи	Низкая скорость чтения в сравнении со скоростью записи	Высокая скорость чтения в сравнении со скоростью записи
Протоколы	HTTP/Rest, Thrift	Telnet-like	Thrift, CQL3	BSON
Поддержка MapReduce	+	-	+	+
Модель целостности	Репликация журнала	-	BASE	BASE
Согласованность	+	+	+	+
Отказоустойчивость	+	+	+	+
Контроль версий	+	-	-	-
Вторичные индексы	+	+	+	+
Составные ключи	+	+	+	+
Горизонтальная масштабируемость	+	+	+	+
Репликации	+	+	+	+

На основе опыта использования MongoDB[15-16] можно сказать, что наиболее подходящим для проектирования web-сервиса с подключенной БД представляется документо-ориентированные базы данных. Для подобных задач использование NoSQL видится наиболее рациональным решением, так как её применение обеспечивает гибкую логику работу с гетерогенными данными. Их же используют для создания аналитических системах типа «клиент-сервер» [17].

### Заключение

В статье были рассмотрены СУБД, их технические характеристики и современные требования к ним. Проведен анализ основных технических характеристик СУБД, предназначенных для работы с гетерогенными данными. Среди отечественных систем была выделена широко распространенная СУБД PostgreSQL, позволяющая строить отказоустойчивые и высокопроизводительные кластеры. Из зарубежных разработок были отмечены нереляционные базы данных, которые открывают большие возможности для работы с разнотипными данными без потерь их целостности и с обеспечением их сохранности.

В перспективе возможна интеграция двух подходов в процессе проектирования ИС специального назначения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. **Филинских, А.Д.** Анализ состояния систем управления проектами на российских предприятиях / Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 162-167.
2. **Попова, Ю.Б.** Автоматизированная система управления обучением CATS / НАУКА и ТЕХНИКА. 2019;18(4). С. 339-349.
3. **Басманова, Ю.И.** Разработка корпоративной информационной системы взаимодействия с пользователями на предприятии госкорпорации «РОСАТОМ»-ФГУП ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седякина / Ю.И. Басманова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 5. – С. 139-143.
4. **Муравьев С.** СУБД: проблема выбора / С. Муравьев [и др.] // Открытые системы. СУБД. – 2015. – № 1. – С. 22–24.
5. **Каганский, М. А.** Основные сертифицированные системы управления базами данных, используемые для создания защищенных автоматизируемых систем. NOSQL и перспективы развития СУБД // Интегрированные системы управления. – 2016. – С. 3-12.
6. **Кособоков, В.С.** Особенности разработки геоинформационной системы вуза с использованием СУБД POSTGRESQL / В.С. Кособоков [и др.] // КОГРАФ-2018: сборник материалов 28-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2018. С. 85-89.
7. **Хоменко, А.Д.** Базы данных: учебник для высших учебных заведений / А.Д. Хоменко [и др.] – СПб.: КОРОНА, 2015. С. 354.
8. **Биктимиров, М.Р.** Тенденции развития технологий обработки больших данных и инструментария хранения разноформатных данных и аналитики / М.Р. Биктимиров [и др.] // Электронные библиотеки. 2016ю Т. 19. №5. С. 390-407.
9. **Leavitt Neal.** Will NoSQL Databases Live Up to Their Promise? // Computer. — 2010. — Vol. 43. — Pp. 12–14.
10. **Sadalage, Pramod J.** NoSQL distilled : a briefguide to the emerging world of polyglot persistence / Pramod J Sadalage, Martin Fowler.
11. **White, T.** Hadoop: The definitive guide // O'Reilly Media, Inc., 2012. -756с.
12. Redis documentation // Redis. -URL: <https://redis.io/documentation>.
13. Cassandra documentation // Apache Cassandra. -URL: <http://cassandra.apache.org/doc/latest/>.
14. MongoDB documentation // MongoDB Docs. -2008. -URL: <https://docs.mongodb.com/manual/introduction/>.
15. **Гордеев, С.Ю.** Разработка веб-приложений с использованием angular. Js, node. Js, MongoDB на примере системы психологической поддержки студентов - участников программы "полет" / С.Ю. Гордеев [и др.] // Наука и образование сегодня. 2017. №2 (13).
16. **Нечкин, П.С.** Использование документно-ориентированной базы данных для проведения анализа логистической поддержки it-инфраструктуры / П.С. Нечкин, И.А. Шмидт // фундаментальные исследования. 2015. № 8-1. с. 132-136.
17. **Мазуркевич, М.В.** Исследование производительности различных СУБД для хранения гетерогенных данных предприятий агропромышленного комплекса / М.В. Мазуркевич, А.Н. Шиков // Успехи современной науки. 2017. Т. 1 № 12. С. 40-45.

**A.D. Filinskikh, E.S. Glumova**

**RESEARCH OF HETEROGENEOUS DATA MANAGEMENT SYSTEMS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article is devoted to the problems of choosing a database management system (DBMS). A comparative analysis of DBMS main technical characteristics designed for working with heterogeneous data is carried out. The general requirements for a modern DBMS are described. Attention is paid to alternative NoSQL-systems. The application prospects are considered.

**Keywords:** heterogeneous data, databases, data model, database management systems, DBMS, NoSQL.

М.М. Шевелева, И.Б. Зарубин, У.И. Гуляева, С.Б. Сорокин, А.М. Лабаев

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УДОБСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САЙТОВ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Разработаны критерии для оценки удобства использования сайтов учебных заведений. На основе данных критериев был разработан опрос, направленный на сбор информации об относительной важности данных критериев. Выработаны рекомендации по разработке сайта для высших учебных заведений.

**Ключевые слова:** удобство использования (Usability), оценка удобства использования, критерии оценки, сайт высших учебных заведений.

В настоящее время сеть Интернет играет все более важную роль с точки зрения оперативного получения актуальной информации – например, для выпускников школ, которые рассматривают различные варианты продолжения образования. При этом полнота информации, удобство использования и корректность работы информационного сайта высшего учебного заведения может играть ключевую роль в получении первого представления об уровне вуза. Кроме того, в статьях 28 и 29 Федерального закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» [1] наличие официального сайта в сети Интернет или другой общедоступной информационной системы (ИС) [2] является обязательным требованием для всех типов образовательных учреждений. В указанных статьях Федерального закона указано, какая информация обязательно должна присутствовать на сайте образовательного учреждения, а также требования к её составу и структуре. Таким образом, перед каждым вузом стоит задача разработки информационного сайта в сети Интернет, который бы соответствовал всем нормам Федерального закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» и при этом был бы информативным, не требовал бы специфических знаний и навыков для работы с ним [3], обладал бы удобным и дружелюбным интерфейсом для взаимодействия с широким кругом пользователей и содержал бы необходимую и актуальную информацию по учебному процессу.

Одним из главных инструментов, помогающих разработать или улучшить ИС вообще и сайт в сети Интернет в частности, является тестирование удобства использования (Usability-testing) [3]. Для оценки корректности функционирования новых элементов интерфейса пользователя существуют достаточно надежные методики [4], оценка же ухудшения удобства использования, несмотря на значительное количество методик [5] регрессионного тестирования [6], представляет собой весьма непростую задачу.

Существует значительное количество методик оценки удобства использования [7], которые могут проводиться на всех этапах жизненного цикла [8] ИС. Данные методики можно условно разделить на три группы:

- 1) методики с привлечением пользователей;
- 2) методики с привлечением экспертов;
- 3) методики с использованием программных инструментов.

В настоящее время существуют исследования, которые позволяют отобрать критерии для оценки удобства использования ИС образовательного учреждения [9-16], однако эти исследования не позволяют оценить важность данных критериев относительно с точки зрения основных пользователей – учащихся.

Задачи проводимого исследования:

- разработать критерии для оценки удобства использования сайтов высших учебных заведений;
- провести опрос среди студентов для оценки важности данных критериев;
- провести анализ полученных результатов;
- проанализировать сайт нгу на основании полученных результатов;
- выработать рекомендации по организации ИС для высших учебных заведений.

В исследовании «Тестирование удобства использования сайта в испаноязычных академических кругах через эвристическую оценку и когнитивные прохождения» [9] для оценки удобства использования академических сайтов были использованы методы эвристической оценки [10] и когнитивного разбора [9]. Был разработан программный инструмент, основанный на эвристической оценке [11], для оценки удобства использования 69 академических сайтов. Эвристическая оценка состояла из 25 вопросов, связанных с четырьмя категориями, такими как дизайн, навигация, содержание и поиск. Оценка проводилась при участии двух экспертов по удобству использования (УИ) и двух студентов с глубоким знанием эвристической оценки. Результаты исследования показали целесообразность применения, как и специализированного программного инструмента, так и метода когнитивного разбора при оценке академических сайтов.

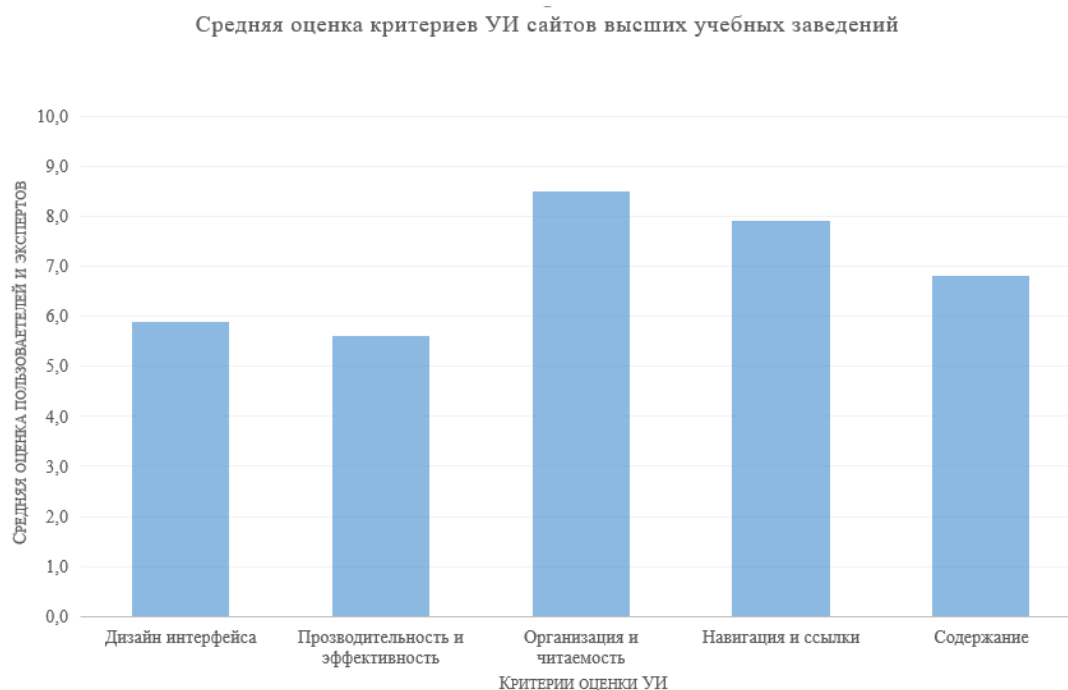
В исследовании «Оценка удобства использования образовательных веб-сайтов с использованием эвристических правил оценки» [12] так же использовали эвристический метод для оценки удобства использования сайта Hellenic Open University. Оценка производилась пятью оценщиками; два из них специалисты по УИ, остальные имели опыт оценки методом эвристики. Для оценки были использованы УИ эвристики, предложенные в исследовании «Эвристическая оценка» [10]. Результаты исследования показали эффективность метода эвристической оценки, который помог выявить проблемы УИ, большинство которых не было обнаружено ранее.

Метод эвристической оценки так же использовался в исследовании «Оценка удобства использования веб-сайта академического отдела маркетинга с точки зрения студента-маркетолога» [13]. Для проведения оценки были использованы адаптированные метрики из раннего исследования [14] и состояли из 5 категорий: содержание, организация и читабельность, навигация и ссылки, дизайн пользовательского интерфейса, производительность и эффективность. Результаты так же показали эффективность использования метода эвристической оценки при оценке УИ сайтов учебных заведений.

В исследованиях «Оценка удобства использования образовательных сайтов» [15] был использован метод анкетирования для оценки УИ образовательного сайта. Участниками опроса являлись пять студентов магистратуры, которые должны были ответить на 49 вопросов, представленных в анкете. Данные вопросы были разделены на семь категорий: визуальная чёткость, навигация, содержание, контроль, обратная связь, ошибки и последовательность.

Исследование «Удобство использования академических веб-сайтов иорданских университетов» [16], похоже на исследование «Оценка удобства использования образовательных сайтов» [15] в том плане что, они так же использовали метод анкетирования для оценки удобства использования сайта образовательного учреждения. Однако, для оценки были использо-

ваны онлайн инструменты (htmltoolbox и webpageanalyze) для измерения внутренних атрибутов сайта, которые не могут быть восприняты пользователями. Анкета включала 23 критерия УИ, которые делятся на пять категорий: содержание, организация и читаемость, навигация и ссылки, производительность и эффективность, дизайн пользовательского интерфейса.



**Средняя оценка критериев УИ сайтов высших учебных заведений**

Исследования показали, что общий уровень УИ исследуемых образовательных сайтов является приемлемым. Тем не менее, были выявлены недостатки в аспектах дизайна интерфейса и производительности. Самые высокие оценки показала категория организация и читаемость, далее следует категория навигация и ссылки. Остальные три категории (содержание, производительность и эффективность, дизайн пользовательского интерфейса) были оценены как «удовлетворительными» (см. рисунок).

Можно заметить, что данные исследования используют методы оценки, основывающиеся на оценке со стороны оценщика (эвристический метод) и со стороны пользователя. Результаты исследований, представленных выше, доказывают эффективность данных методов при оценке сайтов образовательных учреждений, так как они позволяют провести полное исследование сайтов для выявления потенциальных и существующих ошибок

Основными пользователями информационного сайта вуза являются обучающиеся в этом вузе студенты. Необходимо разработать такие критерия оценки удобства использования сайта вуза, которые учитывали бы основные запросы студентов. При этом критерии должны быть универсальными – такими, которые могут быть использованы для сайта любого вуза и, одновременно, учитывали бы требования статей 28 и 29 Федерального закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации».

Критерии оценки удобства использования были разработаны на основе ранее проведённых исследованиях [9-16]. Обоснованием выбора данных критериев, является то, что они не противоречат стандартам эргономики [17].

Результаты исследования показали, что наиболее важной категорией для оценки удобства использования сайта является «Содержание». Второй по важности оказалась категория «На-



вигация». Стоит отметить, что для студентов «Информация о факультетах» оказалась важнее чем «Информация о университете».

**Относительная важность (вес) категорий и подкатегорий, разработанных критерий для оценки удобства использования сайтов высших учебных заведений**

Категория	Подкатегория	Вес подкатегории	Вес категории
Навигация	Очевидность навигации	6,02	18,12
	Эффективный внутренний поиск	5,44	
	Понятность ссылок	4,39	
	Отсутствие пустых ссылок	3,36	
	Отсутствие «сиротских» страниц	2,06	
Архитектура/организация	Логическая структура сайта	5,68	13,2
	Не глубокая архитектура	2,72	
	Простая навигация по меню	4,85	
Простота использования и обратная связь	Быстрая загрузка страниц	7,15	16,78
	Удобство взаимодействия с сайтом	4,38	
	Наличие обратной связи	1,43	
	Поддержка иностранных языков	3,82	
Дизайн	Эстетичность дизайна	3,68	16,26
	Корректное использование изображений	2,46	
	Уместный выбор шрифтов	1,87	
	Уместный выбор цвета	2,04	
	Уместный дизайн страницы	2,75	
	Однородность	3,46	
Содержание	Актуальность информации	4,24	19,09
	Уместность информации	2,75	
	Отсутствие пустых страниц	2,55	
	Точность информации	2,74	
	Наличие информации об университете	2,29	
	Информация о факультетах	4,01	
	Служебная информация	0,78	
Мобильная версия	Масштабируемость шрифтов и изображений	6,55	16,55
	Удобство меню и навигации	6,49	
	Соответствие фирменному стилю	3,51	

В условиях активного использования и продолжающегося бурного развития использования мобильных устройств, наличие мобильной версии сайта вуза имеет важное значение с точки зрения доступности актуальной образовательной информации. В настоящее время создано значительное количество кроссплатформенных программных сред [18] значительно облегчающих разработку сайтов и позволяющих корректно отображать сайт на мобильном устройстве, что позволяет адаптировать уже разработанный сайт вуза при использовании сравнительно небольших ресурсов.

Отдельно необходимо отметить возможность разработки мобильного приложения, которое равносильно по своей значимости наличию мобильной версии сайта, однако имеет ряд преимуществ перед ней, например, возможности использования системных функций и отправки уведомлений с актуальными новостями, что привлечет дополнительную аудиторию и увеличит количество посещений. При планировании ресурсов для разработки мобильного приложения вуза необходимо учитывать, что в настоящее время активно разрабатываются специфичные для этой цели платформы [19].

В процессе разработки в современных программных средах [20] и оценке мобильной версии сайта нужно обращать внимание на критерии оценки удобства использования, при этом учитывая, что сайт будет отображаться на небольшом экране и вместо мышки пользователь будет использовать пальцы, поэтому все кнопки и разделы меню должны быть рассчитаны на это. Подходя к оценке мобильного приложения, помимо вышеописанных критериев, следует также помнить о соответствии разработки методическим рекомендациям (guidelines) платформ.

В данном исследовании были разработаны критерии, которые должны учитываться при разработке и/или оценке удобства использования сайтов высших учебных заведений. На основании их можно выделить следующие рекомендации, которые стоит учитывать при разработке сайтов высших учебных заведений:

- Дизайн сайта должен быть выполнен в едином стиле, в единой цветовой гамме. Значительным плюсом будет наличие фирменного стиля, в цветах которого будет выполнен сайт. Это позволяет сделать сайт более привлекательным для пользователей.
- На странице должно быть использование не более двух-трех видов шрифтов. Шрифт должен быть читаем и контрастным по отношению к фону.
- Изображения на сайте должны быть уместными, то есть должны быть использованы в целях иллюстрации информации. Изображения должны быть хорошего качества, но при этом размер изображения должен иметь минимальное влияние на загрузку страниц сайта. Наличие «лишних» элементов на сайте, будет иметь влияние на скорость загрузки страниц сайта.
- Скорость загрузки всех компонентов сайта не должна быть долгой. Долгое ожидание загрузки страниц может оттолкнуть пользователей. Так же в настоящее время поисковые системы при сортировке сайтов в поисковой выдаче учитывают скорость загрузки страницы.
- Содержание страниц должно быть актуальным, постоянно обновляться – для этого необходимо предусмотреть простой интерфейс для обновления информации или разработать специальный инструмент для автоматизированного наполнения сайта актуальной информацией.
- На сайте не должно быть пустых, тупиков страниц.
- Обязательно наличие полной информации о факультетах, об университете, служебной информации. Данная информация является важной для пользователей.
- Ссылки на страницы должны позволять пользователю легко ориентироваться на сайте и не вводить в заблуждение. Названия ссылок должно отображать куда они ведут.
- Обязательно наличие эффективного внутреннего поиска по сайту.
- Сайт должен обеспечивать возможность взаимодействия с разными группами пользователей (например, слабовидящих).
- Сайт должен иметь логическую структуру, информация должна быть структурирована и сгруппирована по смыслу.

- МЕНЮ должно быть понятным и простым. Пользователь не должен применять специальных знаний и умений для того, чтоб им пользоваться.
- Сайт должен быть адаптирован для просмотра на мобильном устройстве. При использовании мобильной версии пользователь не должен быть вынужден менять масштаб страницы. При этом структура и дизайн мобильной версии не должны отличаться от обычной версии сайта, так как это может запутать пользователя.

### Библиографический список

1. Федеральный закон "Об образовании в Российской Федерации" от 29.12.2012 N 273-ФЗ (последняя редакция)
2. **William S. Davis, David C. Yen.** The Information System Consultant's Handbook. Systems Analysis and Design. — CRC Press, 1998. — 800 с.
3. **Якоб Нильсен.** Web-дизайн: удобство использования Web-сайтов. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 368.
4. **Гленфорд, Майерс.** Искусство тестирования программ.— М.: «Вильямс», 2012. — С.272. — ISBN978-5-8459-1796-6
5. **Зарубин, И.Б.,** Филинских А.Д. КОГРАФ-2019: сборник материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019.
6. **Старолетов, С.М.** Основы тестирования и верификации программного обеспечения: учебное пособие / С.М. Старолетов. - СПб.: «Лань» 2018 г. с. 344. (с. 15-16). ISBN 978-5-8114-3041-3.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению
8. **Ипатов, Э.Р.** Методологии и технологии системного проектирования информационных систем. Учебник / Э.Р. Ипатов. - М.: Флинта, 2016. - 806 с. — ISBN 978-5-89349-978-0
9. **Gonzalez M., Granollers T., and Pascual A.,** "Testing Website Usability in Spanish-Speaking Academia through Heuristic Evaluation and Cognitive Walkthrough", Journal of Universal Computer Sciences, vol. 14, no. 9, pp. 1513- 1528, 2008.
10. **Nielsen J.,** "Heuristic Evaluation". In J. Nielsen and R. L. Mack (Eds.); Usability Inspection Methods, John Wiley & Sons, New York, pp. 25-64, 1994.
11. **Nielsen, J., and Molich, R.** Heuristic evaluation of user interfaces. Proc. ACM CHZ'90 (Seattle, WA, 1–5 April 1990), 249–256.
12. **Kostaras N. and Xenos M.,** "Assessing Educational Web-site Usability using Heuristic Evaluation Rules", in the Proceedings of 11th Panhellenic Conference in Informatics, Corfu, Greece, pp. 197-201, 2006.
13. **Toit M. and Bothma C.,** "Evaluating the Usability of an Academic Marketing Department's Website from a Marketing Student's Perspective", International Retail and Marketing Review, vol. 5, no. 1, pp. 15-24, 2010.
14. **Mustafa S. and Al-Zoua'bi L.,** "Usability of the Academic Websites of Jordan's Universities", in the Proceedings of the International Arab Conference on Information Technology, Tunisia, pp. 2-9, 2008.
15. **Lencastre J. and Chaves J.,** "A Usability Evaluation of Educational Websites", in the Proceedings of EADTU Conference, France, 2008

16. **Mustafa S. and Al-Zoua'bi L.**, "Usability of the Academic Websites of Jordan's Universities", in the Proceedings of the International Arab Conference on Information Technology, Tunisia, pp. 2-9, 2008.

17. ГОСТ Р ИСО 9241-129-2014 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 129. Руководство по индивидуализации программного обеспечения.

18. **Филинских, А.Д.** Анализ возможностей реализации кроссплатформенной разработки мобильных приложений. Язык разметки JSON / А.Д. Филинских, У.И. Гуляева // КОГРАФ-2019. Сборник материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. 2019. Издательство: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижегород).

19. **Филинских, А.Д., Волгин Е.А.** Разработка макета мобильного приложения / А.Д. Филинских, Е.А. Волгин // КОГРАФ-2018 Сборник материалов 28-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. 2018. С. 114-119.

20. **Филинских, А.Д.** Сравнительный анализ конструкторов для разработки мобильных приложений / А.Д. Филинских [и др.] // КОГРАФ-2018 Сборник материалов 28-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. 2018. С. 53-58.

**M. M. Shevelyova, I. B. Zarubin, U. I. Gulyaeva, S. B. Sorokin, A. M. Labaev**

#### **DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE USABILITY OF WEBSITES OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Criteria have been developed to assess the usability of the sites of educational institutions. Based on these criteria, a survey was developed to collect information on the relative importance of these criteria. The analysis of the site NSTU them. R. E. Alekseev based on the results. Recommendations on the organization of IP for higher education institutions were developed.

**Keywords:** usability assessment, evaluation criteria, website of higher education institutions, heuristic evaluation, user testing.

М.А. Ивлев, Н.К. Кандзюба

**ФОРМИРОВАНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВАРИАНТОВ  
СТРУКТУРЫ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Решается первая задача разработки технического предложения (как стадии разработки) – задача формирования множества исходных вариантов промышленного продукта, имеющего структуру в виде иерархической системы. Варианты этой структуры понимаются как варианты продукта. Решение задачи необходимо для обоснованного выбора оптимального варианта структуры по результатам их сравнения по требуемым критериям качества продукта. Одним из таких критериев является надежность, которая во многом зависит от проектных решений. Этот выбор, выполненный эвристическим способом, может дать положительный результат для разработки простых изделий, однако для изделий со сложной структурой необходим формализованный подход, позволяющий исключить влияние человеческого фактора на результат проектирования. При формировании такого подхода необходимо процедуру составления множества исходных вариантов иерархической системы и их описание разработать с учетом необходимости последующего автоматизированного поиска наилучшего варианта. Поставленная задача решена на основе использования процедур многоуровневой иерархической декомпозиции проектируемого промышленного продукта на конструктивно-технологические единицы и введения их универсальных кодов. Приводятся примеры многовариантной структуры иерархической системы и формализованного описания её вариантов.

**Ключевые слова:** сложные промышленные изделия, иерархические системы, проектирование, надежность, разукрупнение радиоэлектронных средств, структурная оптимизация.

**Введение**

Как показано в работах [1,2] качество и надежность промышленного продукта во многом определяется начальными этапами его разработки, к которым наиболее правомерно причислить процессы так называемого внешнего проектирования [2,3] и первые стадии внутреннего проектирования. К последним относится стадия технического предложения [4]. В общем случае на этой стадии выполняют следующие работы [5,6]:

- выявление вариантов возможных решений, установление особенностей вариантов (принципов действия, размещения функциональных составных частей и т. п.), их конструкторскую проработку, достаточную для сравнительной оценки вариантов;
- сравнительную оценку рассматриваемых вариантов по показателям качества продукта, например, надежности, экономическим, эстетическим, эргономическим;
- выбор оптимального варианта продукта, обоснование выбора: установление требований к нему (технических характеристик, показателей качества и др.) и к последующей стадии разработки продукта (необходимые работы, варианты возможных решений, которые следует рассмотреть на последующей стадии).

Подчеркнем важность этой стадии – в ходе выполнения технического предложения (ТП) осуществляется разработка вариантов реализации технического задания и выбор оптимального варианта конструкции промышленного продукта. Особую значимость стадия ТП имеет место при разработке сложных высокотехнологичных продуктов, имеющих структуру иерархических систем, к которым в частности, относится судовое электrorаспределительное оборудование, поскольку при их разработке опыта и интуиции разработчика недостаточно

для принятия оптимальных или рациональных конструкторских решений, а ошибки проектирования в ряде случаев недопустимы, например, когда промышленный продукт является критическим и его отказ при эксплуатации является чрезвычайным событием [7].

Таким образом, объектом исследования выбран продукт промышленного производства, конструкция которого имеет вид иерархической системы (ИС), целью работы – формирование множества исходных вариантов её структуры.

### Структурная декомпозиция иерархической системы

Для решения задач проектирования ИС (как класса продукта), соответствующих стадии технического предложения, в целом, и разработки её исходных вариантов, в частности, воспользуемся подходом, применяющимся при проектировании радиоэлектронных средств и развитым в работе [7] на область электромеханических изделий, имеющих многоуровневую иерархическую структуру.

Суть подхода состоит в структурной декомпозиции ИС на иерархические уровни в соответствии со стандартной методикой её разделения (разукрупнения) на иерархические (соответствующие уровням иерархии) части, класс которых будем именовать как «конструктивно-технологические единицы» (КТЕ) [8]. Уровень разукрупнения ИС – уровень структуры её внутренней организации и соотношение её частей.

При этом будем полагать, что для каждой КТЕ любого уровня иерархии существует экземпляр (экземпляр КТЕ) – серийно выпускаемое изделие, которое посредством промышленных технологий (в частности, посредством сборочного вида производства) может быть объединено с другими изделиями, соответствующими КТЕ того же или низших уровней иерархии для создания составной части ИС более высокого уровня КТЕ. Полагаем также, что такое объединение технологически может быть выполнено на предприятии-изготовителе, осуществляющем промышленный выпуск конечного продукта – экземпляра ИС, и для такого предприятия экземпляр КТЕ любого уровня будет являться покупным комплектующим изделием.

Отметим, что такой сборке (в общем случае - изготовлению) на предприятии-изготовителе не подлежат изделия самого низшего уровня иерархии, которые назовем элементарными комплектующими изделиями (ЭКИ). Примерами ЭКИ в электронных изделиях являются транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и др., а примерами изделий более высоких уровней иерархии служат сборочные единицы усилителей, генераторов и др.

Результат структурной декомпозиции ИС по конструктивному критерию в общем виде представлен на рис. 1. Для однозначной идентификации каждой КТЕ и формирования формализованных схем вариантов ИС каждому компоненту присваиваем код, позволяющий определить его место и связи в иерархической схеме. Так для четырех уровней (КТЕ) – составных частей ИС, введенных в стандарте [8] и конкретизированных в области судового электрораспределительного оборудования в работе [7], универсальный код компонента (его формализованное описание) имеет следующую структуру

$$A_{NA}B_{NB}C_{NC}D_{ND}, \quad (1)$$

где А – буквенный код КТЕ четвертого (высшего) уровня иерархии, NA – порядковый номер КТЕ высшего уровня иерархии в ИС, В – буквенный код КТЕ третьего уровня иерархии, NB – порядковый номер КТЕ третьего иерархического уровня, входящей в КТЕ четвертого уровня, С – буквенный код КТЕ второго уровня иерархии (функциональный узел), NC – порядковый номер КТЕ второго иерархического уровня, входящей в КТЕ высших уровней, D – буквенный код КТЕ первого уровня иерархии (элемент ИС – представитель элементной базы, неделимая часть ИС), DND – порядковый номер КТЕ первого иерархического уровня, входящей в КТЕ высших уровней.

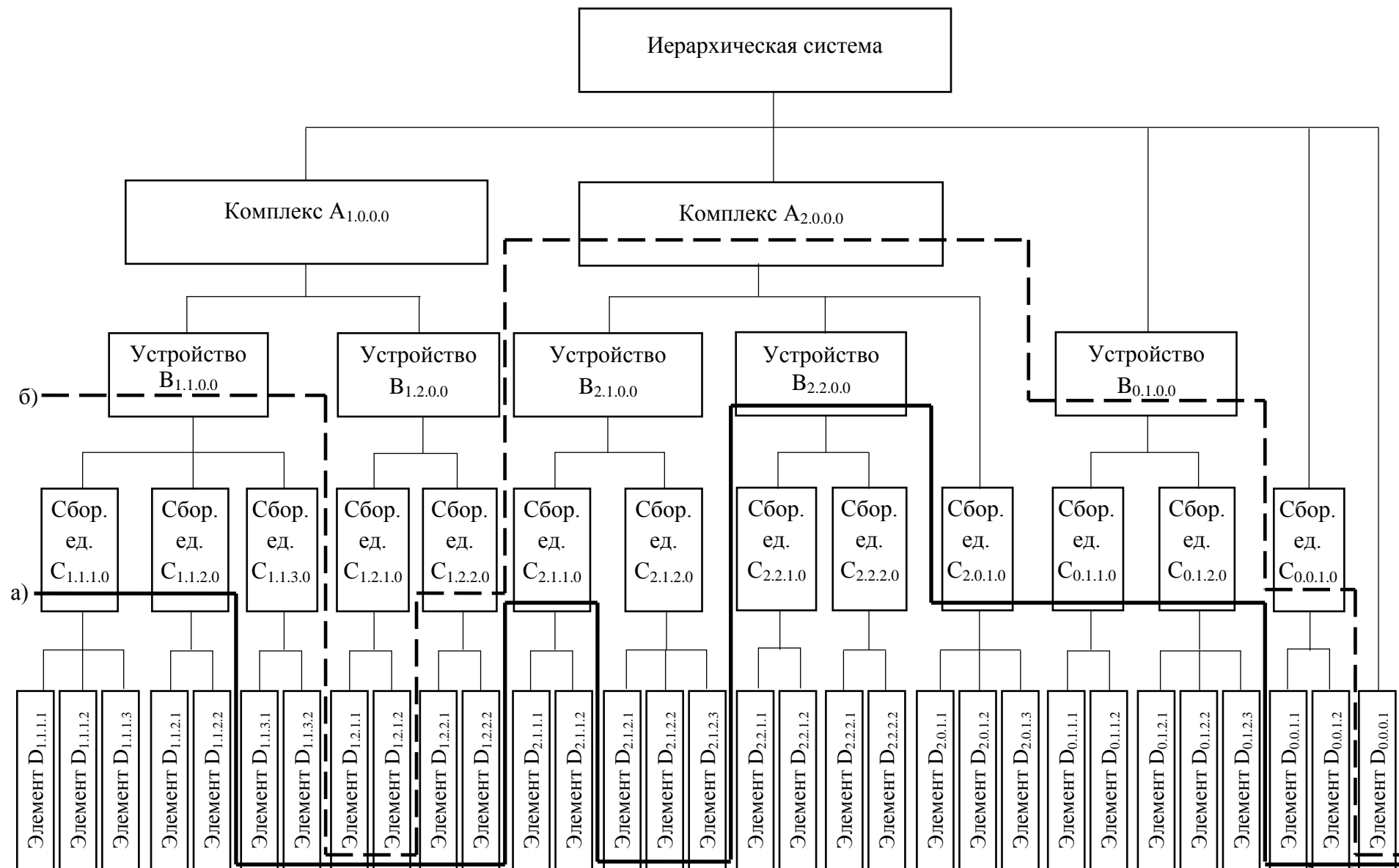


Рисунок 1. Пример структурной декомпозиции иерархической системы и двух вариантов её структуры

Конкретная иерархическая система может быть построена по многим вариантам (совокупностям составных частей), соответствующим множеству характеристических траекторий, два примера которых представлены на рис.1. Без потери содержания введем сокращенные обозначения составных частей путем удаления буквенного кода КТЕ, имея в виду, что его функцию может выполнить место положения его порядкового номера, отграниченное точками, т.е. вместо обозначения  $A_2B_2C_2D_1$  будем использовать обозначение 2.2.2.1. Тогда для ИС варианта *a* (рис.1) структура её второй части высшего уровня вместо комплекса  $A_2$  (или составной части с кодом 2.0.0.0) будет иметь следующее формализованное описание

$$\langle \text{комплекс } A_2 \rangle = \langle 2.1.1.0, 2.1.2.1, 2.1.2.2, 2.1.2.3, 2.2.0.0, 2.0.1.0 \rangle \quad (2)$$

Вариант *б* (рис.1) имеет следующую формализованную структуру ИС

$$\langle \text{ИС} \rangle = \langle 1.1.0.0, 1.2.1.1, 1.2.1.2, 1.2.2.0, 2.0.0.0, 0.1.0.0, 0.0.1.0, 0.0.0.1 \rangle \quad (3)$$

Из структур с кодами (2) и (3) видно, что КТЕ четвертого уровня иерархии первого варианта ИС – комплекс  $A_2$  выполнен в виде совокупности одной КТЕ 3-го уровня, двух КТЕ 2-го уровня и трех КТЕ 1-го уровня, а ИС второго варианта состоит из восьми КТЕ различных уровней иерархии – от первого (0.0.0.1) до четвертого (2.0.0.0). В частности, в варианте *б* (рис.1) в ИС не вошли части 1.0.0.0; 1.2.0.0.

### Заключение

Исходные варианты иерархической системы представлены как множество совокупностей КТЕ разных уровней иерархии – от ЭКИ до КТЕ высших уровней, например, комплексов. Наиболее перспективным для дальнейшей оптимизации системы является формирование их структур в случае модульного исполнения экземпляров КТЕ, которые характеризуются их конструктивной взаимозаменяемостью. Решение задач поиска оптимальной структуры возможно после разработки модели задачи оптимизации по заданному критерию (например, модели надежности ИС), что является целью следующего исследования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. **Ивлев, М.А.** Методология и интерактивная технология концептуального управления производственно-экономическими системами // Организатор производства. 2011. №3(50). С.24–28.
2. **Ивлев, М.А.** Методология и технологии управления социально-экономическими системами при проектировании и развитии инновационного продукта: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2014. 32 с.
3. **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 432 с.
4. ГОСТ 2.103-2013. ЕСКД. Стадии разработки. – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.
5. ГОСТ 2.118-2013. ЕСКД. Техническое предложение. – М.: Стандартинформ, 2013. – 6 с.



6. **Ивлев, М.А.** Архитектура и циклы проектирования электронных средств: учеб. пособие / М.А. Ивлев; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. –160 с.

7. **Ивлев, М.А., Кандзюба Н.К.** Многоуровневая структуризация судового электроснабжения в задаче информационной поддержки проектных решений // Информационные системы и технологии / М.А. Ивлев, Н.К. Кандзюба // Материалы докладов XXV Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2019. С.537-541.

8. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2003 – 11с.

**М.А. Ivlev, N.K. Kandziuba**

### **FORMATION AND FORMALIZATION OF OPTIONS OF THE HIERARCHICAL SYSTEM STRUCTURE IN DESIGN**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

The first task of developing a technical proposal (as a development stage) is being solved - the task of forming the set of initial options for an industrial product having a structure in the form of a hierarchical system. Variants of this structure are understood as product variants. The solution to the problem is necessary for a reasonable choice of the optimal structure option based on the results of their comparison according to the required product quality criteria. One of these criteria is reliability, which largely depends on design decisions. This choice, made in a heuristic way, can give a positive result for the development of simple products; however, for products with a complex structure, a formalized approach is needed to eliminate the influence of the human factor on the design result. When forming such an approach, it is necessary to develop a set of initial variants of the hierarchical system and develop their description taking into account the need for the subsequent automated search for the best option. The problem is solved through the use of multilevel hierarchical decomposition of the designed industrial product into structural and technological units and the introduction of their universal codes. Examples of a multivariate structure of a hierarchical system and a formalized description of its variants are given.

**Key words:** complex industrial products, hierarchical systems, design, reliability, decomposition of electronic equipment, structural optimization.

УДК 681.3

А.Д. Филинских, А.А. Какауридзе, М.О. Кузьмина

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ 3D-МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННИХ ПОМЕЩЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассмотрен вопрос сравнения различных технологий 3D-моделей внутренних помещений, на примере помещения кафедры ГИС. Рассмотрено несколько технологий создания низкополигональной модели, в целях более быстрого моделирования и обеспечения точности построения. Предложено 3 различные технологии моделирования. Первый способ – создание модели вручную в одной из программных сред архитектурного моделирования. Второй способ – создание модели с помощью технологии фотограмметрии, третий – получение панорамного изображения с помощью панорамной съемки и использование его в качестве подложки при создании 3D-модели. Последние два способа можно использовать при наличии физической модели, что может упростить процесс моделирования. В результате проделанной работы произведено сравнение различных технологий для разработки 3D-моделей внутренних помещений и выбрана наиболее подходящая.

**Ключевые слова:** низкополигональная модель, фотограмметрия, 3D-моделирование, панорамная съемка.

### Введение

В настоящее время создание 3D-моделей помещений является одним из основных видов работ в 3D-моделировании, и данная отрасль развивается довольно стремительно. Наличие низкополигональной модели помещения при планировании дизайна, например, поможет решить разнообразные задачи, а именно, рассмотреть совместимость мебели с общей обстановкой в помещении, продемонстрировать полученный результат, при необходимости внести корректировки [2]. При помощи технологий 3D моделирования ещё в период разработки можно наглядно посмотреть, как будут выглядеть даже самые маленькие и незначительные детали интерьера. Поэтому к выбору технологии для 3D-моделирования помещения следует отнестись со всей ответственностью, поскольку это трудоёмкий процесс. Помимо 3D-моделирования в программном продукте для архитектурного моделирования, существуют такие технологии, как фотограмметрия, панорамная съемка (использование панорамного изображения в качестве подложки). В этих случаях можно создавать низкополигональные модели на основе существующей физической модели. Низкополигональное моделирование подразумевает создание моделей, которые состоят из минимального количества полигонов и не затрачивают много компьютерных ресурсов на обработку, но при этом их достаточно для визуального восприятия получаемого объекта. Высокополигональные же модели требуют больше компьютерных ресурсов.

При выборе технологии, подходящей для создания 3D-модели помещения, следует руководствоваться временем, затраченным на получение модели, и точностью, а также возможностью удобного внесения изменений в процессе разработки.

## Методика

Для сравнения различных технологий моделирования и выбора оптимальной для создания моделей помещений создавалась модель помещения кафедры ГИС. Для создания трехмерной модели была использована программа Autodesk 3ds Max [14]. Это программное обеспечение для 3D-моделирования, анимации и рендеринга, созданное и разработанное для визуализации дизайна.

Для создания модели с использованием технологии фотограмметрии была использована программа Autodesk ReCap. Это удобный программный продукт, который может конвертировать фотографии или отсканированные файлы в форматы, поддерживаемые программным обеспечением САПР. Все фотографии сделаны с помощью цифрового фотоаппарата Nikon D 3100.

Для получения панорамного изображения с помощью панорамной съемки для дальнейшего использования его в качестве подложки при создании модели была использована 360-градусная камера Fusion GoPro. Далее работа с отснятым материалом происходила в программном обеспечении для смартфона GoPro.

## Основная часть

Существует несколько технологий создания трехмерных моделей объектов. Условно можно разделить на моделирование с использованием физической модели и без ее использования. Моделирование без использования физической модели подразумевает под собой моделирование в программном продукте для архитектурного моделирования. А моделирование с использованием физической модели также можно разделить на моделирование с помощью технологии фотограмметрии, с помощью использования панорамного изображения (панорамная съемка) и лазерного сканирования (рис. 1).



Рисунок 1. Технологии создания трехмерных моделей

В рамках исследования было рассмотрено три технологии. Технологию лазерного сканирования применить на практике в данном случае не удалось, поскольку этот метод требует наличие лазерной установки. Для приобретения такой установки необходимы значительные финансовые затраты. Далее рассмотрено практическое применение остальных технологий.

## ***1. Создание низкополигональной модели в программном продукте для архитектурного моделирования***

Такой метод моделирования подходит для создания любых форм объектов: для создания простых форм потребуется меньше времени, чем для создания сложных [6]. Однако в основном длительность и результат моделирования будут зависеть от степени освоения программы. При создании модели помещения исследуется точность моделирования и время, затраченное на получение результата. Для создания модели был выбран программный продукт Autodesk 3DsMax, так как обладает рядом преимуществ, одно из которых – совместимость с другими приложениями Autodesk, например, AutoCad.

Для того чтобы узнать все необходимые размеры, нужно провести замеры. Но за счёт наличия плана помещения, измерять его не пришлось, что значительно сэкономило время. Зная размеры помещения, с помощью примитивных объектов были возведены стены, смоделированы пол и потолок [8]. Модели дверей, окон и информационных стендов также были построены с помощью примитивных фигур и переведены в режим Editable Poly для последующего редактирования. После того, как все необходимые объекты созданы, было выполнено текстурирование и настроено освещение [9][10]. Полученный результат представлен на рис.2.



**Рисунок 2. Модель помещения при использовании технологии моделирования в программном продукте**

Таким образом, для освоения данной технологии не потребовалось больших трудозатрат. Модель была создана ориентировочно за 6-7 часов, при этом были учтены точные размеры и пропорции помещения, дверей, окон и стендов. Кроме того, в модель легко вносить корректировки, что удобно при создании интерьера помещения. Но следует помнить, что при отсутствии плана помещения моделирование займёт больше времени ориентировочно на 1-2 часа.

## 2. Моделирование с использованием физической модели

### Фотограмметрия

Фотограмметрия представляет собой такую технологию 3D моделирования, при которой создаётся ряд фотографий с различных ракурсов с целью захватить все детали моделируемого объекта. Чем больше снимков – тем более детальной получится модель [4]. Метод хорош тем, что позволяет получать качественные результаты даже при использовании камеры смартфона. Однако для больших моделируемых объектов, таких как помещения, лучше воспользоваться техникой с более качественными характеристиками съёмки. Следует помнить о том, что данную технологию не получится применить к прозрачным объектам и объектам с очень гладкой и ровной поверхностью. Также такой метод моделирования позволяет создать высокополигональную, наиболее приближённую к исходному объекту модель, которая может затем использоваться в дальнейшем, но иногда необходимо отредактировать полигональную сетку, что может занять достаточное количество времени. Технология проста в освоении и заключается в том, что необходимо группу фотографий загрузить на обработку в программу, где создается модель по входным изображениям. И далее по результатам можно прибегнуть к редактированию в программах для полигонального моделирования, а можно оставить полученную модель и работать с ней.

Для обработки фотографии и сборки их в модель был выбран программный продукт Autodesk ReCap Photo. Данная программа также обладает совместимостью с другими продуктами Autodesk. Это является явным преимуществом, поскольку в дальнейшем полученная модель будет редактироваться в программе Autodesk 3DsMax.

Для использования технологии фотограмметрии было сделано 100 снимков. Снимки были сделаны с помощью цифрового фотоаппарата Nikon D 3100. При этом были учтены следующие рекомендации для получения наиболее точного результата:

- использование максимально доступного разрешения;
- завершение маршрутов (закончить нужно на том же месте, что и начали);
- наличие фотографий с разной высоты;
- перемещение при съёмке (следует стремиться к 80% наложения между фотографиями);
- точка обзора не должна меняться больше чем на 30 градусов;
- поворот камеры (горизонтальное и вертикальное перемещение обеспечивает лучшую калибровку).

Все снимки были загружены в программу ReCap Photo. Время обработки фотографий и создание по ним модели составило 1,5 часа (рис. 3).

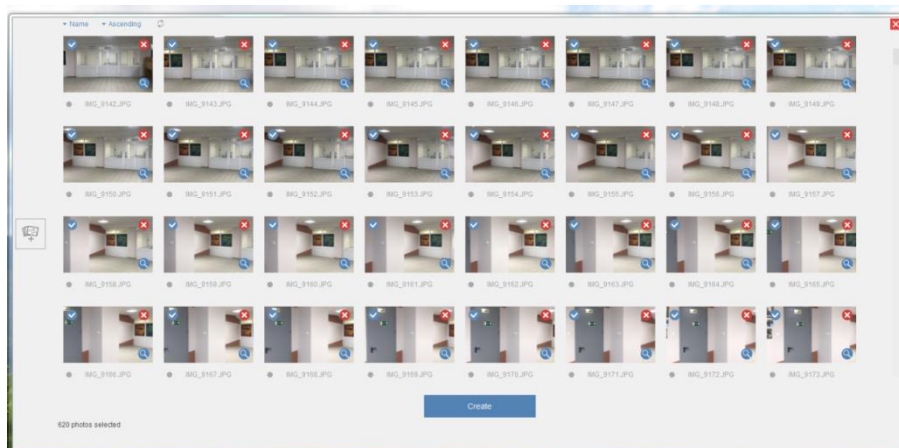


Рисунок 3. Обработка фотографий

Далее с помощью специальных инструментов была произведена очистка модели от лишних элементов. Результат представлен на рис. 4.



**Рисунок 4. Результат применения фотограмметрии**

Данная технология не сложна в освоении, но, чтобы добиться хорошего и качественного результата, необходимо учитывать много нюансов, а именно: когда и в какое время лучше делать фотографии и какие ракурсы нужно подобрать для них. Также могут возникнуть проблемы в работе ПО. Необходимо достаточное количество фотографий, чтобы программа могла собрать модель целиком. Если все условия соблюдены, то на выходе полученная модель сохранит свои пропорции, но может не сохранить исходные размеры. Для получения модели с помощью технологии фотограмметрии было затрачено ориентировочно 8 часов, так как потребовалось несколько попыток создания модели. При этом внесение корректировок также может вызывать трудности за счёт большого количества полигонов.

### ***Панорамная съемка***

Панорамная съемка позволяет получить фотографию с большим углом охвата сцены. Именно с помощью такой методики есть возможность захватить в кадр больше пространства, чем при помощи стандартных фотоаппаратов. Панорамные изображения бывают плоскими (подходят для обычного просмотра и печати) и виртуальными (позволяют переместиться «внутри» фотографии, будто находясь на месте съемки) [3]. Так как рассматривается создание модели помещения, то соответственно, требуется охват на все 360 градусов.

Есть несколько вариантов получения тех или иных видов панорамных фото:

1. Съемка фотоаппаратом, а затем сшивание фотографий в программном продукте. Этот способ требует немало усилий для создания качественной панорамы, поскольку здесь приходится по памяти оценивать перекрытие кадров. Затем полученные фотографии загружаются в программу, которая сшивает снимки.

2. Съемка панорамы при помощи фотоаппарата с соответствующим режимом. Используя такой метод, следует убедиться, что фотоаппарат надежно зафиксирован от вертикального перемещения и легко вращается по горизонту. Производя снимки, нужно следить за тем, чтобы между кадрами обязательно было перекрытие.

3. Съемка панорамы с помощью камеры 360.

В данном случае под использованием панорамы понимается использование полученного снимка в качестве подложки для последующего создания 3D модели. Для получения пано-



рамного изображения была использована 360-градусная камера Fusion GoPro, при этом необходимо было соблюсти несколько правил:

- направление объектива на главный объект;
- использование крепления камеры;
- использование функции Protune для расширения возможностей при дальнейшей работе.

Далее полученный материал был загружен в приложение GoPro на смартфоне. Результат представлен на рис. 5.



**Рисунок 5. Результат панорамной съемки**

На получение панорамного изображения помещения с помощью панорамной съемки было потрачено 3-4 часа. Использование технологии помогает точно передать все элементы помещения. Освоение этой технологии требует достаточное количество времени. При этом полученное изображение используется в качестве подложки для создания 3D модели, что требует 4-5 часов дополнительного времени. Далее, ссылаясь на статью [1], можно сказать, что «такой способ создания трехмерных моделей, не всегда помогает добиться точного сходства с эскизом, особенно на начальном уровне знаний программы. И чтобы добиться максимальной точности требуются большие навыки в области трехмерного моделирования». Внесение изменений в такую модель не вызовет затруднений.

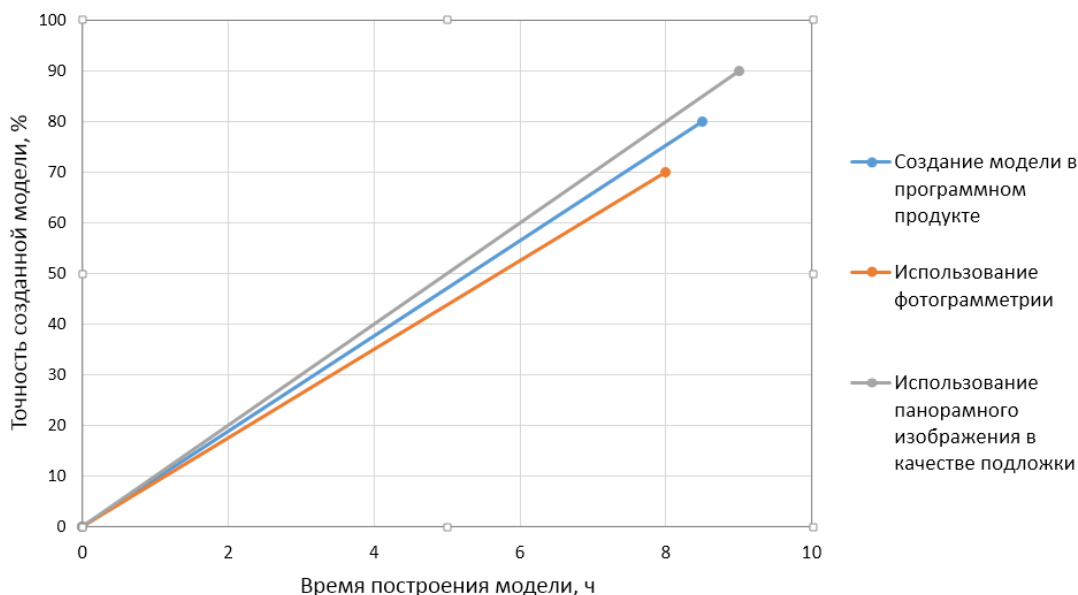
## **Выводы**

Моделирование в программном продукте для архитектурного моделирования позволяет создавать модели любых форм и в результате получать как реальные, так и вымышленные модели. Время, затраченное на получение результата, и точность моделирования будут зависеть от степени освоения программы. При этом на выходе можно получить реалистичную модель помещения. Этот метод удобен тем, что позволяет быстро вносить корректировки и добавлять новые объекты при разработке интерьера помещения.

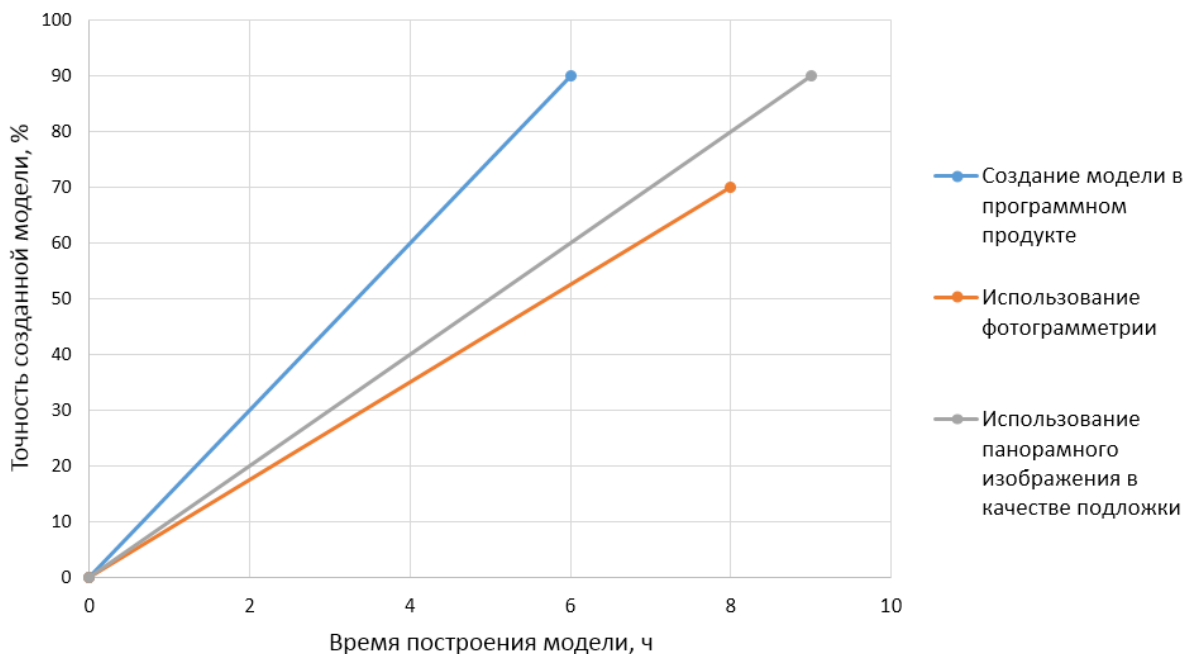
Моделирование с использованием технологии фотограмметрии и панорамной съемки применимо только при наличии физической модели. Технология фотограмметрии может применяться для создания моделей помещений, но это не целесообразно по нескольким причинам: требует большее количество времени для освоения и получения модели, а также наиболее высокие мощности компьютерных ресурсов ввиду получения высокополигональной модели. Использование панорамной съёмки, а именно использование панорамного изобра-

жения в качестве подложки упрощает процесс создания модели. Но получение панорамного изображения может вызвать трудности, требует специального оборудования и дополнительных временных затрат.

Далее представлены графики оценки технологий по двум критериям: время построения и точность создания модели (рис. 6, 7).



**Рисунок 6. Сравнение технологий моделирования**



**Рисунок 7. Сравнение технологий моделирования**

Первый график построен с учётом отсутствия планировки помещения, то есть необходимо было проводить замеры. В этом случае время получения модели увеличивается, а точность уменьшается за счёт наличия погрешностей в измерениях. Исходя из этого графика создание



модели в программном продукте архитектурного моделирования уступает использованию панорамной съемки в точности полученной модели, но при этом выигрывает во времени. Относительно технологии фотограмметрии, моделирование в программном продукте уступает во времени, но выигрывает в точности.

При наличии планировки помещения график существенно меняется, и технология моделирования в программном продукте архитектурного моделирования увеличивает свои показатели и во времени, и в точности полученной модели.

На втором графике видно, что создание модели в программном продукте архитектурного моделирования требует меньше времени при получении максимально точной модели. Кроме того, использование данной технологии позволяет легко и удобно вносить корректировки в модель, что удобно при создании интерьера помещения.

Таким образом, при наличии планировки помещения, целесообразно использовать технологию создания модели в программном продукте архитектурного моделирования. В случае, если планировка помещения отсутствует, следует использовать технологию фотограмметрии или получение панорамного изображения с помощью панорамной съёмки, в зависимости от того, какой критерий будет важнее: время или точность.

### Библиографический список

1. **Соснина, О.А.** Сравнение способов создания низкополигональной 3D-модели О.А. Соснина [и др.] // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 8. С. 564-568.
2. **Филинских, А.Д.** Технология 3D-моделирования в среде Autodesk для создания дизайн-проектов внутренних помещений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 43-45.
3. **Дмитриев, Д.А.** Создание виртуальных экскурсий / Д.А. Дмитриев, А.Д. Филинских // КОГРАФ-2018 Сборник материалов 28-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 32-38 с.
4. **Басманова, Ю.И.** Практическое использование программ фотограмметрической обработки / Ю.И. Басманова, А.Д. Филинских // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Материалы III Международной научно-практической конференции: Электронный ресурс. Общая редакция: В. А. Немтинов. 2016. С. 74-80.
5. **Соснина, О.А.** Анализ методов создания виртуальных моделей сложных архитектурных форм / О.А. Соснина [и др.] // КОГРАФ-2019 сборник материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 184-191 с.
6. **Федорова, Т.О.** Этапы разработки виртуальной модели архитектурного сооружения, состоящего из большого количества объектов / Т.О. Федорова, Соснина О.А. // КОГРАФ-2019 сборник материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 192-197 с.
7. **Разина, Д.А., Соснина О.А.** Методы и средства проектирования окружающей среды в 3DS MAX / Д.А. Разина, О.А. Соснина // КОГРАФ-2019 сборник материалов 29-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 61-65 с.

8. **Соснина, О.А.** Анализ методов создания виртуальных моделей нетривиальных форм / О.А. Соснина [и др.] // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 11. С. 679-681.
9. **Федорова, Т.О.** Особенности освещения виртуальных архитектурных объектов / Т.О. Федорова, О.А. Соснина // КОГРАФ-2018: сборник материалов 28-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 77-84 с.
10. **Федорова, Т.О.** Оптимизация продолжительности визуализации сцен с MENTAL RAY / Т.О. Федорова, О.А. Соснина // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 10. С. 596-601.
11. **Сидорук, Р.М.** Информационная обучающая система "Компьютерное архитектурно-строительное моделирование в технологии "Autodesk Architectural" / Р.М. Сидорук, А.Д. Филинских // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 3. С. 36-40.
12. **Райкин, Л.И.** Публикации интерактивных 3d-инструкций в Autodesk Inventor Publisher \ Л.И. Райкин [и др.] // CADmaster. 2013. № 2. С. 26.
13. **Филинских, А.Д.** Интерактивная трехмерная модель нижегородского кремля / А.Д. Филинских, К.С. Корсаков // "Информационные системы и технологии" ИСТ-2017 Материалы докладов XXIII Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию НГТУ / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. – 1454-1457 с.
14. **Соснина, О.А.** Архитектурное моделирование в 3ds Max: учебное пособие / О.А. Соснина, Р.М. Сидорук; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., испр. – Нижний Новгород, 2012. – 238 с.

**A.D. Filinskikh, A.A. Kakauridze, M.O. Kuzmina**

### **COMPARISON OF TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING 3D-MODELS OF INTERIOR SPACES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article is devoted to the question of comparing different technologies of 3D-models of interior spaces by the example the interior space of GIS Department. Several technologies for creating a low-poly model are considered in order to provide faster modeling and accuracy of construction. Three different modeling technologies are proposed.

**Keywords:** low-poly model, photogrammetry, 3D-modeling, panoramic shooting.

А.В. Копылов, И.В. Леснов

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА МУТАЦИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье представлен краткий обзор на один из сильнейших способов тестирования – мутационное тестирование. Данный метод доказывает свою эффективность благодаря малым затратам и увеличению качества тестовых сценариев. Мутационное тестирование обеспечивает набор необходимых сценариев для проверки ПО. Техника мутаций позволяет выявить недочеты в коде программы еще на ранних стадиях разработки. В работе рассмотрено понятие мутационного тестирования, его назначение, описание метода, плюсы и минусы

**Ключевые слова:** тестирование, мутация, мутант, разработка программного обеспечения.

### Введение

С развитием технологий и инструментов появляется возможность делать более качественные программы, отвечающие потребностям и желаниям конечных пользователей. Но от возникновения идеи до реализации проходит долгий путь разработки. Этот процесс состоит из множества этапов. Одним из важных этапов, наряду с написанием кода, является проверка работоспособности этого самого кода – тестирование. С помощью него идет сравнение реального поведения программы с ожидаемым. Нельзя с полной уверенностью заявлять, что программное обеспечение соответствует заявленным требованиям, пока не будут проведены соответствующие тесты. В процессе тестирования находят ошибки в программе, проверяется надежность программного обеспечения, дается оценка качеству и аспектам работы, сравнивается поведение системы со спецификацией.

Таким образом, тестирование – неотъемлемая часть разработки программного обеспечения. Это весьма динамичный процесс, идущий параллельно с написанием кода. Тестировщики (они же инженеры по качеству) помогают разработчикам, указывая на промахи и недочеты, допущенные в процессе разработки.

### Мутационное тестирование

Существует множество различных методов тестирования. Каждый из них по-своему хорошо помогает инженерам выполнить свою задачу. Конечно, везде могут найтись свои недостатки, но на данный момент не существует абсолютно идеального варианта. В данной работе мы поближе рассмотрим один из весьма интересных методов – метод мутационного тестирования

Мутационное тестирование – метод тестирования программного обеспечения, включающий в себя некоторые изменения в коде программы.

Данный метод был предложен Ричардом Липтоном в 1971 году. Впервые инструмент для мутационного тестирования был разработан Тимоти Баддом в 1980 году. Метод не был широко распространен, но в последнее время интерес к нему возрастает.

Мутационное тестирование используется для того, чтобы автоматизировать имеющиеся тесты. С помощью него мы можем выявить, какие же тесты являются неэффективными. Это главное отличие от unit-тестирования. Unit-тесты помогают понять, что код работает должным образом, а мутационное тестирование, в свою очередь, отслеживает правильность unit-тестов [1].

Сама идея данного метода заключается в том, чтобы заменять определенные участки кода и после этого запускать тесты. Если тесты прошли успешно, то полными их назвать нельзя.

Такие изменения в коде называются мутациями и основываются на мутирующих операторах (мутаторах). Мутаторы могут заменять арифметические знаки на противоположные, менять условия в циклах, работать с массивами (рис. 1).

Входной код	Выходной код
<code>a + b</code>	<code>a - b</code>
<code>a * b</code>	<code>a / b</code>
<code>a &gt; b</code>	<code>a &gt;= b</code>
<code>a === b</code>	<code>a !== b</code>
<code>true</code>	<code>false</code>
<code>a++</code>	<code>a--</code>
<code>a &amp;&amp; b</code>	<code>a    b</code>
<code>[1, 2, 3, 4]</code>	<code>[]</code>
<code>while(a &gt; b) { }</code>	<code>while(false) { }</code>

Рисунок 1. Мутаторы [2]

Мутационное тестирование относится к тестированию по стратегии “белого ящика”. По ней проверяется внутренняя структура кода, логические и семантические ошибки в коде.

Код становится мутантом в результате применения на нем мутации. Мутантов подразделяют на два вида:

- 1) убитые – на которых обнаружены несоответствия и, соответственно, на которых минимум один тест не прошел;
- 2) выжившие – те, на которых отклонения не были обнаружены и все тесты успешно пройдены [3].

Для мутационного тестирования существуют несколько характерных показателей:

- MSI (Mutant Score Indicator) – показывает отношение количества убитых мутантов к их общему числу;
- Mutation Code Coverage – является качественным показателем. Показывает, какой размер бизнес-логики, с которой мы проводим операции, обнаруживают наши тесты;
- Covered MSI – расчет MSI только для покрытых тестами мутантов.

Мутационное тестирование может подойти для любого проекта. Оно помогает в работе в случае написания свежих тестов.

Можно выделить небольшую схему по работе. В проекте появляются новые функции. Для новых участков кодов уже имеются тесты. Чтобы проверить эти тесты, мы применяем мутационное тестирование для конкретного нового файла. При этом мы проверяем, какие мутан-

ты смогли выжить и стремимся к высокому показателю Covered Code MSI. Так мы стремимся полностью избавиться от мутантов и писать максимально эффективные тесты.

В мутационном тестировании мутанты создаются в оригинальной части кода и тестовые сценарии применяются как к оригиналу, так и к видоизмененному коду. Выходные мутанты и изначальный код сравниваются. Если они одинаковые, то мутанты остались живы и данные для тестов необходимо отредактировать. Если же они различаются, то мутант в коде будет убит, подтверждая хорошее качество и эффективность тестовых сценариев [4].

В действительности получается, что если мы будем использовать метод мутационного тестирования, то качество написанного кода будет выше и тестов будет больше.

В зависимости от размеров разрабатываемого проекта, мутационное тестирование можно запускать в разных количествах. Например, каждый раз, когда вы делаете сборку, иногда бывает достаточно одного раза в день. Самым важным является конечный результат и непрерывающаяся модернизация тестов.

Рассмотрим названные далее виды мутаций.

#### 1. Мутация значений

В этом виде мутации значения переменных или констант изменяются для проверки поведения исходного кода и мутанта. Например, при замене оператора инкремента на оператора декремента, если выходные значения обоих кодов различаются, то тестовый сценарий способен обнаруживать ошибки в коде.

#### 2. Мутация выражений

В этом виде мутации выходные значения исходного кода и мутантов сравниваются путем удаления или перемены местами целых выражений. Например, можно убирать целые условия из циклов или добавлять одинаковые выражения.

#### 3. Мутация решений

В этом виде мутации изменяются условные выражения. Например, знак  $>$  заменяется на знак  $<$  [5].

Существуют несколько техник, позволяющие снизить затраты на мутационное тестирование:

- селективная мутация – использование сокращенного набора операторов;
- выборка мутантов – использование случайного подмножества из всего набора мутантов;
- мутация высших порядков – добавление более одного дефекта в каждого мутанта;
- кластеризация мутантов – выбор подмножества мутантов на основе процесса кластеризации;
- компиляционная интеграция – мутанты генерируются напрямую с помощью инструментального компилятора;
- схемы мутантов – исходная программа и мутанты объединены в единый файл, версия для выполнения выбирается во время выполнения;
- преобразование байт-кода – ошибки вставляются в скомпилированный код, а не в исходный;
- параллельное выполнение – тестовые сценарии выполняются параллельно на нескольких машинах;
- гибкая слабая мутация – состояние всей системы сравнивается на разных местах во время выполнения [6].

Существуют готовые продукты, позволяющие проводить мутационное тестирование, например:

### 1. Stryker

Это единственный активно развивающийся инструмент, использующийся в JavaScript. Stryker не фреймворк для тестов, а, скорее фреймворк для мутационного тестирования, который служит некоторым дополнением для нашей структуры.

Настройка не занимает много времени. Нужно лишь правильно заполнить Json-файл и поставить необходимые плагины.

Затем загружаем конфигурацию, запускаем тесты и генерируем мутантов на необходимых файлах. По завершению, программа выдает статистику пройденных тестов.

По итогу, Stryker представляет из себя удобный инструмент для мутационного тестирования в JavaScript, которому еще есть, куда развиваться

### 2. VisualMutator

Интегрирован в процесс разработки и является расширением для VisualStudio. Позволяет создавать мутантов с помощью встроенных и пользовательских операторов, просматривать измененные области, имеет интерактивный пользовательский интерфейс, предоставляет отчет о тестах.

По существу, является весьма полезным инструментом для мутационного тестирования в среде разработки VisualStudio на языке C#.

### 3. Infection

Популярный фреймворк для проведения мутационного тестирования в PHP.

При запуске конфигуратор создаст файл с необходимыми настройками, которые мы меняем по своему усмотрению.

Далее мы берем наш тест и выполняем его в Infection. Программа выдаст всю необходимую статистику по мутантам и метрикам. В специальном файле мы можем посмотреть, какие мутации были сгенерированы.

Минусы не обошли метод мутационного тестирования стороной.

#### 1. Низкая скорость.

Довольно значительный недостаток. Если в нашем коде находятся несколько десятков мутантов, то даже для самого простого класса можно получить огромное количество мутаций. По каждой из них нужно будет запустить тесты. В итоге, процесс прогона может занять часы. Но, к счастью, этот недостаток можно компенсировать путем многопоточного параллельного запуска тестов. При этом, потоки можно раскидать на несколько машин и это даст свои плоды. Есть и другой способ уменьшить влияние данного недостатка – инкрементальные прогоны. Необязательно делать расчеты мутационных показателей по всей ветке. Достаточно сделать прогон по измененным файлам и провести сравнительный анализ.

Кроме того, можно модифицировать мутации. Для этого нужно вводить правила, по которым работают мутаторы и с помощью которых выполнение мутаций, ведущих к ошибкам, можно остановить.

Из низкой скорости выполнения следует и то, что мутационное тестирование предназначается для unit-тестов. При его использовании для интеграционных тестов, мы попросту не дождемся результатов.

#### 2. Бесконечные мутанты.

Для примера возьмем обычный цикл for (рис. 2).

```

                                $i--
for ($i = 0; $i < 10; $i++) {
    ...
}

```

**Рисунок 1. Пример бесконечных мутантов[7]**

При замене  $i++$  на  $i--$  цикл станет бесконечным. К сожалению, при мутационном тестировании такое может происходить часто.

Первый вариант для разрешения проблемы – модификация мутации.

Второй вариант – задать тайм-аут на выполнение. Если за определенный промежуток времени тест так и не выполнялся, то мутанта можно считать убитым, потому что код проверяется тестом, который находит проблему, показывая, что код уже нерабочий.

### 3. Идентичные (эквивалентные) мутанты.

Они появляются, если для тестов программа выводит одинаковый ответ. Эквивалентные мутанты показывают, что в коде присутствуют семантические ошибки, он логически слаб и не способен идентифицировать неисправности. Какого-то общепринятого решения для данного случая нет.

## Заключение

Таким образом, мутационное тестирование является достаточно полезным методом тестирования. Оно может помочь найти изъяны на ранних этапах тестирования. При использовании данного метода возрастает качество тестов, что, в свою очередь, ведет к написанию более структурированного кода. Также существуют готовые решения, которые позволяют проводить мутации в тестах, для разных языков программирования имеются различные инструменты. При грамотном использовании мутационного тестирования процесс разработки становится более эффективным, быстрым и прозрачным.

## Библиографический список

1. **Oliveira, R. A. P., Alegroth, E., Gao, Z., & Memon, A.** (2015). Definition and evaluation of mutation operators for GUI-level mutation analysis. 2015 IEEE Eighth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW).
2. Мутационный анализ, или как тестировать тесты // ITnan[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=421141>.
3. **Souza, F.C., Papadakis, M., Traon, Y.L., Delamaro, M.E.** (2016). Strong Mutation-Based Test Data Generation using Hill Climbing. 2016 IEEE/ACM 9th International Workshop on Search-Based Software Testing (SBST).
4. **Oliveira, R. A. P., Alegroth, E., Gao, Z., & Memon, A.** (2015). Definition and evaluation of mutation operators for GUI-level mutation analysis. 2015 IEEE Eighth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW).

5. **Nayyar, Z., Rafique, N., Hashmi, N., Rashid, N., & Awan, S.** (2015). Analyzing test case quality with mutation testing approach. 2015 Science and Information Conference (SAI).
6. **Christof, E.** (2014). Mutation Testing. (2014). IEEE Software, 31(3), 30–35.
7. Мутационное тестирование в PHP: качественное измерение для codecoverage // Software-Testing [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.software-testing.ru/library/testing/testing-automation/3165-php-code-coverage>

**A.V. Kopylov, I.V. Lesnov**

## **MUTATION TESTING METHOD**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article provides a brief overview of one of the strongest testing methods - mutational testing. This method proves its effectiveness due to low costs and improving the quality of test scenarios. Mutation testing provides a set of necessary scenarios for mandatory software verification. The technique of mutations allows us to identify flaws in the code of programs at the early stages of development. The paper considers the concept of mutation testing.

**Key words:** testing, mutation, mutant, software development.



П.С. Кулясов

## КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Целью работы является создание классификатора интерфейсов многокомпонентных систем с использованием алгебраических структур. Автором предложены способ систематизации и классификации интерфейсов по операциям вложения, сопряжения и фильтрации, построена модель, в рамках которой могут быть разработаны алгоритмы индексирования, сборки и реконfigurирования многокомпонентных структур.

**Ключевые слова:** алгебраическая модель, многокомпонентная система, стандартизированный интерфейс, алгебраическая решетка, поисковый индекс.

### Введение

В теории открытых информационных систем (ОИС) в качестве их базовых элементов принято использовать компоненты, представляющие собой блоки-преобразователи информации, обладающие входными и выходными интерфейсами, которые должны быть стандартизированы и поддерживаться системой спецификаций [1] (рис. 1). Компонент ОИС представляет собой тройку  $(P^{in}, P^{out}, M)$ , где  $(P^{in}, P^{out})$  - множества параметров, определяющих входной и выходной интерфейсы компонента, а  $M$  - морфизм, описывающий отображение значений параметров входного интерфейса на параметры выходного.

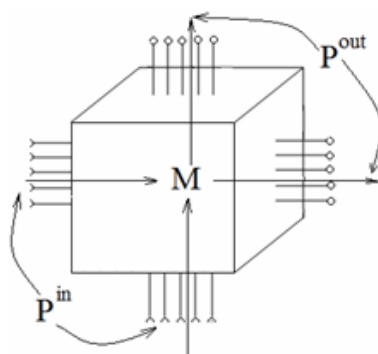


Рисунок 1. Компонент ОИС

### Моделирование многокомпонентных систем

Одной из важных проблем моделирования ОИС заключается в том, что в общем случае для систем сложной структуры количество компонентов может быть настолько большим, что алгоритмы, позволяющие осуществлять сборку таких многокомпонентных структур, бу-

дуг обладать высокой вычислительной сложностью и, как следствие, значительным временем выполнения.

Для того чтобы оптимизировать информационный поиск на множестве компонентов, предлагается трехмерная структура, описывающая и систематизирующая набор интерфейсов, которыми обладают компоненты моделируемой системы. В каждом из измерений часть этой структуры описывает один из трех видов операций над интерфейсами компонентов системы (интеграция, сопряжение и фильтрация) и представляет собой алгебраическую структуру определенного вида - решетку. Рассмотрим более подробно.

### 1. Интеграция интерфейсов

Операция интеграции представляет собой объединение нескольких интерфейсов одного типа в один сложный (составной). Он может включать в себя несколько простых интерфейсов, причем уровней вложенности может быть несколько (рис. 2).

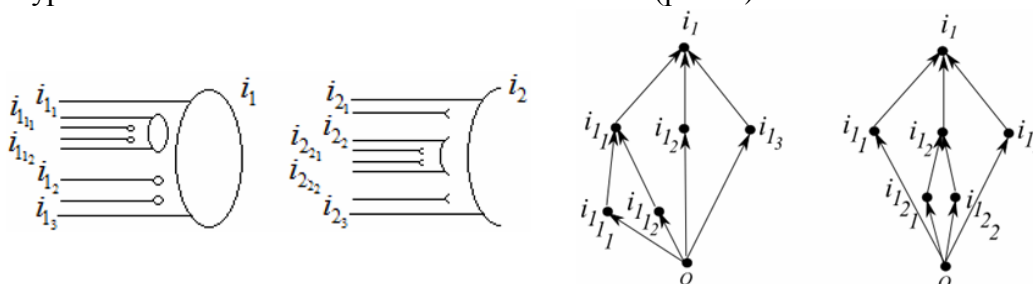


Рисунок 2. Интеграция интерфейсов и ее представление в виде решетки

Множество интерфейсов  $I$  является упорядоченным [2], поскольку для любых элементов этого множества определено бинарное отношение  $i_{k_m} \subseteq i_k$  (вложенность интерфейсов) и для любого интерфейса  $i_k \in I$  будут выполняться следующие условия:

- рефлексивности ( $i_k \subseteq i_k$ ); (1)

- антисимметричности (если  $i_{k_m} \subseteq i_{k_n}$  и  $i_{k_n} \subseteq i_{k_m}$ , то  $i_{k_n} = i_{k_m}$ ); (2)

- транзитивности (если  $i_{k_m} \subseteq i_k$  и  $i_{k_{m_1}} \subseteq i_{k_m}$ , то  $i_{k_{m_1}} \subseteq i_k$ ). (3)

Согласно [3], частично упорядоченное множество является решеткой, если для любой пары подмножеств этого множества существует один и только один элемент - нижняя граница и аналогично существует один и только один элемент - верхняя граница (4). Как можно заметить на рис. 2, структура, описывающая вложенность интерфейсов удовлетворяет этому определению. Нулевой элемент вводится искусственно, однако он не вносит никаких противоречий.

### 2. Сопряжение интерфейсов

Все интерфейсы могут быть разделены на две категории: интерфейсы типа *in* (входные) и типа *out* (выходные). Для любого интерфейса  $i$  типа *in* на множестве всех интерфейсов  $I$  может быть определено подмножество  $I_1 = \{i_{1,1}, i_{1,2}, \dots, i_{1,n}\}$  интерфейсов типа *out*, с которыми он может быть сопряжен (рис. 3, а). В свою очередь для интерфейсов типа *out*, входящих в подмножество  $I_1$ , может быть определено подмножество  $I_2 = \{i_{2,1}, i_{2,2}, \dots, i_{2,n}\}$  интерфейсов типа *in*, с которыми они могут быть сопряжены (рис. 3, б). И так далее (рис. 3, в). Количество та-

ких подмножеств будет зависеть от рассматриваемой системы и от сложности ее структуры. Аналогично для интерфейса  $i$  типа *out*. Таким образом, справедлива будет следующая запись:

$$\forall i \in I \exists I_1 = \{i_{1_1}, i_{1_2}, \dots, i_{1_k} \} \rightarrow (i, i_{1_k})$$

$$\forall i_{1_m} \in I_1 \exists I_2 = \{i_{2_1}, i_{2_2}, \dots, i_{2_k} \} \rightarrow (i_{1_k}, i_{2_m})$$

...

$$\forall i_{(n-1)_k} \in I_{(n-1)} \exists I_n = \{i_{n_1}, i_{n_2}, \dots, i_{n_r} \} \rightarrow (i_{(n-1)_m}, i_{n_r}) ,$$

$\Gamma \rightarrow (i, i_{1_k})$  - вводимое обозначение операции сопряжения интерфейсов.

С точки зрения операции сопряжения интерфейсов, множество  $I$  является упорядоченным [4], поскольку для любых элементов этого множества определено бинарное отношение  $i_k \subseteq i_m$  (сопряжение интерфейсов) и для любого интерфейса  $i_k \in I$  будут выполняться условия 1-3. Свойство 4 так же выполняется.

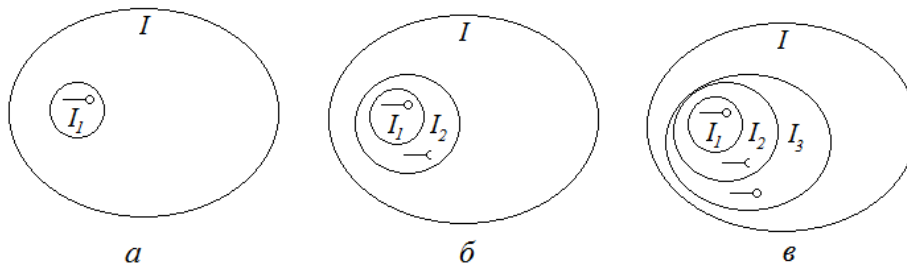


Рисунок 3. Сопряжение интерфейсов (представление в виде подмножеств)

В результате операция сопряжения интерфейсов может быть представлена структурой, имеющей вид решетки (рис. 4).

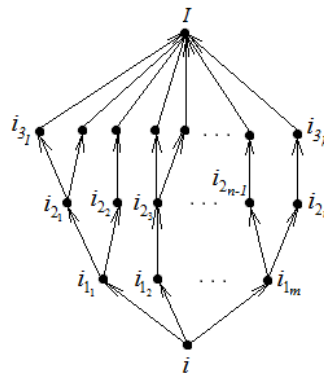
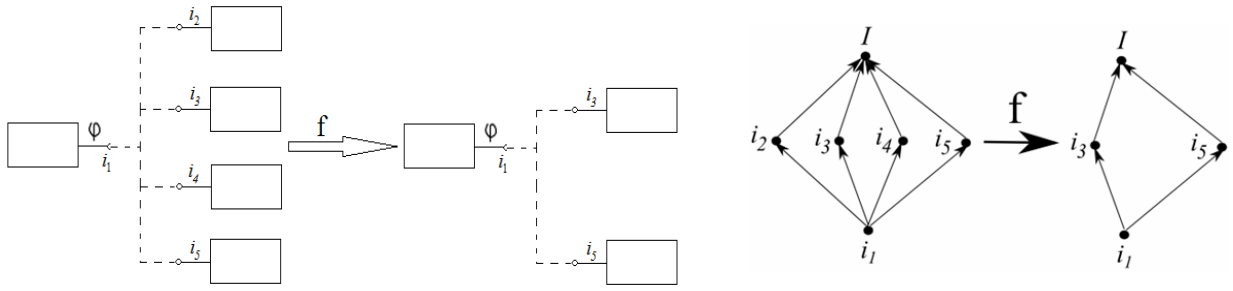


Рисунок 4. Сопряжение интерфейсов (представление в виде решетки)

### 3. Фильтрация интерфейсов

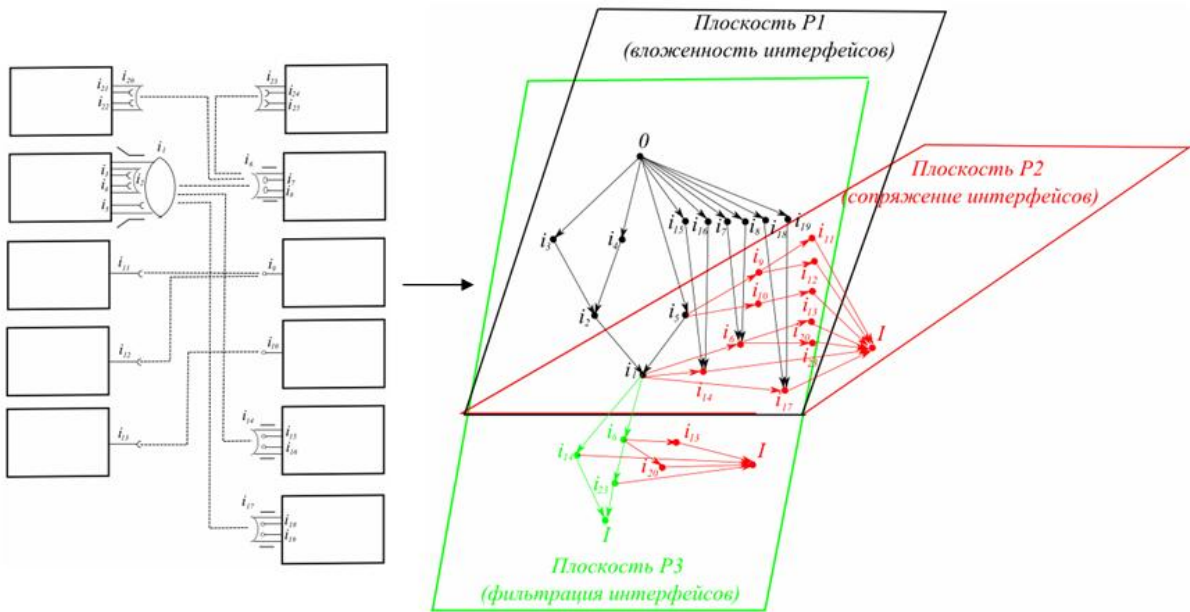
С точки зрения данной операции, интерфейсы делятся на две категории: фильтруемые и фильтрующие. При ее выполнении из всех интерфейсов, которые сопрягаются с фильтрующим интерфейсом, выбираются только те, которые будут соответствовать заданному критерию (рис. 5).



**Рисунок 5. Фильтрация интерфейсов и ее представление в виде решетки**

Поскольку операция фильтрации интерфейсов выполняется над сопряженными интерфейсами, для нее так же может быть использовано представление в виде решетки (рис. 5).

Объединив структуры, описывающие эти три вида операций над интерфейсами в одну общую, получим трехмерную структуру, описывающую взаимодействие интерфейсов компонентов системы (на рис. 6 представлена такая структура, построенная для примера). В каждом из трех измерений структура будет иметь вид решетки. Поскольку операция фильтрации выполняется над сопряженными компонентами, в плоскости  $P2$  будет присутствовать избыточность за счет дублирования фрагментов решетки, описывающей сопряжение, для отфильтрованных интерфейсов.



**Рисунок 6. Структура, описывающая взаимодействие интерфейсов компонентов системы**

Полученная структура может быть использована в качестве поискового индекса, назначение которого заключается в повышении скорости поиска нужных компонентов системы. Дополнительная память, выделяемая для хранения индекса, и увеличение времени, требуемого для его обновления, компенсируются уменьшением времени на поиск информации. Таким образом, данное представление позволяет индексировать интерфейсы компонентов системы, что дает возможность оптимизации за счет быстрого поиска.

## Заключение

В работе показано применение алгебраических структур для моделирования систем на базе компонентного подхода. Предложена трехмерная структура на базе решеток, описывающая и систематизирующая набор интерфейсов, которыми обладают компоненты моделируемой системы, и позволяющая индексировать интерфейсы компонентов системы и осуществлять быстрый поиск.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-07-00656.*

## Библиографический список

1. **Жевнерчук, Д.В.** Обобщенный метод синтеза многокомпонентных интероперабельных структур на основе онтологии и недетерминированного конечного автомата // Информационные технологии. – Москва: Новые технологии. – 2019. – том 25. – №2. – С. 67-74
2. **Биркгоф, Г.** Теория решеток // Г. Биркгоф / М.: Наука, 1984. – 284 с.
3. **Кофман, А.** Введение в теорию нечетких множеств // А. Кофман / М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

**P.S. Kulyasov**

## CLASSIFICATION OF INTERFACES OF A MULTICOMPONENT SYSTEM BASED ON AN ALGEBRAIC APPROACH

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** creation of an interface classifier for multicomponent systems using algebraic structures.

**Design/methodology/approach:** system analysis, abstract algebra, graph theory.

**Findings:** the author has proposed a method for systematizing and classifying interfaces by integration, pairing, and filtering operations.

**Research limitations/implications:** model can be used for multicomponent systems of various configuration and difficulty.

**Originality/value:** the model can be used for development of algorithms for indexing, assembling, and reconfiguring multicomponent structures.

**Key words:** algebraic model, multi-component system, standardized interface, algebraic lattice, search index.

И.В. Леснов, И.С. Федоров

## ПРИМЕНЕНИЕ GPU В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Производительность современных видеокарт позволяет решать разного рода задачи быстрее, чем это можно было бы сделать на центральном процессоре. В статье рассматривается принцип использования видеокарты для обработки изображений в реальном времени. Приведены шаги работы сервера по обработке изображений, его положительные стороны использования и варианты дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** изменение размера изображения, метод ближайшего соседа, матрица свёртки, вычисления на GPU, CUDA.

### Введение

В настоящее время сильно распространены веб-ресурсы: социальные сети, форумы, новостные сайты. Современную жизнь сложно представить без этих новшеств. В интернете огромное количество медиафайлов, в том числе фотографий, которые могут занимать много памяти.

Довольно часто, изображения хранятся в разных разрешениях для уменьшения трафика и увеличения времени загрузки страницы, но это увеличивает объем занимаемой памяти. Вместо этого можно хранить на сервере только изображение оригинального размера, а при запросах выдавать пользователю уменьшенное.

Основная гипотеза – применение вычислительной системы для изменения размера изображений в реальном времени позволит сэкономить занимаемой изображениями памяти, при этом скорость загрузки для конечного пользователя будет незаметной. Альтернативная гипотеза – изменение размера в реальном времени слишком затратная операция по вычислительным ресурсам.

Для решения проблемы подходит GPU. В данном случае, видеочипы эффективны, так как они обладают сотнями вычислительных блоков, на которых можно распараллелить алгоритмы [1]. Вычисления на GPU во многих задачах позволяют достичь значительного ускорения, обработка изображений не является исключением. При необходимости, имеется возможность масштабировать систему, добавлением новых видеокарт.

### Формат хранения

Существует множество форматов изображений. Для хранения данных на сервере был выбран наиболее распространённый в интернете формат JPEG, так как он обладает следующими положительными сторонами:

- возможность менять степень сжатия;
- небольшой размер файла при незначительных потерях качества;

- открытая спецификация формата;
- возможность распараллелить работу с данным форматом.

JPEG файл состоит из последовательных маркеров, начинающихся с кода 0xff. Далее следует код идентификатора маркера. После типа маркера могут присутствовать дополнительные данные. Интерес представляет маркеры RSTn, которые позволяют выполнять декодирование с любого места. Однако эти маркеры могут отсутствовать, что затрудняет распараллеливание.

Алгоритм сжатия JPEG состоит из следующих этапов:

1. Преобразование оригинального изображения в цветовую модель YCbCr.
2. Прореживание–усреднение значений Cb и Cr для блока пикселей 2x2, что позволит сэкономить на 50% памяти [2]. Стандарт позволяет выполнять прореживание для блоков 2x4, 4x2, 1x4, 4x1 [3].
3. Разбиение изображения на блоки 8x8 для последующего применения дискретно-косинусного преобразования.
4. Квантование полученных коэффициентов отдельно для каждой компоненты. Здесь возможно регулирование качества изображения путем деления всех элементов матрицы на коэффициент. Коэффициент должен быть больше или равен 1, а после деления частотное округляется.
5. Переупорядочивание блока методом (zig-zag) нужно для представления матрицы в виде массива.
6. Кодирование серий нулей. Для последовательности из нескольких нулей пишется само число и количество повторений.
7. Сжатие матрицы по алгоритму Хаффмана.
8. Установка маркеров перезапуска RSTn для каждого блока.
9. Формирование результирующего JPEG файла с учетом всех вспомогательных матриц, которые необходимы для декодирования.

Как видно из алгоритма, многие этапы без проблем можно распараллелить на видеокарте и вычислять независимо друг от друга[4]и достичь хорошей скорости обработки.

## Принцип работы

И так, после загрузки изображения пользователем на сервер, необходима предварительная обработка. Все настройки обработки доступны администратору сайта и могут быть изменены в любой момент. Если формат отличается от JPEG, то изображение можно сохранить в оригинальном формате. Другой вариант – конвертировать в JPEG, но информация о прозрачности будет потеряна.

Имеет смысл установить предел на максимальное разрешение изображения, потому что не часто требуется показывать на веб-странице изображения больше разрешения монитора. В случае превышения лимита, изображение уменьшается до максимально возможного размера, которое так же задается администратором.

Для того, чтобы гарантировать присутствие маркеров перезапуска на этапе кодирования или декодирования, необходимо проверить и добавить их при необходимости. Это выполняется один раз после загрузки изображения и не занимает много времени, необходимо декодировать и закодировать обратно с расставленными маркерами перезапуска.

Обработка запроса изображения осуществляется следующим образом:

1. Чтение оригинального изображения из базы данных. Если запрашиваемый размер больше исходного, возвращается оригинал.
2. Предварительная обработка маркеров JPEG: извлечение необходимых данных.
3. Выделение памяти необходимого размера для оригинального и раскодированного изображений. Загрузка контента в память GPU.
4. Декодирование по алгоритму JPEG. Результат остается в памяти GPU для следующих этапов.
5. Уменьшение размера изображения на видеокарте.
6. Сжатие в JPEG.
7. Копирования данных в память CPU и отправка пользователю.

### Изменение размера

Алгоритм изменения размера изображения должен работать быстро, но при этом выдавать качественный для глаз результат. Далее приводятся некоторые алгоритмы изменения размера изображений, их положительные стороны и недостатки.

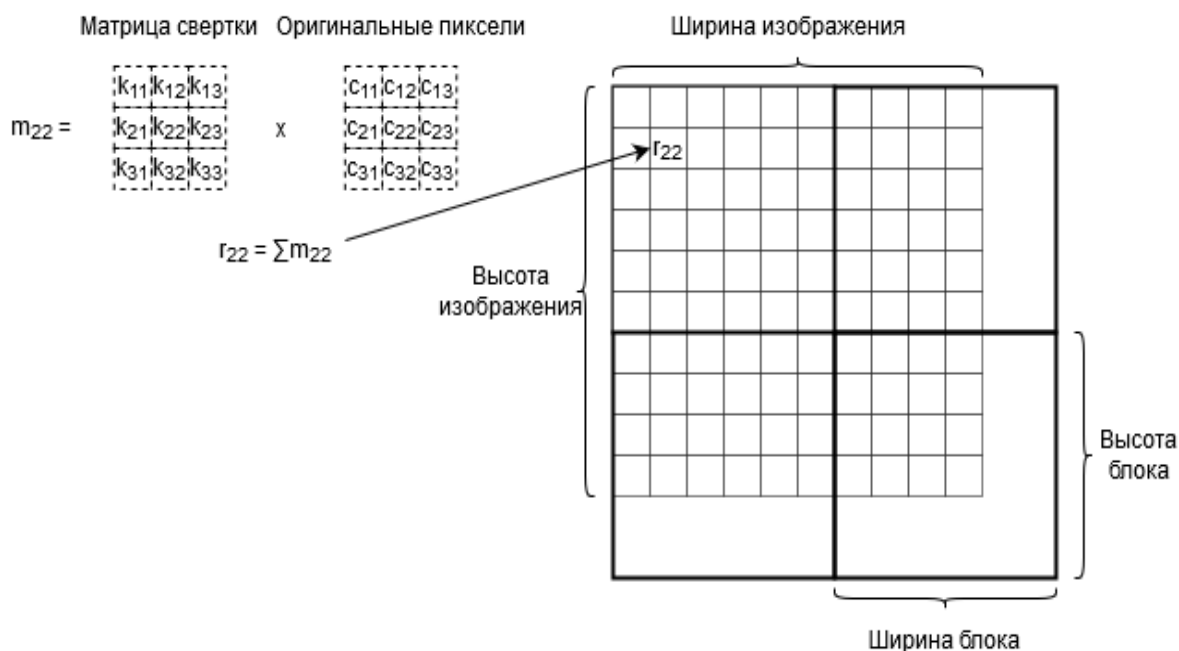
По скорости работы можно отметить метод ближайшего соседа. Идея метода заключается в подборе для каждого пикселя результирующего изображения наиболее близкие из оригинального [5]. Так как в результирующем изображении участвует только один оригинальный пиксель, результат получается зернистым. Этот недостаток может быть решен уменьшением в два раза, пока это возможно. Последний раз уменьшение происходит до заданного разрешения, что позволит получить удовлетворительный результат для большинства случаев.

Существует группа методов обработки изображений, использующие матрицы свёртки. Для получения значения цвета конечного пикселя матрица свертки умножается на цвета исходного изображения покомпонентно. В зависимости от матрицы будет использовано разное количество пикселей, от чего зависит качество результата. Наиболее известные следующие матрицы: билинейный, бикубический и фильтр Ланцоша. Квадратную матрицу можно заменить двумя одномерными: по горизонтали и вертикали. Но обработка по каждому направлению должна происходить отдельно, то есть в два прохода. В этом случае время работы алгоритма будет зависеть от размера результата и матрицы, но результат значительно лучше по сравнению с методом ближайшего соседа. Именно поэтому, был выбран данный метод.

Задача изменения размера изображения подходит для вычислений на видеокарте, так как современная видеокарта обладает большим количеством процессоров. Технология CUDA объединяет потоки в блоки. Каждый блок выполняется независимо от других. Учитывая особенности технологии, изображение обрабатывается отдельными кусками, как это показано на рисунке.

Функция, выполняемая на GPU, называется ядром (kernel). Каждому ядру требуется матрица свёртки, и пиксели оригинального изображения. Оригинальные пиксели предварительно должны быть загружены в видео память, для результирующих данных тоже необходимо выделить видео память. При обработке пикселей на краю изображения умножение происходит на часть матрицы. Также возможен случай, когда блокам потоков достанется не полный кусок изображения, поэтому ядра проверяют принадлежность пикселя изображению. Ширина и высота блока выбираются экспериментальным путем.





**Иллюстрация обработки изображения на GPU**

### Заключение

Наиболее распространённый вид информации в интернете – изображение. Владельцы крупных сайтов различными способами стараются уменьшить объём хранимой информации.

Применение GPU позволяет изменять размер изображений в реальном времени, без необходимости хранить много копий изображений; уменьшить трафик для пользователя веб-сервиса и время загрузки сайта.

Информационная система может быть улучшена за счет кэширования наиболее популярных запросов. Для хранения изображений природы подходит фрактальный алгоритм, так как позволяет достичь высокий коэффициент сжатия.

### Библиографический список

1. **Антонюк, В.А.** Программирование на видеокартах (GPGPU): учебное пособие / В.А. Антонюк. – М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. – 48 с.
2. **Тропченко, А.Ю.** Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео: учебное пособие / А.Ю. Тропченко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.
3. Консорциум WWW: [Электронный ресурс] // Спецификация формата JPEG. URL: <https://www.w3.org/Graphics/JPEG/jfif.pdf>. (Дата обращения: 28.01.2020)
4. Теле Фото Техника: [Электронный ресурс] // Использование технологии CUDA для быстрого сжатия изображений по алгоритму JPEG. URL: [http://telephototech.ru/kat\\_podr.php?stid=27&st\\_gr\\_id=3](http://telephototech.ru/kat_podr.php?stid=27&st_gr_id=3). (Дата обращения: 28.01.2020)
5. **Токарев, Д.А.** Анализ методов уменьшения размеров изображений: научная статья / Д.А. Токарев, В.Г. Грибунов, И.А. Игнатенко. – Серпухов: Межрегиональное общественное учреждение "Институт инженерной физики", 2014. – 40-46 с.

**I.V. Lesnov, I.S. Fedorov**

**USING THE GPU TO OPTIMIZE THE PROCESS  
OF RESIZING IMAGES FOR INTERNET SERVICES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Currently, web resources are very common: social networks, forums, and news sites. Modern life is difficult to imagine without these innovations. There are a huge number of media files on the Internet, including photos, which can take up a lot of memory.

Quite often, images are stored in different resolutions to reduce traffic and increase page loading time, but this increases the amount of memory used. Instead, server can store only the original image size on the server, and give the user a smaller image when making requests.

The main hypothesis is that using a computer system to change the size of images in real time will save the memory occupied by images, while the loading speed for the end user will be minor.

The GPU is suitable for solving the problem. In this case, video chips are effective because they have hundreds of computing blocks on which to parallelize algorithms. GPU computing can achieve significant acceleration in many tasks.

The article discusses the principle of using a video card for real-time image processing. The steps of the server for image processing, its positive aspects of use and variants for further development are given.

**Keywords:** image resizing, nearest neighbor method, convolution matrix, GPU calculations, CUDA.

Д.Н. Летюшов, И.В. Леснов

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В данной статье мы рассмотрим основные типы нейронных сетей (НС), применяемых для распознавания графических образов, и просто для логической обработки информации их методы обучения, а также алгоритмы внедрения НС в области медицины. Рассмотрим возможность использования искусственных нейронных сетей для обработки данных электрокардиограмм с целью выявления сердечных патологий.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, кардиограмма, информационные технологии, медицина.

### Введение

Развитие общества в современный период, характеризуется мощным воздействием на него информационных технологий, которые проникли во все сферы человеческой деятельности. Лидирующие позиции по внедрению компьютерных технологий являются архитектура, машиностроение, образование, сфера банковских услуг и с опозданием медицина.

Использование современных информационных технологий в области здравоохранения, значительно упрощают работу специалистов, тем самым их внедрение в большинстве случаев бывает весьма удобным, а порой просто необходимым. Благодаря этому медицина приобретает совершенно новые черты, и позволяет избавиться от человеческого фактора, в некоторых важных областях. Одним из важнейших аспектов для своевременного оказания медицинской помощи является быстрое и точное получение информации о состоянии здоровья пациента, которую можно получить, используя технологии нашего времени. В результате рассмотрения большого количества материала по внедрению информационных технологий в области медицины, можно сделать выводы о том, что в итоге информатизации медицинских процессов, повышается общий уровень здравоохранения.

При рассмотрении и анализе большого количества информации встречались различные, и достаточно новые методы цифровой радиологии и диагностики, а так же их интеграция в информационные структуры современного ЛПУ и телемедицинские системы. В различных источниках приводятся новые отечественные разработки в области цифровой маммологии и анализа, которые участвуют в построении комплексных информационных и телемедицинских систем. Нашей целью является обсуждение некоторых перспективных направлений исследований, и установление области, в которых нейросетевые технологии будут использоваться наиболее эффективным способом. Но так как нашей задачей является рассмотрение, и внедрение нейросетевых технологий в область электро-энцефалографии, необходимы более обширные знания.

## Нейронные сети и их применение

Искусственная нейронная сеть – набор математических и алгоритмических методов для решения широкого круга задач. Сеть обрабатывает входную информацию и в процессе изменения своего состояния во времени формирует совокупность выходных сигналов.

Следующим этапом мы должны ознакомиться с определенными источниками, в которых подробно описывается построение и обучение нейронных сетей в различных сферах деятельности. Для того чтобы получить наиболее эффективное решения нашей проблемы, нужно понять, какие данные будет анализировать нейросеть. На рис. 1. представлена структура нейронной сети, которая необходима для решения нашей задачи.

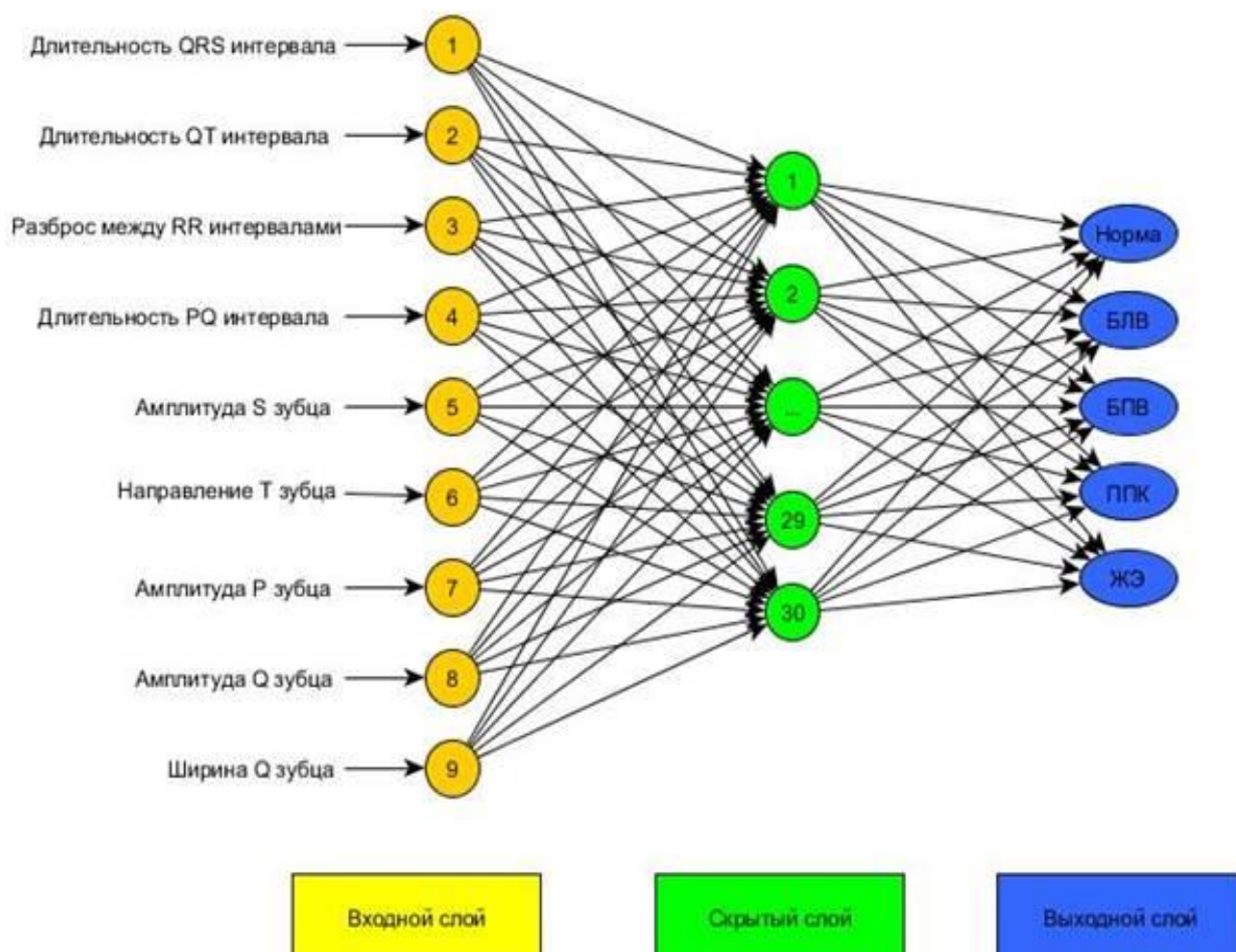
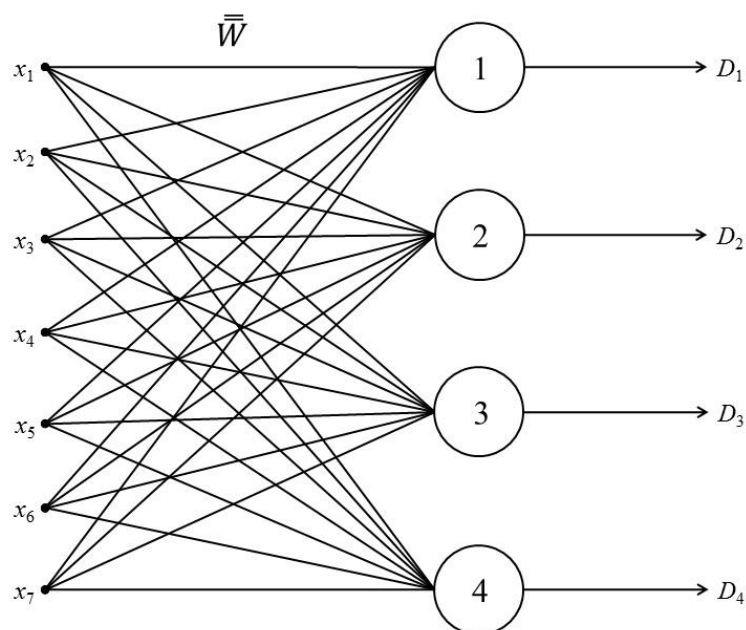


Рисунок 1. Структура нейронной сети

Для интеллектуального анализа данных наиболее подходящими вариантами будут нейронные сети Кохонена, отличительной чертой которых является слой из адаптивных линейных сумматоров, а так же и нечеткие нейронные сети. Пример структуры сети Кохонена представлен на рис. 2.



**Рисунок 2. Структура нейронной сети Кохонена**

Также стоит рассмотреть целый класс нейронных сетей – модульные нейронные сети. Их особенность состоит в том, что несколько независимых друг от друга нейронных сетей, контролируют некоторого посредника, который в свою очередь обрабатывает все входные сигналы, и отдает на выход значения всей сети, также стоит отметить, что данная нейронная сеть имеет ядерную организацию. Отличительной особенностью ядерных нейронных сетей является то, что рецепторные поля отдельных ядер не пересекаются между собой, поэтому каждое нейронное ядро можно рассматривать как нейронный модуль простейшей структуры, а всю нейронную сеть как вариант модульной сети.

Но нас в большей степени интересуют нейронные сети для распознавания графических образов. Для решения таких задач, наиболее подходящими являются сети Хемминга, которая представлена на рис.3., и сверточные нейронные сети. Сеть Хемминга – это трехслойная нейронная сеть с обратной связью, а количество нейронов во втором и третьем слое равно количеству классов в классификации.

Сверточная сеть – это сеть без обратных связей и принципиально многослойна. Существенным достоинством сети Хемминга является то, что она не требует трудоемких вычислительных процедур для своего обучения хоть и менее адаптирована к изменению ракурсов и размеров изображения. Одной из новейших сетей по распознаванию образов является капсульная нейронная сеть. Главными преимуществами архитектуры данной сети является существенное снижение размеров выборки для обучения, а также повышение точности распознавания и устойчивость к различным видам атак, таких как «белый ящик». Основным нововведением капсульных нейронных сетей является наличие так называемых капсул — элементов, которые являются промежуточными единицами между нейронами и слоями, представляющих собой группы виртуальных нейронов, которые отслеживают не только отдельные детали изображения, но и их расположение друг относительно друга.

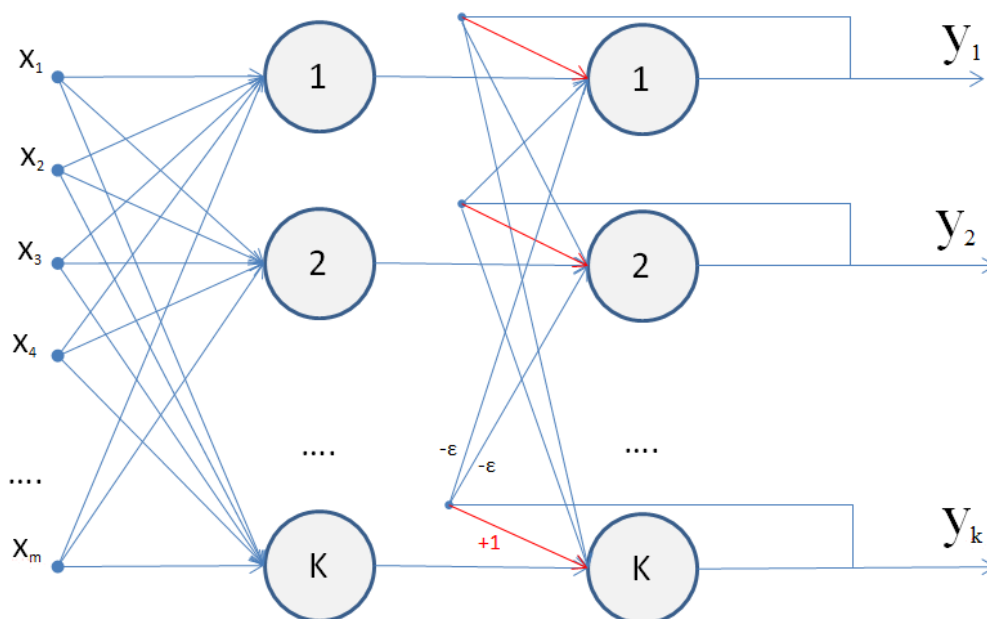


Рисунок 3. Структура сети Хемминга

### Электрокардиография

И теперь мы плавно переходим к конкретной проблеме, которую нам стоит решить, а именно применение нейронных сетей в распознавании результатов электрокардиограмм, что представляют из себя графики определенных случайных функций, то материал, рассмотренный ранее, был очень полезен, собственно после ознакомления, можно понять суть работы нейронной сети с графическим материалом. Но прежде чем связывать информационные технологии со здравоохранением, следует разобраться в проблеме с точки зрения медицины.

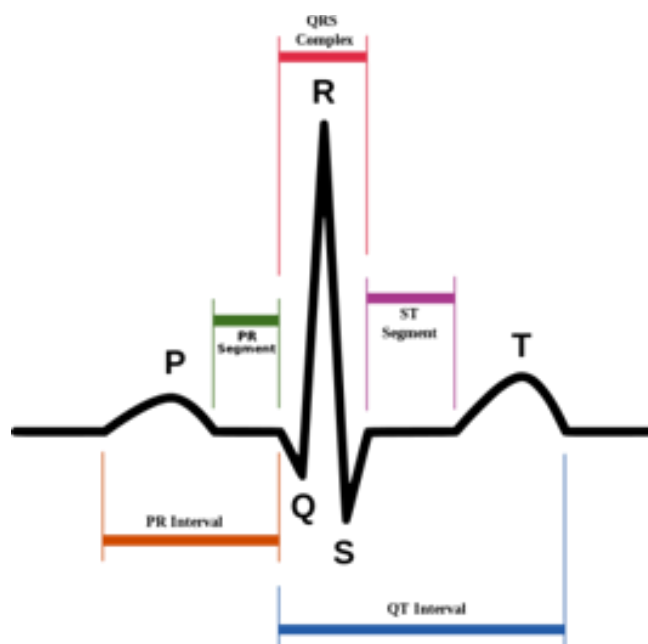


Рисунок 4. Эталонная ЭКГ и основные элементы

Электрокардиография до сих пор остается наиболее распространенным методом функциональной диагностики в кардиологии. В то же время существующие компьютерные средства анализа и интерпретации ЭКГ все еще не обеспечивают требуемую достоверность результатов диагностики. Изображение эталонной ЭКГ и обозначение ее элементов показано на рис. 4., но стоит отметить, что на реальных ЭКГ нет четких границ между информативными фрагментами, это и затрудняет их автоматическое распознавание.

Существует множество моделей для обработки результатов электрокардиографических приборов, в том числе и математические. При помощи электрокардиограммы, можно определить большое количество признаков различных заболеваний. Исследования показали, что ЭКГ-сигнал несет в себе информацию о функционировании как сердца, так и всего организма в целом. Например, на основе ЭКГ-сигнала можно определить уровень глюкозы в крови человека. Так же по данным электрокардиограммы можно не только оценивать состояние больного, но и прогнозировать продолжительность жизни, в зависимости от заболевания. Такие прогнозы тоже строятся при использовании информационных технологий. Одним из вариантов решения этой задачи является тестирование различных систем на общей базе исходных данных, для чего очень удобно использовать общедоступную базу репозитория UCI. В частности, во многих развитых странах мира ишемическая болезнь сердца (ИБС) относится к актуальным проблемам здравоохранения. Несмотря на значительные успехи и улучшение результатов лечения коронарной болезни сердца, достигнутые за последние десятилетия, ИБС по-прежнему занимает ведущее место в структуре заболеваемости и смертности, а решение этой проблемы тоже зависит от правильного анализа электрокардиограммы.

В рамках нашей работы по разработке математически и физиологически корректного комплекса алгоритмов расчета оценок спектральных показателей variability сердечного ритма (VSR) человека с целью подготовки базы коротких записей ЭКГ для дальнейшей математической обработки была проведена оценка показателей VSR в эпидемиологической выборке условно здоровых лиц и были определены пределы их нормальных колебаний, данные исследования помогут при анализе и постройке алгоритма исследования R-зубца.

Основным элементом на кардиограмме является так называемый «R-зубец», поэтому этот участок нужно рассмотреть наиболее детально, и сравнить алгоритмы его обнаружения на электрокардиограмме.

В статье все известные алгоритмы разделены на следующие основные классы:

- нейронные сети;
- волновое преобразование;
- частотно-временные алгоритмы.

При написании статьи рассматривались особенности построения современных приборов анализаторов аритмий. Предлагалось использовать спектральный анализ R-зубца электрокардиограммы для более широкого списка диагностируемых аритмий сердца. Так же описывались методики исследования для определения порогов принятия решения для различения групп сигналов с нормальной и нарушенной проводимостью электрического импульса. Из этого уже можно выявить некоторую закономерность ритма сердца и динамики амплитудных значениях R-зубца.

## Применение НС в медицине

Теперь, имея минимальный набор знаний в области здравоохранения, можно говорить о внедрении информационных технологий. На основе полученных результатов от медицинских центров, где внедрялись анализаторы на основе нейронных сетей, мнения врачей расходятся с показаниями «машин». По этим расхождениям создается таблица признаков, а затем корреляционная матрица, которая позволяет выбрать наиболее важные признаки нарушений для их последующего использования в качестве входных сигналов для обучения нейронной сети.

Использование аппарата вейвлет-анализа позволяет получать подробную информацию, находящуюся как во временной, так и в частотных областях. ИНС с их высокой способностью извлекать требуемые значения из сложных или неточных предварительных данных, часто используются в качестве классификатора для распознавания образов. Первоначальные данные, которые используются при проверке системы, представляют собой цифровые сигналы внутрисердечных ЭКГ. Таким образом, предложен подход, который позволяет решить задачу автоматического распознавания сердечно-сосудистых нарушений. Это увеличивает эффективность принятия решения для постановки диагноза в различных стадиях и формах представления ЭКГ.

### Заключение

В подведение итогов, стоит отметить, что проблема автоматизированного анализа электрокардиосигнала связана с необходимостью профилактической (ранней) диагностики сердечнососудистой системы у большого числа людей для выделения группы риска. Для этой цели ученые провели анализ методологии разработки систем распознавания, обосновали выбор технологии нейронных сетей. В результате были созданы обучающие и тестовые база данных реальных ЭКГ образов, разработаны и исследованы нейросетевые блоки распознавания отклонений от нормальной формы ЭКГ, способствующие совершенствованию методов обработки и анализа медицинских сигналов.

Основной проблемой на данный момент, является отсутствие готовых решений. Это объясняется множеством причин, основными из которых являются, значительные расхождения результатов врачей и НС, а также подвержение опасности жизни и здоровья пациентов.

Представленные в данной статье аспекты электрокардиокомплексов аппаратно - программного комплекса обработки и нейросетевого анализа ЭКС расширяют возможности использования его в системах автоматизированного анализа функционального состояния сердечнососудистой системы, при проведении массовых экспресс исследований с целью выявления «групп риска», а также в программах автоматизированной расшифровки суточной записи ЭКГ.

### Библиографический список

1. **Новикова, Н.М.** Моделирование нейронной сети для распознавания изображений на основе гибридной сети и самоорганизующихся карт Кохонена / Н.М. Новикова, В.М. Дуденков // ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», 2015. 31-34с



2. **Загидуллин, Б.И.** Нейросетевая модель диагностики инфаркта миокарда / Б.И. Загидуллин [и др.] // ГБОУ ВПО Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, 2014. 51-54с
3. **Максимушкин, В.В.** Сравнительная оценка вычислительной сложности обучения искусственной нейронной сети с жестким ядром и сети с классической структурой / В.В. Максимушкин, А.А. Арзамасцев // Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 2016. 190-197с.
4. **Старостенко, Н.Е.** Сравнение нейронной сети Хемминга и свёрточной нейронной сети в задачах распознавания образов // Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2014. 288-289с.
5. **Зубричев, Н.В.** Новый вид нейронной сети для распознавания изображений - капсульная нейронная сеть // Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 2017. 106-108с.
6. **Мустафаев, А.Г.** Использование нейросетевых методов для автоматического анализа электрокардиограмм при диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы // Кибернетика и программирование, 2019. 66-74с
7. **Луценко, Е.В.** Прогнозирование продолжительности жизни пациентов, перенесших сердечный приступ, по данным эхокардиограммы на основе базы данных репозитория UC11 // Кубанский государственный аграрный университет, 2014. 1282-1328с.
8. **Рослякова, А.В.** Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения r-зубца электрокардиосигнала / А.В. Рослякова, П.Г. Чупраков // Вятский Государственный Университет Кировская Государственная Медицинская Академия, 2014. 29-35с.
9. **Константинов, Э.С.** Анализ электрокардиограмм с использованием нейронных сетей и вейвлет-преобразования // Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2018. 155-157с

**D.N. Letyushov, I.V. Lesnov**

## **THE USE OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN THE ANALYSIS OF ECG RESULTS**

Nizhny Novgorod state technical university R.E. Alekseeva

In this article we will consider the main types of neural networks (NS) used to recognize graphic images, and simply for the logical processing of information, their training methods, as well as algorithms for the implementation of NS in the field of medicine. Consider the possibility of using artificial neural networks to process electrocardiogram data in order to identify cardiac pathologies.

**Key words:** neural network, cardiogram, information technology, medicine.

## МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ ОСД

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

С появлением мощных вычислительных аппаратных комплексов появилась возможность создавать продвинутые искусственные интеллекты, которые существенно упрощают жизнь человека. Одной из задач искусственного интеллекта, является обработка и анализ текста. На данный момент существуют вариативное количество топологий нейросетей, позволяющих решать данную задачу, но каждая топология имеют свои ограничения и недостатки. В статье рассматривается исследование модель знаний ОСД и возможность использования ОСД сети для смыслового анализа текстов.

**Ключевые слова:** анализ текстов, искусственный интеллект, модели знаний.

## Введение

Технологический прогресс не стоит на месте. С появлением мощных вычислительных аппаратных комплексов появилась возможность создавать продвинутые искусственные интеллекты. Использование нейросетей дало возможность создавать системы способные отвечать на вопросы [8]. Однако данные системы не способны давать точные ответ на вопрос при условии отсутствия точной информации в базе знаний. При отсутствии точной информации они «обобщают» знания, дают ответ, но данная информация вряд ли может считаться ответом с точки зрения человеческого логического восприятия[8]. Данную проблему, возможно, решить с помощью ОСД сетей.

ОСД аббревиатура означает: О-объект, С-свойство, Д-действие. ОСД– модель знаний, описывает взаимодействие объектов в тексте.

За объект модели принимается - имя существительное, за свойство - имя прилагательное, за действие – глагол.

Данную модель знаний можно представить в ориентированном и неориентированном графе. Вершина графа – объект, рёбра или дуги - действие. Свойство - это дополнительный элемент системы, который может быть связан с множеством объектов (рис.1).

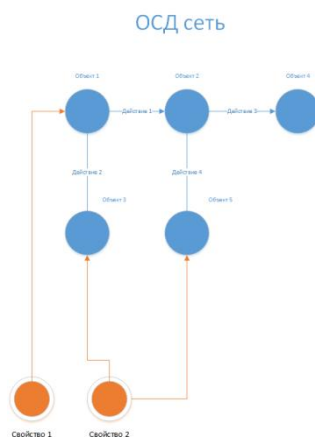


Рисунок 1. Модель ОСД сети

Для обеспечения возможности навигации по данной модели необходимо внедрить вес объекта, бинарную переменную обхода.

Постановка математической задачи:

Необходимо найти маршрут в ориентированном или неориентированном графе, зная начальную и конечную вершину.

Общий алгоритм работы для ОСД сети:

1. Запустить расчет весов объектов из начального объекта;
2. Запустить расчет весов объектов из конечного объекта;
3. Поиск маршрута («создание мысли») с использованием весовых коэффициентов объектов.

Запустить расчет весов объектов из начального объекта:

1. Начальному объекту устанавливается вес равный 1.
2. Всем последующий объектам присвоить вес (рис. 2). Где  $W_{\text{последующий}}$  установленный вес – вес который будет установлен на последующий объект,  $n$  – количество последующих объектов, имеющих связь с текущим объектом (рис. 3).
- 3.

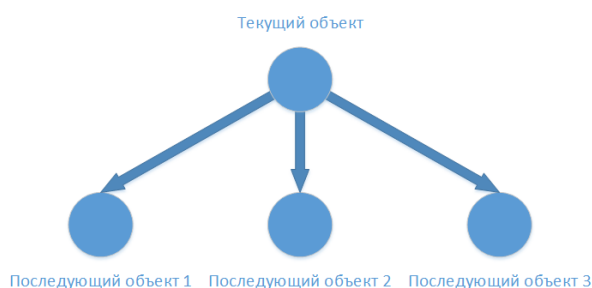


Рисунок 2. Поясняющий рисунок

$$W_{\text{последующий установленный вес}} = \frac{W_{\text{текущий}}}{n}$$

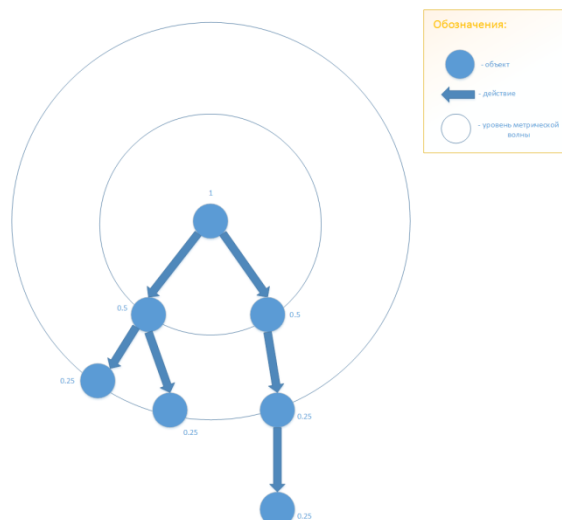


Рисунок 3. Пример работы алгоритма из начального объекта

Запустить расчет весов объектов из конечного объекта:

1. Конечному объекту устанавливается вес равный 1.

2. Всем последующий объектам присвоить вес(рис. 2). Где  $W_{\text{последующий}}$  установленный вес – вес который будет установлен на последующий объект,  $W_{\text{текущий}}$  – вес текущего объекта,  $n$  – количество последующих объектов, имеющих связь с текущим объектом (рис. 4).

$$W_{\text{последующий установленный вес}} = \left( \frac{W_{\text{текущий}}}{n} + W_{\text{последующий}} \right) / 2$$

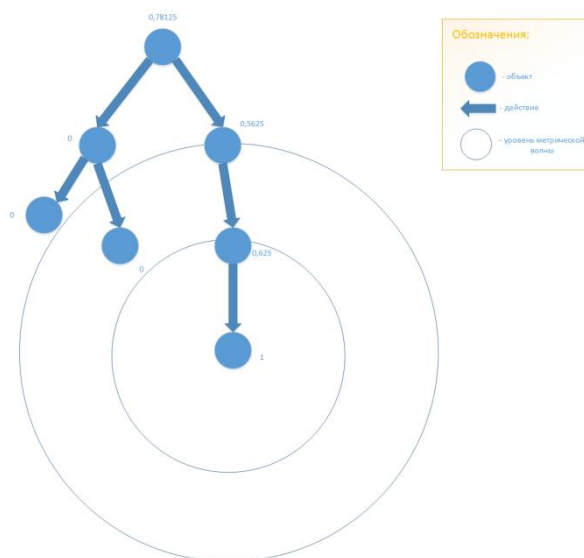


Рисунок 4. Пример работы алгоритма из конечного объекта

### Поиск маршрута

Начинаем проход от начального объекта и выбираем тот последующий объект, чей вес будет больше других, до тех пор пока не найдём конечный объект.

### Исследование результатов работы

Программа читает два документа, создаёт ОСД сеть. Пользователь задаёт вопрос сети «Что общего между “Саша” и “двигатель”». В результате программа выдаёт логический вывод, и возможные варианты.

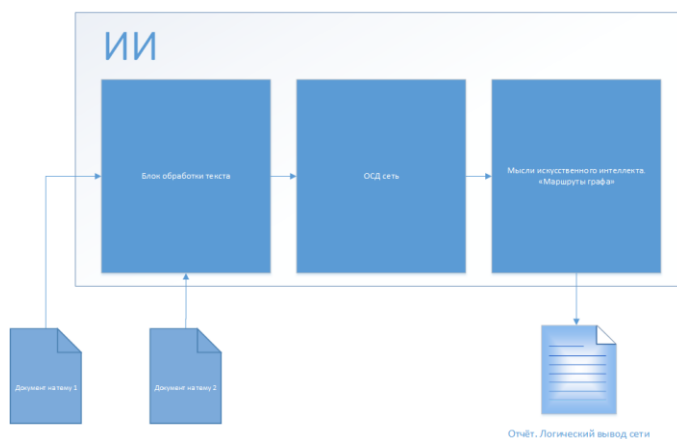


Рисунок 5. Схема работы искусственного интеллекта

На данный момент функцию обработку текста берёт на себя эксперт, ОСД сеть задаётся в программу, так как в данной научной работе исследовалась только модель знаний ОСД.

Решения задачи логического вывода. Смысловое наложение знаний.

**Документ 1.** Саша ехал на машине в деревню, когда начался дождь. Его омрачала недописанная научная работа. Дождь только усиливал его грусть.

**Документ 2.** У машины ломается двигатель, если не заливать в него масло. Данный факт знает каждый автолюбитель.

Пример ОСД сети

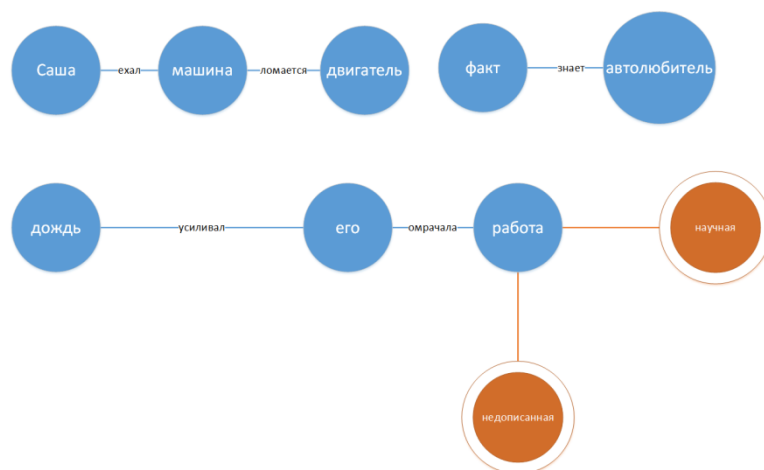


Рисунок 6. Пример ОСД сети

Тогда по модели ОСД (ОРА – ObjectPropertyAction) может сделать логический вывод:

Если на вход поданы мысли «Саша» и «двигатель».

Саша – (ехал) – машина – (ломается) – двигатель.

Коэффициенты весов объектов:

Саша(0,875) машина(0,75) двигатель(1)

### Заключение

На данный момент разработана описанная программа. Есть методы и способы расширения и улучшения модели ОСД. Также модель имеет преимущества перед другими технологиями в этой области.

Модель знаний ОСД можно использовать не только для текстовых данных, но и для аудио и графических материалов. Также можно выдвинуть предположение, что данная модель может корректироваться с помощью статистического аппарата. Статистика по объектам, взятая других источников, и возможность использования заданных вероятностных распределений могут существенным образом повлиять на последующие результаты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00926.*

### Библиографический список

1. **Бронфельд, Г.Б.** Инженерные основы моделей знаний: учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. - Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2016. 139 с.
2. **Бронфельд, Г.Б.** Основы искусственного интеллекта : учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд. - Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014. – 253 с.
3. **Ландэ, Д.В.** Основы интеграции информационных потоков / Ландэ Д.В. //Информационные потоки.-2006. - 240 с.
4. **Комарцова, Л.Г.** Нейрокомпьютеры: учебное пособие для вузов / Л.Г. Комарцова, А.В, Максимов. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 210-213.
5. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е издание, исправленное.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ. – С. 6 –22.
6. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
7. **Тарков, М.С.** Нейрокомпьютерные системы: учебное пособие / М.С. Тарков. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лабораториязнаний, 2006. – 142 с.
8. **Круглов, В.В., Борисов В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотип. / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002.–322 с.

**A.S. Makarov**

## OPA KNOWLEDGE MODEL

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:**This article is dedicated to a program that tests the OPA knowledge model.

**Design/methodology/approach:** The design of the program closely follows object-oriented programming paradigm, exposing user friendly interface to user and extensible API to developer.

**Findings:**The program analyzes the text and makes a logical conclusion.

**Research limitations/implications:** The program architecture is flexible enough to provide engineers with a convenient way to create new features in order to extend system functionality.

**Originality/value:**The originality of the program is determined using the OPA model.

**Key words:** text analysis, artificial intelligence, knowledge models.

Д.А. Шишов

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПО АРХИТЕКТУРЕ БАЗ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Проведено исследование способов интеграции различных по архитектуре баз данных. В работе представлено описание алгоритма интеграции данных. Представлены результаты интеграции структуры базы данных. Представлен вариант промежуточного обработчика.

**Ключевые слова:** базы данных, интеграция, модели данных, метаданные, программа.

### Введение

Метод интеграции применяется при слиянии данных двух различных баз данных. И в то же время интеграция несет характер переноса данных между хранилищами данных. Существует основные три уровня интеграции данных. Это физический, логический и семантический уровни. Физический уровень подразумевает, перенос данных безописательной схемы из нескольких источников. Это является популярным вариантом при решении таких задач, как перенос данных без изменения их схемы.

В статье рассматривается интеграция на физическом уровне. Объектом исследования будет служить методика интеграция данных из PDM системы в SAP систему на действующем машиностроительном предприятии.

### Для чего нужна интеграция на предприятии

В настоящее время большинство предприятий становятся цифровыми. Это означает, что процессы, которые ранее были не автоматизированы, становятся в приоритете и переходят в разряд автоматизируемых. Например, переход с рукописных носителей на цифровые. Это касается абсолютно всех промышленных областей, так как условия современного успеха в извлечение максимальной прибыли. Прибыль - основной мотивирующий фактор, который заставляет внедрять новые технологии в промышленное производства продукции. Все меры направлены на достижение ключевого статуса на рынке. И цифровая сфера играет очень важную роль при реализации крупных проектов.

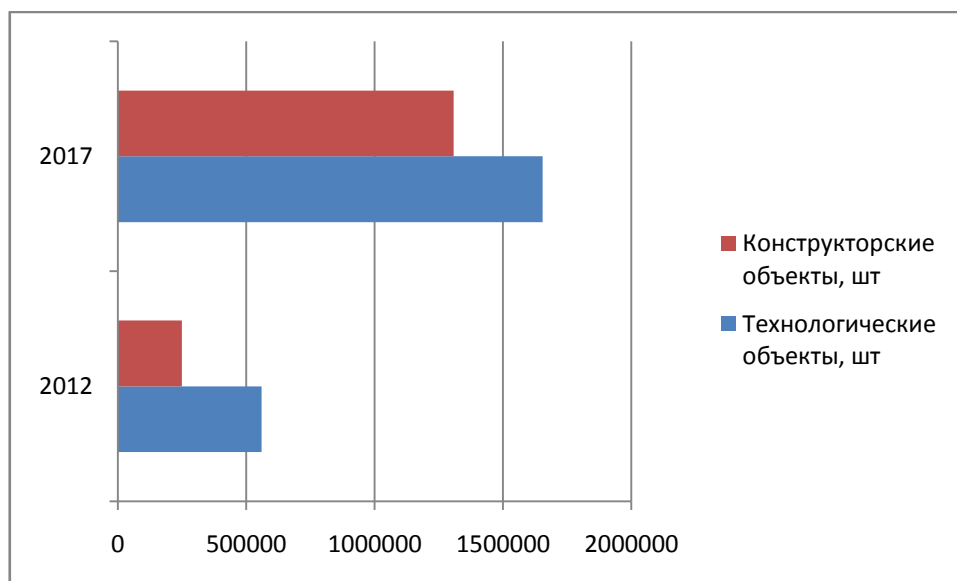
И сейчас сталкиваемся с такими системами как:

1. PDM (Product Data Management) – система, которая управляет жизненным циклом изделия;
2. ERP (Enterprise Resource Planning) – Планирование ресурсов предприятия;
3. CAD (Computer Assisted Detection) – Системы автоматического проектирования.

Это основные три «кита», которые входят в общий блок PLM (Product Lifecycle Management) – жизненный цикл продукции, изделия.

Если рассматривать каждый блок в отдельности, то они отвечают за строго определенные обязанности. Соответственно, каждый отличается от предыдущего. И интеграция данных

может затрагивать каждый из блоков. Интегрируемая информация может доходить до физического и даже семантического уровня интеграции. Объемы информации для предприятия, характерны в режиме постоянного развития. На рис.1 показана приблизительная статистика создания объектов в PDM системы.



**Рисунок 1. Схема приблизительной оценки развития предприятия по целочисленной оценке созданных объектов в системе IPS**

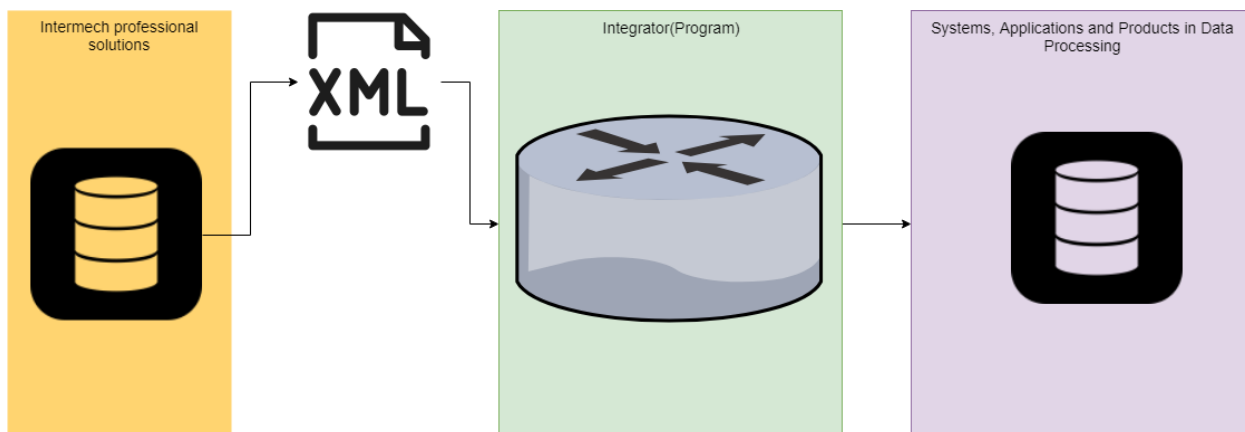
Исходя из показателей, можно дать оценку уровня развития предприятия. И определить, как цифровая автоматизация помогает в разработке изделий. Скорее всего, существенный прирост обусловлен рядом оптимизаций в каждой из систем. А именно, ключевой вклад в оптимальное и слаженное взаимодействие между системами.

### **Оценка оптимизации путем интеграции данных**

Прежде чем заниматься оптимизацией, необходимо произвести оценку эффективности всех планируемых мероприятий. Для расчетного примера возьмем интеграцию данных в PDM системе «Галактика».

Задача интеграции в «Галактику», была акцентирована на пороге перехода предприятия в разряд цифрового. На момент создания существовала проблема переноса из различных источников, в подавляющем большинстве это файлы Excel и рукописные архивы (порядка около 4 головных изделий или 8500000 объектов переноса) заняла около 3-х лет. Было принято решение вести программу «Интегратор». Программа была написана на языке C, с использованием модели интеграции FlatFiles. Технология является наиболее универсальной, так как при интеграции используются промежуточные файлы. На рис. 2 представлена схема интеграции данных FlatFiles. XML начал вызывать огромный интерес и поддержку с того момента, как о нем было впервые заявлено в 1996 году. Он обеспечивает стандартный способ кодирования содержания, обеспечивая гибкий способ создания структур данных. В XML для разметки содержания на основе правил, составляемых разработчиком документа, используются теги. Этот набор правил называется описанием типа документа (Document Type Definition, DTD), и он позволяет разработчикам, применяющим XML, размечать различные документы.

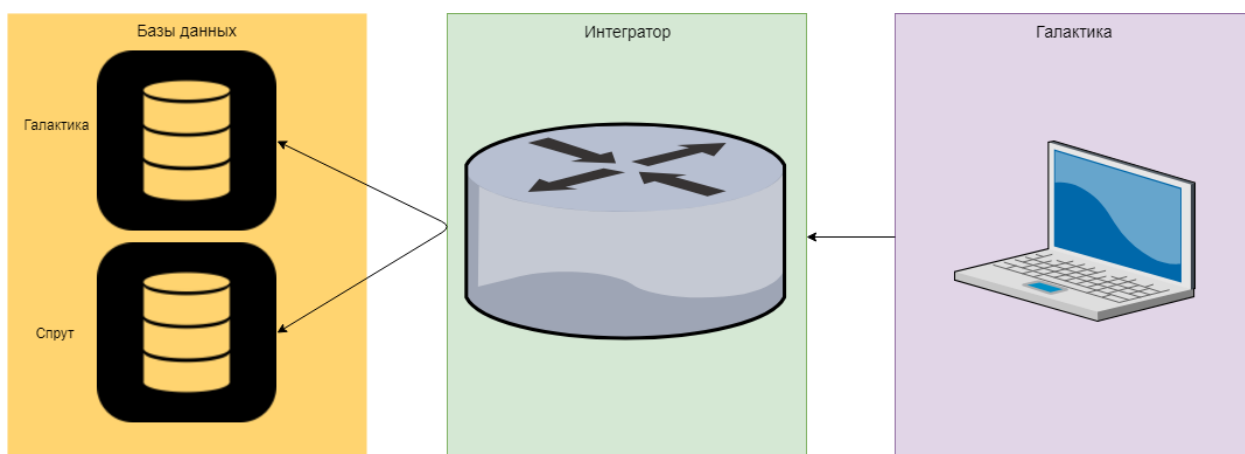




**Рисунок 2. Схема интеграции данных по технологии Flat Files**

Интегратор в свою очередь, строит ассоциацию объектов и атрибутов, для записи в таблицу. После обработки формируется SQL команды для записи в базу данных. Фактически задача интеграции сводилось к правильному заполнению xml файла.

Задача интеграции в последующем усложнилась. Потребовалось интегрировать данные Галактики с системой СПРУТ. Для данной задачи первым этапом потребовался перенос данных в режиме реального времени для оптимизации. Это метод означает, что при изменении данных в базе Галактика, параллельно изменится информация в базе СПРУТ. Этот вид интеграция относится к SOAP (Simple Object Access Protocol). Метод является наилучшим решением, так как интеграция производится в реальном времени. По трудозатратам метод наиболее высок, чем его предшественники FlatFile. И суть метода заключается в парсинге входящих запросов на базу Галактика через интегратор, параллельно формируется запрос и на базу СПРУТ. Схема работы предоставлена на рис. 3.



**Рисунок 3. Схема параллельной интеграции данных по технологии Simple Object Access Protocol**

Процедура реализации достаточно сложна, как правило, ей занимается разработчик самих программных продуктов, так как необходимо знать входящие запросы к базе данных.

## Экспериментальный алгоритм интеграции базы данных

В основе экспериментального метода заложен принцип интеграции с использованием фрагмента из технологий Flat Files, Simple Object Access Protocol, и включающий в себя поиск на семантическом уровне. Метод направлен на унификацию поиска и извлечения информации из базы данных, для последующей передачи при помощи технологии Flat Files.

Основной проблемой, которая предстанет перед нами, это проблема больших данных (Big Data). И для обработки необходимо будет выявить самый быстрый по времени обработки алгоритм. Для этого будут рассмотрены несколько путей развития, и выявлен наилучший по наименьшему времени. Алгоритм будет затрагивать только интегратор. Интегратор представлен в виде программы.

**Инициализация.** Процесс инициализации необходим для подготовки основных компонентов. Основные компоненты включают в себя подключение к базам данных, а так же подготовку промежуточных файлов, которые необходимы для переноса. Данная процедура необходима на начальном этапе, что бы избежать возникновения ошибок. Входные параметры оцениваются и запоминаются.

**Считывание данных.** Считывание данных происходит в несколько этапов. Производим анализ схемы данных и по заданным параметрам на входе анализируем структуру данных. Поиск будет подчиняться формуле:

$$\pi \text{RowsName}(\sigma \text{ColumName} = x(\text{TableName.ColumName})),$$

где  $\pi$  - рассматривается как Select, Rows Name – название столбцов,  $\sigma$  – оператор Where, ColumName = x условие для поиска, Table Name.Colum Name источник для поиска.

Формула описывает основную логическую структуру, по которой будет выполняться поиск. Для полноценного и универсального поиска нужно добавить структуру считывания по всем таблицам базы:

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) \in A,$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  множество таблиц, а схема данных в базе данных

$$(b_1, b_2, \dots, b_m) \in B,$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_m$  множество колонок, В схема данных о строках в базе данных

$$(d_1, d_2, \dots, d_f) \in D,$$

где  $d_1, d_2, \dots, d_f$  множество временных таблиц, D схема временных данных в базе данных.

В конечном итоге мы разделили поиск на несколько направлений, осталось объединить в одну общую функцию:

$$D \in (A \cap (B \sigma (\pi \text{RowsName} (\sigma \text{ColumName} = x \text{ TableName.ColumName}))))$$

Формула эквивалента SQL запросу. В результате запроса мы получим таблицу и значение искомое. Представленная структура необходима для корректного связывания запроса и полученного результата в интеграторе. Все данные будут храниться во временной таблице D, на базе данных.

**Парсинг информации.** Для выделения информации из общего массива информации существует два варианта решения.

Путем сопоставления значений заранее подготовленного xml файла с сопоставленными данными из базы 1 к базе 2.

Имеет вид: <Attribute = ID\_атрибут\_база\_1; Attribute = ID\_атрибут\_база\_2 >. Поиск сопоставляет правила заложенные в интеграторе и подготавливает конечный файл с правилами базы 2.

Второй вариант затрагивает метод SOAP, а именно формирование запроса напрямую к базе 2. Это означает, что промежуточный файл отсутствует. Что теоретически позволяет сократить время интеграции. При выполнении интеграции данных тип Big Data, определяет основной параметр оптимизации всего процесса.

### Исследование результатов работы алгоритмов

Исследование производилось на облегченных и заполненных тестовых базах. Интеграция производилась между IPS (PDM система) и SAP (ERP системой). Для тестирования будет интегрироваться объект из IPS «Контролируемый параметр» с атрибутами.

Объект «Контролируемый параметр» необходим для оценки в операциях «Контроль». Данные значения задает технолог в системе, а исполняет контролер на производственном участке. На данный момент таких объектов насчитывается около 900 000. Для проверки были выгружены в тестовой базе 15 500 объектов при скорости обработки до 5 объектов в секунду. На рис. 4 показаны результаты интеграции с использованием разных алгоритмов.

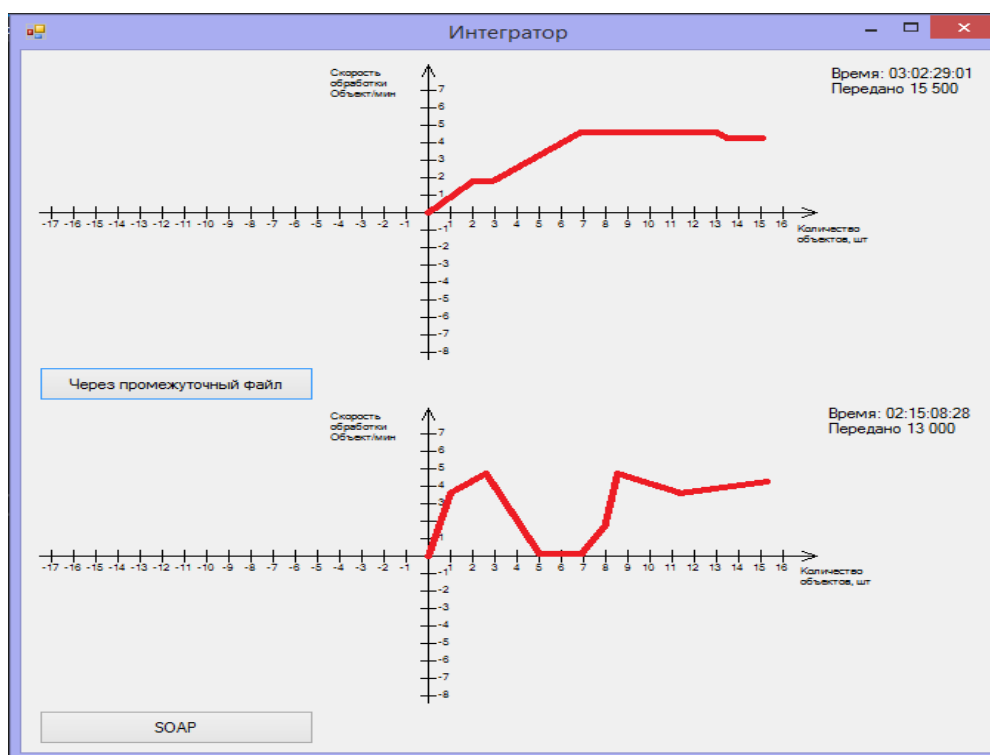
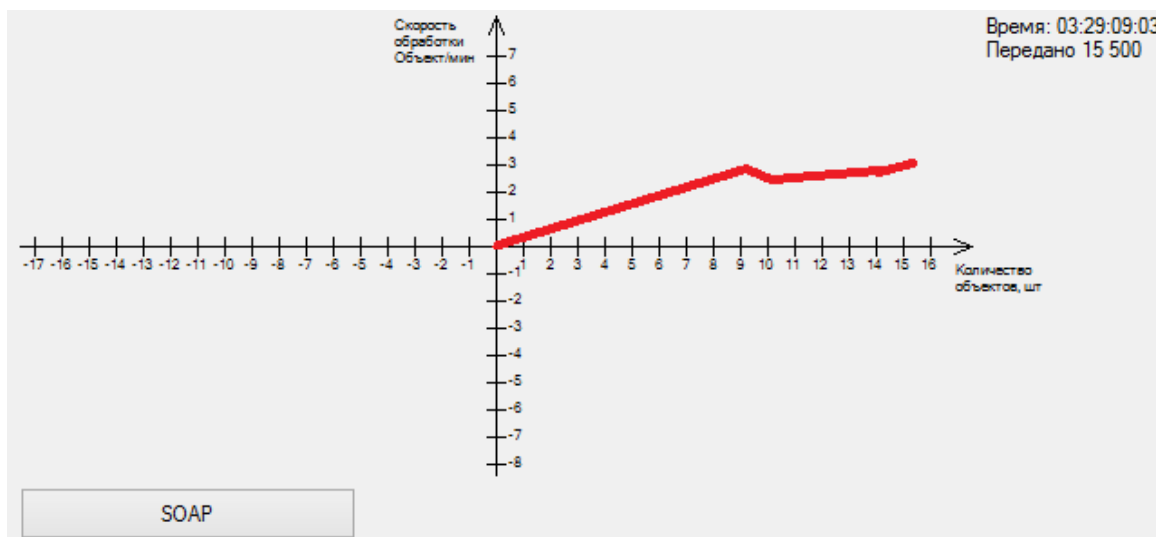


Рисунок 4. Результаты проверки выполнения алгоритма двумя методами

При передаче через промежуточный файл, наблюдается положительный график. Что говорит о безошибочной работе интеграции. При этом время выполнения 3 дня 2 часа 29 минут. Скорость обработки достигала 5 объектов/мин.

Интеграция через SOAP запросы показала обрывистый график, что говорит о возможной проблеме алгоритма, возможно скорость слишком велика. Передача заняла меньше времени, чем в прошлом случае 2 дня 15 часов 08 минут. При этом скорость достигала максимум 5 объектов/мин, но наблюдались сбои. Возможно, характеристики используемого компьютера не позволяют производить вычисления с такой скоростью. После снижения скорости обработки до 3 объектов/мин, график принял следующую форму, представлено на рис. 5.



**Рисунок 5. Результаты проверки выполнения алгоритма SOAP после оптимизации**

Можно сказать, что при регулировке скорости обработки, выгрузились все объекты, но за более длительное время. За 3 дня 29 часов 09 минут выгрузились 15 500 объектов.

### Заключение

В результате тестирования двух методов, можно сказать, что при использовании первого метода происходит наиболее стабильная выгрузка. Второй метод показал себя не совсем с плохой точки зрения, так как при введении некоторых корректировок, возможно, добиться наиболее стабильных результатов и меньшей по времени выгрузки. Так как нужно учитывать, что в первом методе используется значительное количество данных для промежуточного хранения. Во вторых метод сохраняет, только запрос, что требует меньших затрат памяти.

### Библиографический список

1. **Шилина, М.Г.** BIG DATA, OPEN DATA как новые форматы информации: сущность, характеристики, особенности применения в журнализме // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Филология. 2015. № 3. С. 235-244.
2. **Волкова, Ю.С.** Большие Данные в современном мире // Концепт. Т. 2016. – №11. – С. 171-175.
3. **Батоврин, В.К.** Обеспечение интероперабельности - основная тенденция в развитии открытых систем / В.К. Батоврин, Ю.В. Гуляев, А.Я. Олейников // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2009. - № 5. - С. 7-15.
4. **Муратов, И.Н.** Обеспечение структурной интероперабельности информационных систем на основе метамodelей. Диссертация. - НИУМЭИ, 2003 [Электронный ресурс].

**D. A. Shishov**

## **A STUDY INTEGRATING DATA FROM DIFFERENT DATABASE ARCHITECTURE**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** the study of integration of different database architecture. The paper presents a description of the data integration algorithm. Presents the results of the integration of the database structure. A variant of the middleware is provided.

**Design / methodology / approach:** the study is based on two technologies. Flat File technology, which implies an intermediate file. And SOAP technology, which is based on real-time integration. The technology which combines these technologies in itself is presented.

**Findings:** the study revealed the best combination with Flat File technology. When combined with SOAP, there are positive trends, but the algorithm requires processing.

**Research limitations/implications:** the Study has a meaning in the study of data integration via SOAP technology.

**Originality/value:** Implementations of algorithms created during the research have shown good results problems and can be used in applied problems or for comparative analysis with new modifications of algorithms.

**Key words:** Databases, integration, data models, metadata, program.

## Секция 4. Информационная безопасность систем и сетей

УДК [001.8/.816/.817] + 001.92 + [371.315.5/.315.6/.335] +655.52

Л.М. Козубцова,<sup>1</sup> И.Н. Козубцов<sup>2</sup>

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

<sup>1</sup>Военный институт телекоммуникаций и информатизации,

<sup>2</sup>Научный центр связи и информатизации Военного института телекоммуникаций и информатизации, г. Киев, Украина

**Цель работы.** В статье проанализированы попытки решений задачи расчета кибернетической защищенности информационно-телекоммуникационной системы (ИТС). Установлено, что существующие на данное время решения не учитывают при расчете активного кибернетического влияния, а результат носит статический характер, который отображает состояние составных систем политики безопасности, чего недостаточно для оценки реального состояния. В результате этого возникла необходимость в разработке методики, которая бы обеспечивала расчет кибернетической защищенности ИТС по результатам активных кибернетических действий. Авторами предложена методика оценки кибернетической защищенности ИТС с возможностью прогнозирования последствий кибернетического влияния. Предложен математический аппарат методики, обеспечивающий расчет кибернетической защищенности ИТС для модели наихудшего варианта, так называемого наступления события угрозы нулевого дня.

**Практическое значение и применение.** Заключается в практической возможности определения уровня кибернетической защищенности с учетом активных кибер-влияний на стадии проектирования и эксплуатации ИТС.

**Научная новизна.** Предложено решение научно-практической задачи из расчета состояния кибернетической защищенности ИТС: информационно-телекоммуникационный узел связи в условиях преднамеренных действий угрозы нулевого дня.

**Ключевые слова:** методика, оценка, кибернетическая защищенность, информационно-телекоммуникационные системы, кибернетическое влияние.

#### Постановка задачи

**Постановка задачи формулируется следующим образом:** в условиях реальных деструктивных кибернетических влияний определить числовые значения кибернетической защищенности каждого компонента ( $K_j$ ) средства ( $Z_i$ ) ( $P_{kz}k_jz_i$ ) и каждого средства ( $Z_i$ ) ( $P_{kz}z_i$ ), а также информационно-телекоммуникационной системы (ИТС) в целом ( $P_{kz}итс$ ), см. рис. 1.



ные кибернетические влияния на ИТС отсутствуют  $F_{KB}=0$ . Другими словами, методики позволяют определить уровень достижения выполнения политики безопасности на ИТС, которая бы гарантировала защиту ИТС от кибернетических влияний с некоторой вероятностью, которая следовала до 1, что при условии отсутствия угрозы нулевого дня.

Таким образом, поза внимания выше перечисленных методик остается возможность вычисления (прогнозирование) оценки кибернетической защищенности информационно-телекоммуникационного узла связи специальных пользователей на некоторый момент времени  $t_{KB}$ , за которого на ИТС осуществляется активное кибернетическое влияние  $F_{KB} = 1$  в результате чего потерян некоторый актив ( $A_k$ ), или функциональность средств (сервисов)  $W_\Phi$ . Отсутствие в обращении понятий актив организации, потери актива, и отсутствие коэффициента функциональности средств (сервисов)  $W_\Phi$  не позволяет понять реального содержания методики оценки кибернетической защищенности ИТС, выстроить математический аппарат ее расчета, моделировать наихудшие варианты состояния кибернетической защищенности ИТС в результате наступления угрозы нулевого дня.

### Цель исследования

Усовершенствование методики оценки кибернетической защищенности ИТС с учетом активных кибернетических влияний.

### Результат исследования

Входные данные:

- частичные индикаторы ( $I_{чкз}$ ) кибернетической защищенности политики безопасности;
- количество компонентов ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) системы;
- количество средств ( $Z_i$ ) ИТС;
- взвешивающий коэффициент каждого компонента ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС –  $W_{K_j Z_i}$ ;
- взвешивающий коэффициент каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС –  $W_{Z_i}$ ;
- коэффициенты функциональности средств (сервисов)  $W_\Phi$ ;
- время ( $t_0, t_{KB1}, t_{KBn}$ );

Необходимо найти:

- показатель  $P_{кзjzi}$  – кибернетической защищенности каждого компонента ( $K_j$ ) средству ( $Z_i$ ) ИТС;
- показатели  $P_{кzzi}$  – каждого средства ( $Z_i$ ) системы;
- показатель  $P_{кзИТС}$  – всей ИТС.

Приняты ограничения:

- время  $t_0$ , - момент времени, когда кибернетическое влияние отсутствует;
- время  $t_{KB1} \dots t_{KBn}$  – момент времени фиксации кибернетического влияния.

В данной усовершенствованной методике используются следующие методы испытаний: экспериментально-расчетный, сравнительный.

### Этап 1. Подготовительный

1) сложную ИТС нужно разложить на: средства ( $Z_i$ ), а средства на ее компоненты ( $K_j$ );



2) экспертная группа уполномоченных специалистов кибернетической безопасности назначает следующие взвешивающие коэффициенты:

- для каждого средства ( $Z_i$ ) сложной системы ( $W_{Z_i}$ );
- каждого компонента ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС –  $W_{K_j Z_i}$ ;
- коэффициенты функциональности средств (сервисов)  $W_{\Phi_i}$ .

Коэффициент функциональности средств (сервисов)  $W_{\Phi}$  принимает значение  $[1, 0]$  (табл. 1).

**Таблица 1**

**Пример подхода к формированию коэффициента функциональности средства**

№ п/п	Индикатор реакции системы	Контрольное средство фиксации функциональной работы	Объем информации	$W_{\Phi Z_i}$
1.	Отказ устройству	Акт сверки конфигурации системы до и после кибернетического влияния	сделала вид попытка (без компрометации)	0
			сделала вид попытка (с компрометацией)	0,5
			не сделала вид попытка (компрометация)	1

Перед началом расчета кибернетической защищенности ИТС определяется взвешивающий коэффициент каждого компонента ( $K_j$ ) в каждом средстве ( $Z_i$ ) ИТС –  $P_{K_j Z_i}$ .

Взвешивающий коэффициент –  $W_{K_j Z_i}$  должен урегулировать вопрос логической важности в порядке убывания компонентов у средства ( $Z_i$ ). Однако сумма взвешивающих коэффициентов всех компонентов одного средства ( $Z_i$ ) не превышает 1.

Очевидно, что на абонентском терминале смартфона наивысший  $W_{K_j Z_i}$  присваивается операционной системе (ОС) и самый низкий Bluetooth. Однако из точки функциональной важности передача текстовых или голосовых сообщений невозможна без работоспособного радиотерминала GSM, CDMA, Wi-Fi, Bluetooth. В то же время теряется смысл при выходе из строя планшета или повреждении ОС (см. рис. 1).

Для учета последствий влияния активных кибернетических влияний в расчетные формулы кибернетической защищенности [5, 4] каждом средстве ( $Z_i$ ) ИТС в обязательном порядке вводится коэффициент функциональности компонентов (сервисов) средства  $W_{\Phi K_j}$ .

**Этап 2. Расчет показателей  $P_{K_j Z_i}$  – кибернетической защищенности каждого компонента ( $K_j$ ) средству ( $Z_i$ ) ИТС**

1. Определяются наиболее критические частичные индикаторы кибернетической защищенности ( $I_{чкз}$ ) из перечня политики безопасности. Уточнен перечень частичных индикаторов ( $I_{чкз}$ ) для каждого компонента ( $K_j$ ) средству ( $Z_i$ ) ИТС определяет экспертная группа уполномоченных специалистов кибернетической безопасности.

2. Распределяются частичные индикаторы ( $I_{чкз i}$ ) за каждым компонентом ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС;

3. Проверяются средства сложной системы на соответствие настроек параметров кибернетической защищенности за частичными индикаторами.

Сверка осуществляется путем проверки настроек каждого компонента ( $K_j$ ) средства ( $Z_i$ ) ИТС в соответствии с рекомендациями объекта принятия решения (экспертная группа уполномоченных специалистов кибернетической безопасности) перечнем частичных индикаторов. Частичный индикатор ( $I_{чкз}$ ) принимает исходное значение “1” или “0” при следующих условиях, если: настройки компонента ( $K_j$ ) средства ( $Z_i$ ) ИТС отвечают политике безопасно-

сти, тогда  $(I_{чкз}) = "1"$ , а в противном случае  $(I_{чкз}) = "0"$  - настройки компонента  $(Kj)$  средства  $(Zi)$  ИТС не отвечают политике безопасности.

Количество  $(I_{чкз})$  для разных компонентов средств имеет разное количество. Результаты вычислений заносятся в табл. 2.

Таблица 2

Матрица показателей частных индикаторов  $I_{чкзi}$  для компонентов  $(Kj)$  каждого средства ИТС

Компонента средства	Значение показателей частных индикаторов $(I_{чкз})$					$gk$
	1	2	3	...	$gk$	
Компонент №1 средства №1	0	1	1	...	0	$g1+g0$
Компонент №2 средства №1	1	1	1		1	$g1+g0$
Компонент №3 средства №1	1	0	0		0	$g1+g0$
Компонент №1 средства №2	0	0	1		0	$g1+g0$
..	...	..	..	..	..	$g1+g0$
Компонент №1 средства №N	1	0	1	...	0	$g1+g0$

Вычисляем  $P_{кзкзi}$ , за формулой (1):

$$P_{кзкзi} = \frac{\sum_{i=1}^k g_1}{\sum_{i=1}^k (g_0 + g_1)} = \frac{\sum_{i=1}^k g_1}{g_k} \quad (1)$$

где  $gk$  – количество вопросы, которые отвечают соответствующей компоненте  $Kj$ ;  $g1$ – количество индикаторов, которые принимает значение “1” для соответствующей компоненты  $Kj$ ;  $g0$  – количество индикаторов, которые принимает значение “0” для соответствующей компоненты  $Kj$ .

### Этап 3. Вычисления показателя $P_{кзi}$ – каждого средства $(Zi)$ ИТС

Показатель киберзащищённости вычисляется по формуле (2), как взвешенная и нормируемая оценка индикаторов состояния киберзащищённости всех компонентов  $(j)$  каждого средства  $(i)$  ИТС.

$$P_{кзi} = \frac{\sum_{j=1}^m (P_{кзкзi} \times W_{фкj} \times W_{кзi})}{\sum_{j=1}^m (W_{фкj} \times W_{кзi})}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество компонентов  $(Kj)$  в каждом средстве  $(Zi)$ ;  $W_{фкj}$  – коэффициент функциональности компонента (сервиса)  $(Kj)$  средства  $(Zi)$ . Результаты вычислений заносятся в табл. 3.

## Результаты вычислений

№	Компоненты	K1				.	Kj			P <sub>кззи</sub>
		P <sub>кзк1зи</sub>	W <sub>ф1</sub>	W <sub>к1зи</sub>			P <sub>кзкjзи</sub>	W <sub>фj</sub>	W <sub>кjзи</sub>	
1	Компонент №1 средства №1					.				
2	Компонент №2 средства №1									
3	Компонент №3 средства №1					.				
4	Компонент №1 средства №2									
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
К	Компонент №1 средства №N									

Этап 4. Расчет P<sub>кзитс</sub> – киберзащищённость ИТС в целом

Количественным показателем для оценки киберзащищённости сложной системы является P<sub>кзитс</sub> вероятность того, что сложная система (ИТС), все ее средства и их компоненты будут защищены от кибернетического вмешательства и будут продолжать функционировать в штатном режиме.

Показатель киберзащищённости P<sub>кзитс</sub> ИТС в целом рассчитывается при помощи формулы (3), как взвешенная и нормируемая оценка показателей состояния киберзащищённости всех средств сложной системы:

$$P_{кзитс} = \sum_{i=1}^S (P_{кззи} \times W_{фзи} \times W_{зи}), \quad (3)$$

где S – количество средств (Zi) в ИТС.

W<sub>фзи</sub> – коэффициент функциональности средства (Zi) в целом

$$W_{фзи} = \sum_{i=1}^m (W_{фkj}) \leq 1,$$

W<sub>зи</sub> – взвешивающий коэффициент средства (Zi) в сложной системе. Результаты вычислений P<sub>кзитс</sub> заносятся в табл. 4.

Таблица 4

Результат расчета показателей P<sub>кзитс</sub> киберзащищённости ИТС в целом

Средства Zi	P <sub>кззи</sub>	W <sub>фзи</sub>	W <sub>зи</sub>	P <sub>кзитс</sub>
Засел №1				Формула (3)
Засел №2				
Засел №3				
.....	....	.....	...	
Засел №N				

## Этап 5. Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

Методы контроля за опытным образцом сложной системы:

- внешний обзор по системе оповещения об инцидентах (при ее наличии);

- проведение измерений скорости передачи файлов (видео, графических, текстовых материалов);
- проведение разборчивости голосовых сообщений;
- внешний обзор состоянию образцу в случае осуществления на него кибернетического влияния.

Критерии, при выполнении которых фрагмент испытательной ИТС считается таким, который выдержал испытание. Оценка осуществляется на всех этапах испытаний.

Испытываемая ИТС считается успешно прошедшей проверку на кибернетическую защищенность, если по результатам расчета состояние кибернетической защищенности на момент времени ( $t_0, t_{KB1}, t_{KB2}$ ), удовлетворяет следующие критерии (см. табл. 5).

**Таблица 5**

**Критерии кибернетической защищенности**

№ п/п	$P_{кзИТС}$	Уровень кибернетической защищенности	Цветная трактовка
1	$0,75 \leq P_{кзИТС} \leq 1$	высокий	зеленая
2	$0,4 \leq P_{кзИТС} \leq 0,75$	средний	желтая
3	$0 \leq P_{кзИТС} \leq 0,4$	низкий	красная

### **Особенности практической реализации методики**

#### **Этап 1. Подготовительный.**

1. Руководитель комиссии формирует следующие группы специалистов по направлениям и ответственности:

- группа №1 фиксирования изменений состояния функционирования ИТС;
- группа №2 кибернетического влияния – отработки кибернетических действий в роли «хакера»;
- группа №3 расчету – рассчитывают кибернетическую защищенность ИТС на всех этапах испытаний;
- группа №4 условны пользователи (АРМ) – осуществляют фиксирование передачи голосовых, текстовых, графических данных, потока видеоданных. Осуществляют инструментальное измерение, оценивание количественных и качественных показателей.

Порядок взаимодействия участников испытаний по данной методике:

- специалисты контроля и фиксирования непосредственно с группой расчета;
- руководитель испытаний через команду осуществления кибернетического влияния с – условным хакером.

Запрещается: лицам, которые осуществляют кибернетическое влияние (№2) сообщать начало наступления события кибернетического влияния группе №1.

2. Разложить сложную систему (ИТС), которая определена на тестирование на следующие составляющие:

- средства ( $Z_i$ ) системы;
- компоненты ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) системы ;

3. Распределить и закрепить перечень частичных индикаторов ( $I_{чкз}$ ) за каждой компонентой ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС;

4. Назначить взвешивающие коэффициенты:

- каждому средству ( $Z_i$ ) ИТС ( $W_{Z_i}$ );
- каждой компоненте ( $K_j$ ) каждого средства ( $Z_i$ ) ИТС –  $W_{K_j Z_i}$ ;
- функциональности  $W_{ФZ_i}$ ,  $W_{Z_i}$ ,  $W_{ФK_j}$ ;

5. Рассчитать состоянием на момент времени ( $t_0$ ) «отсутствуют кибернетические влияния» числовое значение киберзащищённости:

- каждого компонента ( $K_j$ ) средству ( $Z_i$ ) сложной системы –  $P_{K_j Z_i}$ ;
- каждого средства ( $Z_i$ )  $P_{K Z_i}$ ;
- всей сложной системы –  $P_{K ИТС}$ ;

6. Результат расчета комиссия заносится к таблице сравнений состояния киберзащищённости протокола испытаний. Осуществить оценку соответствия состояния кибернетической киберзащищённости сложной системы (ИТС) состоянием на момент времени ( $t_0$ ).

7. Оперативное совещание за результатами подготовительного этапа методики. Постановка задания на обработку первого этапа методики испытаний.

**Этап 2. Расчет РКЗИТС – киберзащищённости ИТС в целом состоянием на момент времени ( $t_0$ ) по этапам 2-5.**

**Этап 3. Расчет числового значения киберзащищённости ИТС состоянием на момент времени ( $t_{КВ1}$ ) за результатами «активной фазы кибернетического влияния»:**

1) за командой руководителя испытаний группа №2 осуществляет «активную фазу кибернетического влияния» на сложную систему с указанием времени ( $t_{КВ1}$ ).

2) группа №1 переходит в усиленный режим ожидания;

3) группа №3 работает в штатном режиме. С поступлением исходных результатов от группы №1 об изменениях состояния системы или реакции, приступают к вычислениям кибернетической защищенности;

4) с наступлением времени ( $t_{КВ1}$ ), группы №2 с помощью набора СПЗ осуществляет:

- рекогносцировку сетевого оборудования;
- получение IP-адресу для работы в сети;
- анализ уязвимостей;
- взлом путем составления словарей взлома для подбора имен, учетных записей и паролей к ним;
- взлом и проникновение к системе.

За результатами сканирования сетевого оборудования и полученных выходных данных осуществляет санкционированные (из позиции разрешенных) кибернетические вмешательства (влияния) для достижения цели.

5) проверяется (отслеживается):

- группой №1 с помощью функционирования штатной системы фиксации, контроля и оповещения об изменениях состояния компоненты средств(а), изменения функционирования средств(а) или всей сложной ИТС. Результаты контроля предоставляются группе №3 в форме выходных данных (время наступления события ( $t_{КВ11Ф}$ ), средство, компонента средству, угроза или другое) и заказные значения коэффициента функциональности –  $W_{ФZ_i}$ ,  $W_{ФK_j}$ ;
- группой №4 с помощью инструментальных средств оценивают функциональные изме-

нения состояния компоненты средств(а), изменения функционирования средств(а) и предоставляют предложения относительно  $W_{\phi}$  соответствующей компоненты средств(а), изменения функционирования средств(а) в зависимости от реакции на кибернетическое вмешательство. Происходит фиксация фактического времени наступления события изменения функционирования компоненты средств(а) или изменения функционирования всего средств(а) ( $t_{KB1\phi3\phi}$ );

б) группа №3 осуществляет:

Расчет за методикой числового значения киберзащищенности всей ИТС  $P_{\text{КИТС}}$  состоянием на время ( $t_{KB1\phi}$ ); результаты вычислений заносятся к таблице сравнений состояния киберзащищенности в протоколе испытаний с указанием времени ( $t_{KB1\phi}$ ).

7) Осуществить оценку:

- соответствия состояния киберзащищенности ИТС состоянием на момент ( $t_{KB1}$ )
- сравнить время реакции системы оповещения о наступлении кибернетических инцидентов ( $t_{KB1}$ ) из ( $t_{KB1\phi}$ ), и ( $t_{KB1\phi3\phi}$ ). Он должен быть ( $t_{KB1}$ )  $\approx$  ( $t_{KB1\phi}$ )  $\approx$  ( $t_{KB1\phi3\phi}$ ) в пределах приемлемой нормы (согласно формуляру, техпаспорту);
- времени тратящего на проведение проникновения и взлома.

На всех этапах проверки группы №1-4 осуществляют фиксацию изменений технического состояния и отклонения от нормального функционирования, как отдельных составляющих (компонентов средств), так и средств в целом и системы в целом.

### Заключение

В данной методике в отличие от методик [1 – 5] предложено осуществить расчетную оценку кибернетической защищенности ИТС на некоторый момент времени  $t_{KB}$ , за которое осуществлено активное кибернетическое влияние на эту систему  $FKB = 1$  в результате чего, организация может потерять некоторый актив (Ак); математический аппарат методики обеспечивает расчет кибернетической защищенности сложной системы (ИТС) для модели наилучшего варианта, так называемого наступления события угрозы нулевого дня.

### Библиографический список

1. **Хусаинов, П.В.** Показник кібернетичної безпеки автоматизованої системи у часі. Збірник наукових праць ВІПІ. Київ, 2015. Вип. № 1. С. 101 – 111.
2. **Кудінов, В.А.** Методика оцінки рівня кібербезпеки в Україні: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції „Кібербезпека в Україні: правові та організаційні питання”(Одеса, 21 жовтня 2016). Одеса. С. 151 – 152.
3. **Черноног, О.О.** Обговорення єдиного підходу до побудови методики оцінки кібернетичної захищеності ІТС організації / О.О.Черноног, І.М. Козубцов, В.В. Куцаєв, Л.М. Козубцова, Т.П. Терещенко // Міжнародна науково-практична конференція “Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку” (14-15 березня 2018 року). – Харків. Національна академія Національної гвардії України, 2018. – С. 15 – 16.
4. **Козубцов, І.М.** Методика оцінки кібернетичної захищеності системи зв'язку організації // Л.М. Козубцова, В.В. Куцаєв, Т.П. Терещенко / Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2018. – №1 (31). – С. 43 – 46.
5. **Куцаєв, В.В.** Методика оцінки кібернетичної захищеності інформаційно-

I.M. Kozubtsov<sup>1</sup>, I.N. Kozubtsova<sup>2</sup>

## SYSTEM POSTED REMOTE MONITORING FREQUENCY AND INTERFERENCE CONDITION SHORTWAVE

<sup>1</sup>Military Institute of telecommunications and Informatization,

<sup>2</sup>Scientific center of communication and Informatization

Military Institute of telecommunications and Informatization, Kiev, Ukraine

**Purpose of work.** Purpose of work. The article analyzes the well-known attempts to solve a scientific problem from the calculation of cyber security of an information telecommunication system (ITS). It is established that at this time the existing solutions do not take into account the active cybernetic influence in the calculation, and the result is static in nature. which reflects the state of the components of the system security policy, which is not enough to assess the real state. As a result of this, it became necessary to develop a methodology that would ensure the calculation of the cyber security of ITS based on the results of active cybernetic actions. Based on the absence, at this time of this decision, the authors proposed a methodology for assessing the cyber security of ITS with the possibility of predicting the effects of cybernetic influence. The mathematical apparatus of the method is proposed that provides the calculation of the ITS cyber security for the worst-case model, for the so-called zero-day threat event.

**Practical value and application.** It consists in the practical possibility of determining the level of cyber security taking into account active cyber infusions at the stage of design and operation of ITS.

**Scientific novelty.** The scientific novelty of the result is that a solution to the scientific and practical problem is proposed based on the calculation of the state of cyber security of ITS, which is an information and telecommunication communication center in the context of deliberate actions of a zero-day threat..

**Keywords:** methodology, assessment, cyber security, information and telecommunication systems, cybernetic influence.

П.Е. Алиманов, А.Б. Сизоненко

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ ЗАДАЧ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Краснодарское высшее военное училище,  
г. Краснодар

В результате анализа задач, возложенных на органы защиты информации, выявлено, что все они имеют разную важность. Показана необходимость определения приоритета выполнения задач органами защиты информации в критичных ситуациях. На основе метода анализа иерархий разработана методика определения приоритета задач защиты информации.

**Ключевые слова:** система защиты, формальная модель безопасности, задачи защиты информации, требования к системам безопасности.

### Введение

В настоящее время задачи органов по защите информации (далее – органы ЗИ) формируются на основе требований Федеральных законов, подзаконных и иных нормативных правовых актов, руководящих документов. Традиционно приоритетность выполнения всех задач устанавливается исходя из уровня звена управления, принявшего соответствующий распорядительный документ, а также необходимости своевременного выполнения формальных указаний вышестоящего органа ЗИ.

В то же время, часто встречаются ситуации, требующие установления приоритетности выполнения задач органами ЗИ вне зависимости от перечисленных формальных подходов, в целях немедленного реагирования на резкое изменение обстановки, устранения последствий нарушения различного рода инцидентов и принятия необходимых дополнительных мер для недопущения неблагоприятного развития ситуации.

В таких случаях руководителю органа ЗИ необходимо определить первоочередные мероприятия (главную задачу), очередность, порядок и сроки выполнения других задач, оперативно оценить возможные риски и негативные последствия временной приостановки выполнения некоторых задач для перераспределения бюджета времени. При определении приоритетности руководители и кадровые органы сталкиваются со слабо формализованной задачей. Должны учитываться как формальные критерии, так и эмпирические. В такой ситуации, лицу, принимающему решение, необходимо дать «инструмент», помогающий определить приоритетность задач, решаемых органами ЗИ. В статье для решения этой задачи будет использоваться метод анализа иерархий, предложенный Томасом Саати [1].

### Формализованное обоснование необходимости определения приоритета выполнения задач органами ЗИ

Ранее в [2] было дано формализованное описание возможности выполнения сотрудниками тех или иных функций защиты информации. Для это предлагалось ввести матрицу возмож-



ности выполнения сотрудником функций защиты информации размерностью  $n$  столбцов на  $m$  строк:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

где:  $n$  – количество функций защиты информации;  $m$  – количество сотрудников подразделения защиты информации;  $a$  – элемент матрицы, показывающий возможности сотрудников по выполнению той или иной функции защиты информации. При  $a_{ij} = 1$  сотрудник  $p_i$  ( $i = 0 \dots m$ ) способен выполнить функцию  $f_j$  за нормированное время  $t_j$  ( $j = 0 \dots n$ ).

В [2] также были введены показателями выполнимости функций защиты информации:

$$\text{загрузка сотрудников (personel loading) – } pl_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij}, \quad i = 1 \dots m; \quad (1)$$

$$\text{выполнение функции (function perform) – } fp_j = \sum_{i=1}^m a'_{ij}, \quad j = 1 \dots n. \quad (2)$$

Критерии выполнимости функций защиты информации:

$pl_i \leq 1, \quad i = 1 \dots m$  (коэффициент загрузки сотрудников);

$fp_j \geq 1, \quad j = 1 \dots n$  (коэффициент выполнения функции).

То есть все функции защиты информации должны быть выполнены при загрузке каждого сотрудника менее 1. С учетом того, что некоторые должности могут оставаться вакантными, сотрудники могут быть в отпуске или на больничном, целесообразно, на наш взгляд, значение коэффициента загрузки  $pl_i$  установить не более 0,7 при выполнении требований к  $fp_i \geq 1$ .

Однако не всегда можно добиться выполнения указанных критериев. Такими случаями могут быть: появление новых угроз информационной безопасности, требующих дополнительных ресурсов на их предотвращение, введение регуляторами новых требований к системам защиты информации, создание новых структурных подразделений организации, в том числе и территориально обособленных. Все это ведет к увеличению количества задач, возлагаемых на органы ЗИ. Кроме того, в некоторых случаях последствия инцидентов информационной безопасности или реализации угроз могут быть критичные для системы в целом. Уровень критичности информационной системы будет определяться владельцем как максимально возможный для него уровень ущерба активам от нарушения состояния безопасности информационной системы с учетом остаточного уровня риска после минимизации уязвимостей и принятия мер по защите информации [3]. Достичь заданных значений показателей (1) и (2) выполнимости функций защиты информации можно, подняв в критических случаях допустимое значение коэффициента  $pl_i$  до значений 1 или даже более за счет выполнения работ во внеурочное время с соответствующей оплатой. Однако эти ресурсы также не безграничны и приходится определять наиболее приоритетные (критичные) функции подсистемы защиты информации, выполнить которые необходимо в первую очередь.

Для этого введем вектор  $S$  (significance, значимость) размерностью  $n$ :

$$S = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n).$$

Элементы вектора  $S$  будут равны «1», если функция защиты информации выполняется (или выполнение критично) и «0» – если выполнением функции можно пренебречь для выполнения других функций, которые будут критичны в данное время. В повседневных условиях все элементы вектора  $S$  будут равны 1. В этом случае приоритет выполнения каких-либо конкретных функций четко определяется нормативными документами, устанавливающими недопустимость возникновения критических негативных последствий для системы защиты информации. В критических условиях значения 1 останутся лишь в некоторых позициях, а матрица возможности выполнения функций защиты будет равна:

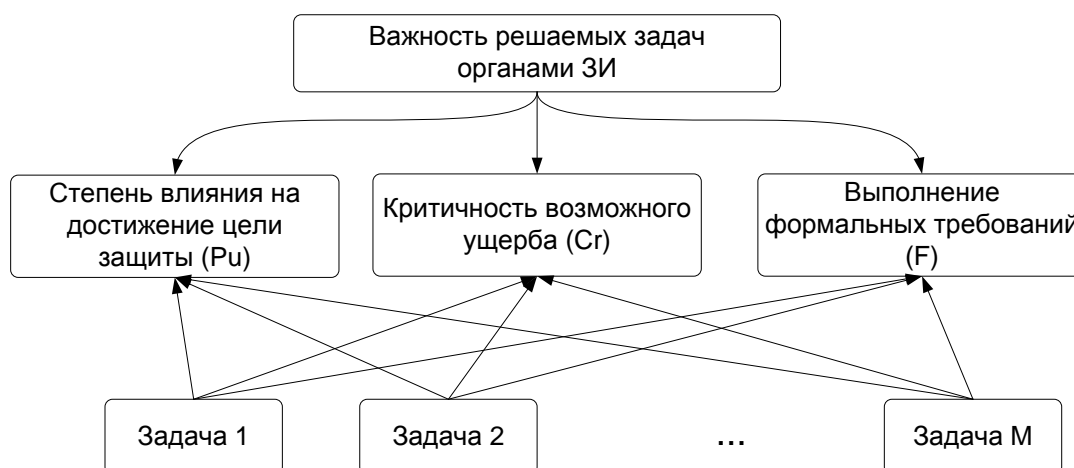
$$A'' = S \circ A, \quad (3)$$

где  $\circ$  – операция поэлементного умножения вектора  $S$  и каждой строки матрицы  $A$ .

Таким образом, возникает задача вычисления значений вектора  $S$  для различных ситуаций. Решить эту задачу предлагается с использованием математического аппарата анализа иерархий.

### Методика выбора определения приоритета задач, решаемых органами ЗИ

В результате анализа показателей, влияющих на приоритетность выполнения задач органами ЗИ, составлена иерархическая структура, представленная на рисунке.



**Иерархия критериев для определения приоритетности задач органов ЗИ**

Методика выбора сотрудника для назначения на должности в подразделения защиты информации будет состоять из подготовительной части и оценки кандидатов.

На первом шаге определяется значимость критериев первого уровня. Составляется квадратная матрица парных сравнений  $S$  порядка  $z$ . В рассматриваемом примере на рис. 1  $z=3$ . Далее вычисляется ее собственный вектор  $X$ , который будет определять приоритет того или иного критерия при выборе наиболее важной задачи, возложенной на орган ЗИ.

Следует отметить, что соответствующие векторы приоритетов должны быть составлены для каждой возможной ситуации, в которой необходимо перераспределение решаемых задач. Примеры таких ситуаций были приведены ранее. В последующем все задачи, возлагаемые на органы ЗИ, должны быть оценены по указанным критериям.

Далее переходим к оценке приоритетности задач. Для каждого критерия составляются матрицы попарных сравнений для каждой из задач и находятся векторы приоритетов:  $V_{Pu}$ ,  $V_{Cr}$ ,  $V_F$ .

Далее из полученных векторов приоритетов составляется матрица и умножается на вектор-столбец  $X$ :  $V = (V_{Pu}^T \quad V_{Cr}^T \quad V_F^T) \cdot X$ .

Значения вектора  $V$  укажут приоритет той или иной задачи, возложенной на орган ЗИ.

Для достижения требуемых значений показателей (1) и (2) предлагается последовательно, начиная с задачи с наименьшим приоритетом (элемент вектора  $V$ , имеющий минимальное значение), исключать задачи. Формализовано это будет означать приравнивание нулю значения вектора  $S$ , соответствующего задаче с наименьшим приоритетом: если  $v_i = \min(V)$ , то  $s_i = 0$ . Далее выполняется операция (3) и оцениваются показатели (1) и (2). Процесс продолжается до тех пор, пока значения показателей (1) и (2) не достигнут требуемых.

### Библиографический список

1. **Саати, Т.** Принятие решений: Метод анализа иерархий / Т. Саати; Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 315 с.
2. **Алиманов, П.Е.** Формализация процесса определения оптимальной организационно-штатной структуры подразделений защиты информации / П.Е. Алиманов, А.Б. Сизоненко // Научные труды КубГТУ – 2019 – № 7 – Режим доступа: <http://https://ntk.kubstu.ru/tocs>.
3. **Сизоненко, А.Б.** Обоснование подходов к совершенствованию логико-вычислительной подсистемы защиты информации систем критического применения / А.Б. Сизоненко, В.В. Меньших // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2015. – № 4. – С. 48–56.

**Р.Е. Alimanov, А.В. Sizonenko**

### METHODOLOGY FOR DETERMINING PRIORITY TASKS OF STRUCTURAL DIVISIONS OF INFORMATION PROTECTION BASED ON THE METHOD OF ANALYSIS OF HIERARCHIES

Krasnodar Higher Military School

As a result of the analysis of the tasks assigned to the information protection authorities, it was revealed that they all have different importance. The necessity of determining the priority of tasks by information protection authorities in critical situations is shown. Based on the hierarchy analysis method, a methodology has been developed for determining the priority of information protection tasks.

**Keywords:** security system, formal security model, information protection tasks, requirements for security systems.

Е.В. Алпеев, А.Н. Стадник, И.Д. Королев, Е.А. Конышев

**ВЕРИФИКАЦИЯ ЛОЖНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ В СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ  
КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО СПОСОБА  
НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ  
И ДЕРЕВА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Краснодарское высшее военное училище,  
г. Краснодар

Рассмотрен комплексный способ анализа и фильтрации событий, с целью выявления инцидентов для обнаружения компьютерных атак с использованием методов интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений. На основе проведенного обзора экспериментального применения методов интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений произведены сравнительные показатели ложных срабатываний при обнаружении компьютерных атак.

**Ключевые слова:** система обнаружения атак, ложное срабатывание, обнаружение компьютерных атак, интеллектуальный анализ данных, дерево принятия решений.

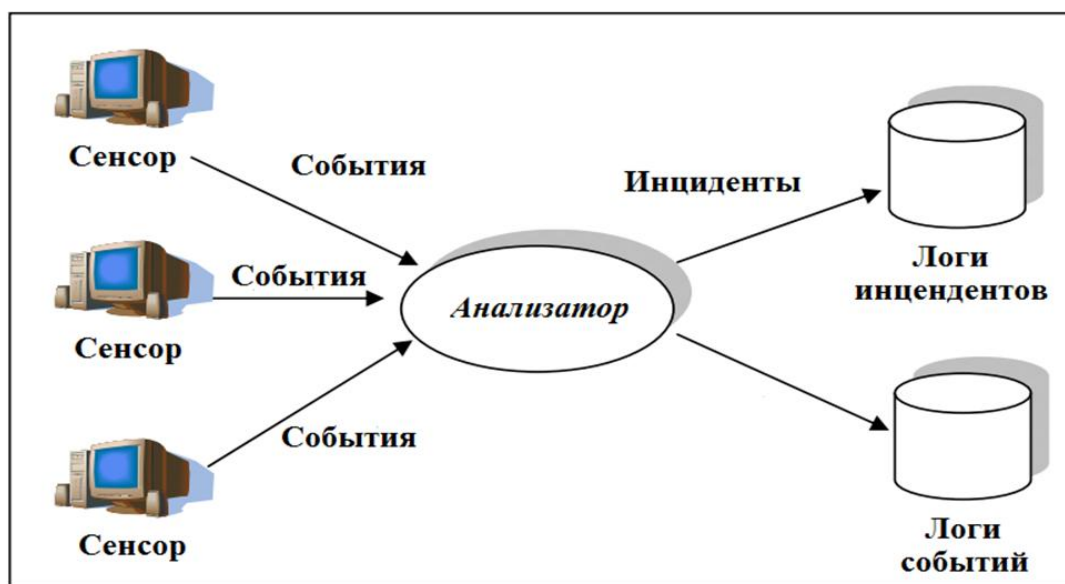
**Введение**

В настоящее время интеллектуальные методы обнаружения компьютерных атак используются для обнаружения ложных срабатываний в критических информационных инфраструктурах. Однако уменьшение количества ложных срабатываний все еще остается актуальной проблемой на сегодняшний день. На данный момент, эти методы фокусируются либо на методах обнаружения атаки, либо на методах реагирования на возникшую угрозу. Зачастую не хватает комплексного применения обоих методов. Если не объединять данные методы в системе обнаружения атак, вероятно, достаточно сложно выявлять ложные срабатывания. Чтобы компенсировать вышеупомянутые ограничения, в этой статье описывается способ, направленный на обнаружение атаки, включающий статистический анализ, как самой атаки, так и функционирования защищаемой системы в состоянии покоя. Этот способ также включает комплексный статистический подход, который использует методы интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений. В результате применения статистического анализа возможно уменьшить количество ошибок в результате ложных срабатываний и выявлять возникающие угрозы. Предлагаемый способ можно использовать для оценки и повышения вероятности обнаружения компьютерных атак и в то же время реагирования на угрозы и вредоносный трафик в критических информационных инфраструктурах.

Система обнаружения атак (далее – СОА) предназначена для обеспечения безопасности информации, которая может обнаруживать, предотвращать и, как вариант, реагировать на атаку. Функционально СОА контролирует основные источники данных, таких как аудит и данные сетевого трафика в распределенных критически важных информационных системах, в которых используются различные методы для обеспечения безопасности информации. Поэтому основной целью СОА является эффективное обнаружение всех атак на систему. Например, корректно настроенная и функционирующая СОА в состоянии выявить на раннем

этапе вредоносное программное обеспечение (компьютерные вирусы, черви, эксплойты, логические бомбы, троян и т.д.), несанкционированный доступ к информации, а также на начальном этапе вскрыть проведения компьютерной атаки или как следствие уже совершенную компьютерную атаку. Кроме того, эффективность СОА также определяется обнаружением среди всех текущих событий в защищаемой системе как инцидентов информационной безопасности, так и адекватных информационных процессов функционирования системы. Это значит, что количество ложных срабатываний должно быть сведено к минимуму, при условии, что реальные атаки не будут пропущены. Статистически это можно описать в виде ошибок I рода (ложноотрицательное срабатывание системы, пропуск цели) и ошибок II рода (ложноположительное срабатывание, реакция при отсутствии цели) [1].

СОА также анализирует все события и определяет, является ли текущее событие инцидентом или нет. При этом, как правило, администратору безопасности предоставляется обратная связь в виде подтверждения или не подтверждения решения, которое принято СОА. Также СОА может получать события от одного до нескольких сенсоров. Данные сенсоры предоставляют данные для анализатора событий о состоянии всей сети в целом. Однако не все эти события можно считать инцидентами информационной безопасности, прежде чем они подвергнутся анализу. Этот процесс изображен на рисунке.



**Процесс анализа событий, созданных несколькими сенсорами**

Для того чтобы обнаружить реальную атаку, все события должны быть проанализированы (рис.1). Эффективность анализа может быть достигнута за счет применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения [1]. При этом решение по некоторым задачам не может быть эффективно определено экспертом по сравнению с тем, как это будет реализовано компьютерным анализом, ввиду того что человеку сложно проанализировать большие объемы данных за ограниченный интервал времени еще до момента реализации атаки защищаемой системы. В данной статье рассматривается способ анализа и фильтрации событий с целью выявления инцидентов для выявления компьютерных атак с использованием методов интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений.

## **Система обнаружения компьютерных атак на основе интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений**

СОА делятся на две категории: обнаружение аномалий и обнаружение злоупотреблений.

Обнаружение аномалий определяет необычное (ненормальное) поведение в защищаемой системе, тогда как обнаружение злоупотреблений проводит сравнение поведенческих признаков в системе и сравнивает их с заранее подготовленными списками (по аналогии с антивирусными базами сигнатур). При обнаружении аномалий снимаются профили «нормального» поведения системы, и атаки распознаются путем обнаружения расхождений от нормального поведения. Несмотря на то, что обнаружение аномалий позволяет обнаруживать ранее неизвестные атаки безопасности, требуется огромное количество данных, которые необходимо обрабатывать для создания множества профилей «нормального» поведения пользователей в системе. Кроме того, при обнаружении аномалий высока частота ложных срабатываний, так как любое новое поведение пользователя в системе, которое не соответствует поведению профиля пользователя, считается аномалией.

Обнаружение злоупотреблений выявляет компьютерную атаку путем соотношения происходящего события в защищаемой системе с заранее описанным сценарием развития атаки на защищаемую систему. Сценарии развития атаки хранятся в базе данных (база данных сигнатур). Способ обнаружения злоупотреблений обычно распознает атаки с очень высокой достоверностью. Однако способ обнаружения злоупотреблений не может идентифицировать новые неизвестные атаки, потому что их эталон не описан и не сохранен в базе данных. Поэтому требуется постоянное обновление базы данных для обнаружения новых типов атак.

В данной статье предлагается рассмотреть статистическое решение проблемы выявления новой атаки (ранее не описанной в базе данных сигнатур) посредством обнаружения злоупотреблений (описанных в базе данных сигнатур), применив методы искусственного интеллекта, таких как интеллектуальный анализ данных и дерево принятия решений. Интеллектуальный анализ данных наиболее подходящий метод, потому что работает с ранее известными атаками, которые хранятся в базе данных. Алгоритм на основе дерева принятия решений применяется для анализа ранее известных атак с целью генерации признаков возможных неизвестных атак. Точность алгоритма определяется процентом выявления ошибок I рода и ошибок II рода, которые были получены в процессе классификации новых атак. Чем выше процент ложных срабатываний, тем ниже точность классификации возможных атак.

Применение методов интеллектуального анализа данных в комплексе с алгоритмом дерева принятия решений для разработки СОА дает некоторые преимущества по сравнению с классическим (сигнатурным) подходом, так как дерево принятия решений анализирует большие массивы данных полезной информации, которая, в свою очередь, полезна при принятии решения в процессе выявления и ликвидации компьютерных атак. В то время как СОА, работающая с четкими значениями (сигнатурами), может пропускать большие объемы данных ценной информации. Дерево принятия решений обеспечивает некоторую гибкость для обнаружения неизвестной атаки, увеличивая, таким образом, вероятность обнаружения компьютерных атак.

## Категории компьютерных атак

В 1998 году в рамках программы повышения характеристик обнаружения компьютерных атак, управлением Министерства обороны США, отвечающим за разработку новых технологий для использования в интересах вооруженных сил (DARPA), была разработана типовая модель обмена данными на базе локальной вычислительной сети ВВС США (далее – ЛВС). Данная ЛВС функционировала в нормальных для нее условиях, при этом подвергалась компьютерным атакам. В результате эксперимента была установлена базовая таксономия 5 классов, а также таксономия 23 экземпляров компьютерных атак. Далее приводятся их разновидности.

I. Сетевая разведка (Probe) - категория атак, при которой злоумышленник сканирует сеть для сбора информации, чтобы выявить ее уязвимости. Данная категория атак является наиболее распространенной, поскольку не требует большого количества технических навыков и ресурсов.

II. Отказ в обслуживании (DoS) - категория атак, при которой злоумышленник применяет значительные вычислительные ресурсы для атаки на защищаемую сеть. DOS-атаки классифицируются на основе услуг, которые злоумышленник блокирует для доступа законных пользователей.

III. Доступ к системе с правами «ROOT» (R2U). Имея доступ к учетной записи законного пользователя, злоумышленник получает доступ с правами суперпользователя.

IV. Удаленный пользователь (U2R). Атака происходит, когда злоумышленник удаленно отправляет зараженные пакеты в защищаемую сеть, для получения локального доступа в системе

Цель данной статьи - представить обзор, в котором используются комплексное применение методов интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений для обнаружения атак базовой таксономии 5 классов, а также таксономии 23 экземпляров компьютерных атак.

### Экспериментальное применение дерева принятия решений для выявления компьютерных атак

Выводы, сделанные на основании эксперимента [1], утверждают, что сравнение выявления ложных тревог с применением интеллектуального анализа данных и дерева принятия решений обеспечивает более точную идентификацию атак класса: Normal, DoS и R2L, чем на основе сигнатурного способа обнаружения таковых атак. Тем не менее, сигнатурный способ на основе сценариев атак наиболее точный при идентификации атак класса Prob и U2R, так как он генерирует более низкую частоту ложных тревог (табл. 3).

Представленный далее обзор эксперимента [1] с применением метода дерева принятия решений демонстрирует его эффективность. Результаты этой классификации представлены цифровыми характеристиками ошибок I и II рода.

В данном эксперименте представлена модель алгоритма дерева принятия и модель обнаружения атак сигнатурным способом. Входными данными данной модели являются данные общедоступной базы атак KDDCup-99 [3]. В эксперименте задействовано 10%

тренировочного набора данных KDDCup-99 из-за ограничения технических возможностей. Результаты приведены далее (табл. 1, 2)

Таблица 1

Количество ошибок I и II рода по 5 классам атак с применением дерева принятия решений:

<i>Класс атаки</i>	<i>Количество атак</i>	<i>Ошибки I рода</i>	<i>Ошибки II рода</i>
Normal	97278	75	15
DoS	391458	9	19
Prob	4107	9	55
R2L	1117	6	23
U2R	59	32	19
<b>Общее количество:</b>	<b>494021</b>	<b>131</b>	<b>131</b>

Таблица 2

Количество ошибок I и II рода по 23 экземплярам атак с применением дерева принятия решений:

<i>Экземпляры атак</i>	<i>Количество атак</i>	<i>Ошибки I рода</i>	<i>Ошибки II рода</i>
Back	2203	1	9
buffer_overflow	30	4	2
ftp_write	8	0	5
guess_passwd	53	0	2
Imap	12	0	2
Ipsweep	1247	3	3
Land	21	1	0
loadmodule	8	0	7
Multihop	7	1	3
Neptune	107201	28	1
Nmap	231	1	10
Normal	97278	75	15
Perl	3	1	0
Phf	4	0	0
Pod	264	0	5
PortswEEP	1040	1	27
Rootkit	10	0	9
Satan	1589	4	15
Smurf	280790	6	2
Spy	2	0	2
Teardrop	979	0	0
warezclient	1020	3	10
warezmaster	20	2	2
<b>Общее количество:</b>	<b>494021</b>	<b>131</b>	<b>131</b>



Сравнительные показатели ложных срабатываний при обнаружении компьютерных атак с применением сигнатурного метода и метода дерева принятия решений:

<i>Класс атаки</i>	<i>Метод дерево принятия решений (%)</i>	<i>Сигнатурный метод (%)</i>
Normal	0,015	0,025
DoS	$1,822 \cdot 10^{-3}$	$9,716 \cdot 10^{-3}$
Prob	$1,822 \cdot 10^{-3}$	$1,215 \cdot 10^{-3}$
R2L	$1,215 \cdot 10^{-3}$	$4,048 \cdot 10^{-4}$
U2R	$6,477 \cdot 10^{-3}$	$6,073 \cdot 10^{-4}$

### Заключение

В статье обозначена эффективность метода дерева принятия решений с точки зрения обнаружения вторжений для аномальных типов атак. Точность применения дерева принятия выше, чем при классификации на основе только сигнатурного метода. Поскольку допустимые уровни ложных срабатываний для СОА составляют менее 10%, комплексное применение дерева принятия решений и сигнатурного методов преодолевают этот порог и значительно повышают эффективность СОА для обнаружения аномалий. При этом частота ложных срабатываний составляет 1,5 - 2,5% (при условии, что допустимые уровни ложных срабатываний могут варьироваться в допустимых пределах, в зависимости от уровня настройки СОА, количества и свойств трафика сети передачи данных).

### Библиографический список

1. **Elike Hodo**, Shallow and Deep Networks Intrusion Detection System: A Taxonomy and Survey: A review /E. Hodo, X. Bellekens, A. Hamilton, C. Tachtatzis, R. Atkinson, Department of Electronic & Electrical Engineering University of Strathclyde Division of Computing and Mathematics University of Abertay Dundee, с. 1-43
2. **Nor Badrul Anuar**, Identifying false alarm for network intrusion detection system using hybrid data mining and decision tree: A review /N. Badrul Anuar<sup>1</sup>, H. Sallehudin, A. Gani, O. Zakari, Malaysian Journal of Computer Science, Vol. 21(2) – 2008. – №2, с. 101-115
3. «UCI KnowledgeDiscoveryinDatabases»–База данных – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kdd.ics.uci.edu>. (Дата обращения 10.02.2020).

**E.V. Alpeev, A.N. Stadnik, I.D. Korolev, E.A. Konyshev**

### VERIFICATION OF FALSE POSITIVES IN THE INTRUSION DETECTION SYSTEM USING A COMPLEX METHOD BASED ON DATA MINING AND DECISION TREE

Krasnodar Higher Military School

A complex method for analyzing and filtering alerts is considered in order to identify incidents for detecting computer attacks using data mining and decision trees methods. Based on the review of the experimental application of data mining and the decision tree methods, comparative indicators of false positives when detecting computer attacks are made.

**Keywords:** intrusion detection system, false positives, detecting computer attacks, data mining, decision tree.

А.Н. Бабкин, А.Ю. Куличенко

## ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Воронежский институт МВД России,  
г. Воронеж

Сети связи полиции относятся к сетям связи специального назначения. Эффективность управления силами и средствами полиции во многом зависит от обеспечения информационной безопасности сетей. Важнейшими сетями полиции являются телекоммуникационные сети, предназначенные для передачи сообщений, получения сотрудниками полиции необходимой служебной информации, хранящейся на сервере. Как правило, телекоммуникационные сети полиции относятся к распределенным сетям, использующим сеть связи общего пользования для формирования каналов передачи. Это накладывает дополнительные требования по защите информации, так как сеть связи общего пользования имеет уязвимости, не характерные для локальных (в пределах одного здания, контролируемой территории) телекоммуникационных сетей полиции. Данные уязвимости являются причиной возникновения информационных атак со стороны злоумышленника на телекоммуникационную сеть полиции. При формировании показателя эффективности функционирования защищенной телекоммуникационной сети специального назначения, необходимо учитывать специфику построения сети: архитектуру, используемые протоколы, стандарты, коммуникационное оборудование, наличие альтернативных маршрутов. Наличие уязвимостей возможно также и из-за человеческого фактора: халатности сотрудников, обслуживающих коммуникационное оборудование сети связи общего пользования.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, информационная безопасность, своевременность, конфиденциальность, целостность, доступность, уязвимость, угрозы, надежность.

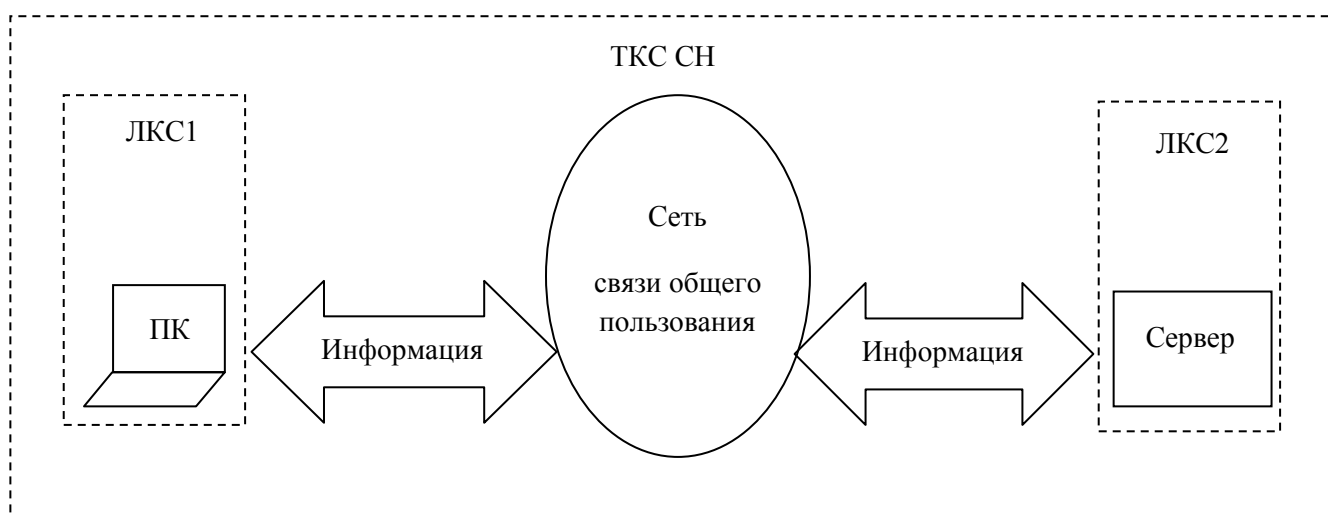
### Введение

В настоящее время трудно представить деятельность полиции без применения новейших технических средств, информационных технологий. Телекоммуникационная сеть специального назначения (ТКС СН) предназначена для эффективного управления силами и средствами полиции, выполнения полицией задач по обеспечению правопорядка [1]. Оценка эффективности функционирования ТКС СН должна определять соотношение между заданным целевым показателем результата функционирования и фактически реализованным в условиях обеспечения защищенности информации. Целевым показателем результата функционирования является своевременное обеспечение сотрудников полиции достоверной информацией в условиях воздействия угроз информационной безопасности [2]. Формирование показателя эффективности функционирования защищенной ТКС СН является актуальной научно-практической задачей.

## Основная часть

На рисунке представлена обобщенная структурная схема ТКС СН, где ЛКС1 – первая локальная сеть правоохранительной организации с персональными компьютерами (ПК) сотрудников полиции, ЛКС2 – вторая локальная сеть правоохранительной организации, где располагается серверная часть, территориально удаленная от ЛКС1. Сеть связи общего пользования предназначена для предоставления каналов передачи ТКС СН.

Важнейшим свойством ТКС СН, определяющим её качество как системы, функционирующей по своему назначению, является своевременное доведение сообщений до легальных пользователей (сотрудников полиции) в реальных условиях эксплуатации. Такими условиями для ТКС СН являются функционирование в условиях воздействия угроз информационной безопасности, наличия механизмов защиты информации и обеспечения работоспособности сети.



**Обобщенная структурная схема телекоммуникационной сети специального назначения**

Своевременность доведения сообщений до легальных пользователей определяется временем доведения  $\tau_{\text{дов}}$ , которое не должно превышать допустимого (нормированного) значения  $\tau_{\text{дов}}^{\text{дон}}$ :

$$\tau_{\text{дов}} \leq \tau_{\text{дов}}^{\text{дон}}. \quad (1)$$

Время доведения сообщений в реальных условиях эксплуатации ТКС СН является случайной величиной, зависящей от характера и продолжительности воздействия угроз информационной безопасности, быстрого действия механизмов защиты, резервирования направлений связи в сети связи общего пользования при снижении пропускной способности канала передачи. Поэтому для оценки эффективности функционирования ТКС СН (1) целесообразно использовать вероятность доведения сообщения за время, не превышающее допустимое (нормированное):

$$P(\tau_{\text{дов}} \leq \tau_{\text{дов}}^{\text{дон}}) \geq P(\tau_{\text{дов}} \leq \tau_{\text{дов}}^{\text{дон}})^{\text{дон}}. \quad (2)$$

Выполнение (2) возможно при соответствии показателей ТКС СН, определяющих информационную безопасность и надежность функционирования, допустимым (нормированным) значениям.

К показателям информационной безопасности следует отнести показатели конфиденциальности  $П_K$ , целостности  $П_Ц$  и доступности  $П_Д$  информации, формируемой на входе и выходе ЛКС1 и ЛКС2 ТКС СН, а также показатели противодействия угрозам информационной безопасности сети связи общего пользования.

Совершенно очевидно, что в защищенной телекоммуникационной сети специального назначения должны выполняться соотношения:

$$\begin{aligned} П_K &= П_K^{ДОП} = 1, \\ П_Ц &= П_Ц^{ДОП} = 1, \\ П_Д &= П_Д^{ДОП} = 1. \end{aligned}$$

Угрозы информационной безопасности сети связи общего пользования формируют уязвимости сети, связанные с наличием слабых мест используемого коммуникационного оборудования, а также протоколов обмена, стандартов и т.п.

Уязвимости сети связи общего пользования являются основной причиной возникновения информационных атак на ТКС СН. Например, угрозы информационной безопасности могут возникнуть по причине наличия уязвимостей программных реализаций стека TCP/IP [3, 4]. Так, одной из уязвимостей является отсутствие встроенных средств аутентификации узлов, взаимодействующих между собой по протоколу ARP: злоумышленник может сформировать от имени сервера ложный ARP-ответ, что приведет к получению им от ПК сотрудника полиции информации.

Показатели противодействия угрозам информационной безопасности сети связи общего пользования как элемента ТКС СН можно характеризовать:

1. Вероятностью наличия уязвимостей сети  $P_{УС}$ :

$$P_{УС} \leq P_{УС}^{ДОП}. \quad (3)$$

2. Вероятностью наличия механизмов защиты сети  $P_{ЗИС}$ :

$$P_{ЗИС} \geq P_{ЗИС}^{ДОП}. \quad (4)$$

Определение значений (3) и (4) должно проходить на этапе проектирования ТКС СН, заключения договора с оператором сети связи общего пользования на предоставление каналов передачи информации для ТКС СН с обеспечением требуемых показателей противодействия угрозам информационной безопасности.

Под надежностью ТКС СН понимают свойство, заключающееся в выполнении сетью заданных функций в реальных условиях эксплуатации с сохранением параметров в допустимых значениях, указанных в нормативной документации. Надежность можно характеризовать работоспособностью: способностью выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации с сохранением параметров в заданных пределах. В свою очередь работоспособность ТКС СН будет определяться вероятностью безотказной работы.

ТКС ОВД должна обладать свойствами восстанавливаемого объекта и в этой связи сеть можно отнести к восстанавливаемым системам. Свойство надежности определяется коэффициентом готовности  $K_G$ :

$$K_G \geq K_G^{ДОП} \quad (5)$$

где  $K_G^{ДОП}$  – допустимое значение коэффициента готовности.

Вероятность  $p_0(t)$  того, что ТКС СН в момент времени  $t$  работоспособна, определяется выражением [5]:

$$p_0(t) = 1 - p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right],$$

где  $p_1(t)$  – вероятность того, что ТКС СН в момент времени  $t$  неработоспособна,  $\lambda$  и  $\mu$  – соответственно интенсивность отказов и время восстановления, которые распределены по экспоненциальному закону.

При  $t \rightarrow \infty$ :

$$p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu},$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu},$$

$$K_{\Gamma} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

С учетом (1) – (5) показатель эффективности функционирования защищенной ТКС СН можно представить в следующем виде:

$$P(\tau_{\text{дов}} \leq \tau_{\text{дов}}^{\text{дон}}) \geq P(\tau_{\text{дов}} \leq \tau_{\text{дов}}^{\text{дон}})^{\text{дон}} \left\{ \begin{array}{l} P_K = P_K^{\text{ДОП}} \\ P_{\text{Ц}} = P_{\text{Ц}}^{\text{ДОП}} \\ P_{\text{Д}} = P_{\text{Д}}^{\text{ДОП}} \\ P_{\text{УС}} \leq P_{\text{УС}}^{\text{ДОП}} \\ P_{\text{ЗИС}} \geq P_{\text{ЗИС}}^{\text{ДОП}} \\ K_{\Gamma} \geq K_{\Gamma}^{\text{ДОП}} \end{array} \right. \quad (6)$$

Выражение (6) формирует показатель эффективности функционирования защищенной ТКС СН, под которым понимают вероятность доведения сообщения за время, не превышающее допустимое (нормированное) значение при условии значений показателей конфиденциальности, целостности и доступности информации, вероятностей наличия уязвимостей и наличия механизмов защиты сети связи общего пользования, а также коэффициента готовности допустимым значениям.

### Заключение

Телекоммуникационные сети специального назначения являются одними из основных сетей полиции. Слабым звеном сетей с точки зрения обеспечения информационной безопасности является сеть связи общего пользования, предоставляющая ТКС СН каналы передачи. Это объясняется наличием специфических уязвимостей сети связи общего пользования, связанных с используемыми протоколами обмена, стандартов, характеристиками коммуникационного оборудования. Анализ данных уязвимостей необходим на этапе проектирования ТКС СН с целью предотвращения возможных угроз информационной безопасности, обеспечения заданного показателя эффективности функционирования защищенной сети. Передаваемая информация по телекоммуникационной сети должна обладать базовыми свойствами защищенности (конфиденциальностью, целостностью и доступностью), формируемыми программно-аппаратными средствами ЛКС1 и ЛКС2, а сама ТКС СН противодействовать угро-

зам информационной безопасности, формируемыми элементами сети и, прежде всего, сетью связи общего пользования.

### Библиографический список

1. О связи :федер. закон от 07.07.2003 №126-ФЗ (ред. от 06.06.2019, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.11.2019) // Собр. законодательства Рос. Федерации. - 2003. - № 28.
2. **Бабкин, А.Н.** Методические основы построения защищенных сетей подвижной и фиксированной радиосвязи: монография / А.Н. Бабкин // Воронеж: ВИ МВД России. – 2016. – С. 187.
3. **Сердюк, В.А.** Новое в защите от взлома корпоративных сетей: монография / В.А. Сердюк // М.:Техносфера. – 360 с.
4. **Олифер, В.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Олифер, Н. Олифер. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 992 с.
5. **Левин, Б.Р.** Теория надежности радиотехнических систем (математические основы) / Б.Р. Левин. – М.: Советское радио. – 1978. – 264 с.

**A.N. Babkin, A.Y. Kulichenko**

### PERFORMANCE INDICATOR FOR SPECIAL PURPOSE SECURE TELECOMMUNICATIONS NETWORK

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

**Purpose:** Develop a performance indicator for the operation of a secure special-purpose telecommunication network, which includes police telecommunication networks.

**Relevance, novelty:** the effectiveness of the management of police forces and facilities depends to a large extent on ensuring the information security of networks. Telecommunication networks are intended for transmission of messages, obtaining necessary service information stored on the server by police officers. Typically, police telecommunication networks refer to distributed networks using public communication networks to form transmission channels. This imposes additional requirements for information protection, as public communication networks have vulnerabilities that are not characteristic of local (within one building, controlled territory) telecommunication networks of police. These vulnerabilities are the cause of information attacks by the attacker on the telecommunication network of the police. When forming the performance indicator of the protected telecommunication network of special purpose, it is necessary to take into account the specifics of network construction: architecture, protocols used, standards, communication equipment, availability of alternative routes. Vulnerabilities are also possible due to the human factor: negligence of employees servicing communication equipment of public communication networks.

**The result:** a performance indicator of the protected special-purpose telecommunication network is formed, which means the probability of bringing the message within the time not exceeding the permissible (normalized) value provided the values of the indicators of confidentiality, integrity and availability of information, the probabilities of vulnerabilities and the presence of mechanisms of protection of the public communication network, as well as the readiness factor of permissible values.

**Keywords:** telecommunication network, information security, timeliness, confidentiality, integrity, accessibility, vulnerability, threats, reliability.

С.Н. Борисова

## БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Пензенский государственный университет,  
г. Пенза

Безопасность ПО достигается использованием совокупности мер, направленных на предотвращение появления и устранение уязвимостей программы. Уязвимость в ПО может возникнуть на различных этапах жизненного цикла ПО и при этом будет зависеть от разных факторов. На этапах проектирования, создания и тестирования программ потенциальные уязвимости возникают вследствие ошибок разработчика; на этапе эксплуатации программ вследствие невыявленных ранее уязвимостей в ПО могут возникнуть угрозы безопасности информации в системах, эксплуатирующих данное ПО. Угрозы также могут возникнуть вследствие неправильной эксплуатации ПО пользователем (отсутствие антивирусной защиты, скачивание и запуск вредоносных программ без предварительной проверки).

**Ключевые слова:** программное обеспечение, уязвимость программного обеспечения, вредоносные программы, безопасность программного обеспечения, статический анализ программного обеспечения, тестирование на проникновение.

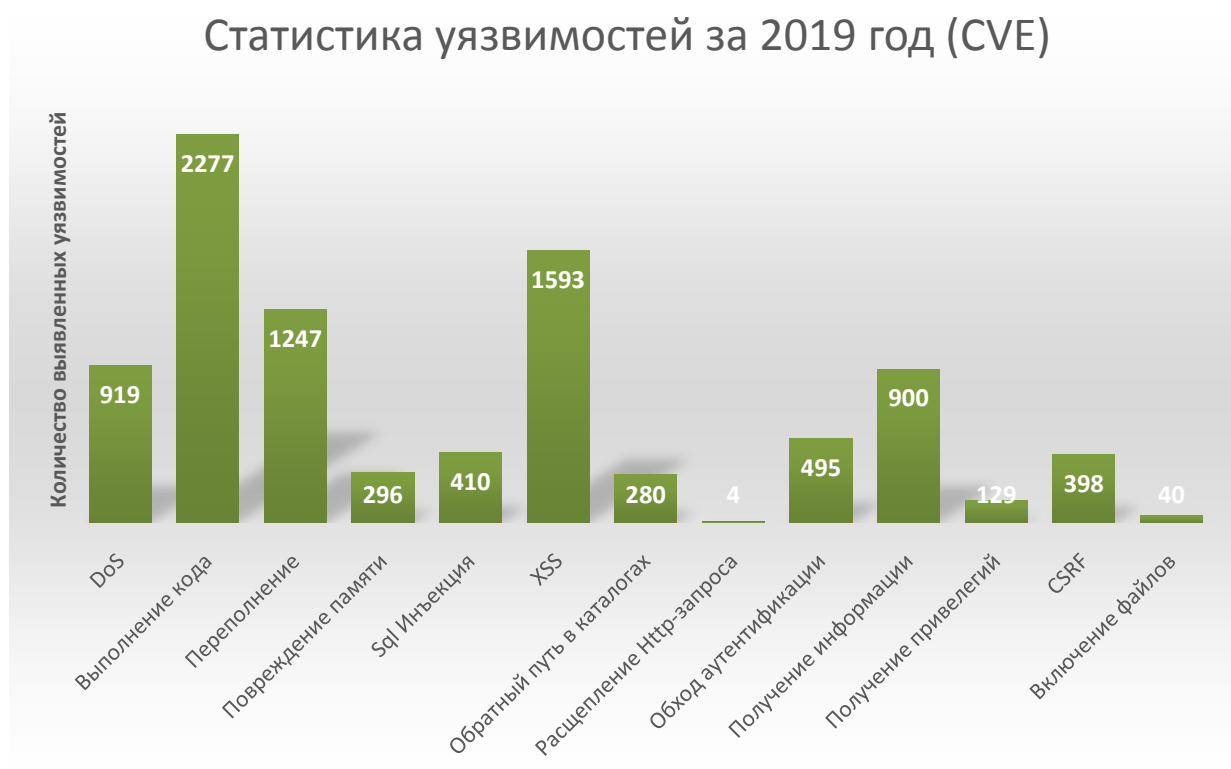
### Введение

В состав компьютерных систем обработки информации помимо технических средств входит также программное обеспечение (ПО), позволяющее им в комплексе выполнять заданные функции. Согласно ГОСТ Р 56939-2016 [1] под программным обеспечением понимают совокупность программ системы обработки информации, включая программные документы, необходимые для эксплуатации программного обеспечения. Любое программное обеспечение может содержать уязвимости, возникающие вследствие каких-либо недостатков в программе (ошибок, допущенных в ходе проектирования или реализации). Уязвимость ПО может привести к реализации угроз безопасности информации во всей компьютерной системе.

На рис.1 представлена статистика по уязвимостям программных систем за 2019 год (согласно базам общеизвестных уязвимостей CVE) [2]. Как видно, классическая, давно известная уязвимость «Переполнение буфера» занимает четвертое место по всем выявленным уязвимостям, и это, очевидно, следствие ошибок разработчика ПО. Вторая по популярности эксплуатируемая уязвимость - XSS (межсайтовый скриптинг). Она характерна для веб-приложений и заключается во внедрении вредоносного JavaScript кода в веб-страницу, который выполняется затем в браузере пользователя, загрузившего эту страницу. Данная уязвимость возникает из-за недостаточной фильтрации данных и поэтому также является ошибкой в разработке ПО или результатом недостаточно хорошо проведенного тестирования.

Уязвимость в ПО может возникнуть на различных этапах жизненного цикла ПО и при этом будет зависеть от разных факторов. Жизненный цикл ПО состоит из следующих основных стадий:

- 1) определение требований и проектирование ПО,
- 2) реализация ПО (программирование, кодирование),
- 3) тестирование и отладка,
- 4) подготовка технологической и эксплуатационной документации,
- 5) внедрение и эксплуатация,
- 6) сопровождение и поддержка,
- 7) снятие с эксплуатации.



**Рисунок 1. Статистика уязвимостей за 2019 год**

Данные этапы можно разделить на две группы, в которых факторы, влияющие на безопасность ПО, существенно различаются [3].

1. В первой группе (этапы с 1 по 4) факторы, влияющие на безопасность ПО, существенно зависят от разработчиков и используемых инструментальных средств разработки. На данных этапах уязвимость в программном обеспечении возникает вследствие разработки программы без учета требований по безопасной разработке ПО, ошибок в алгоритмах, использования несертифицированных инструментальных средств разработки, нерациональной организации вычислительного процесса, использования некачественных стандартов проектирования, преднамеренного внедрения программных закладок в код и т.п. Внесение защитных функций на данном этапе можно назвать обеспечением технологической безопасности.

2. Во второй группе (этапы 5,6) на безопасность ПО влияют факторы, не зависящие от разработчика, а скорее от администратора информационной безопасности или системного администратора (вредоносные программы, программные закладки, внедряемые в результате обратной разработке ПО). Внесение защитных функций на данном этапе можно назвать обеспечением эксплуатационной безопасности.



## Обеспечение технологической безопасности ПО

Технологическая безопасность ПО может быть обеспечена путем реализации разработчиком ПО мер по разработке безопасного ПО в процессах жизненного цикла ПО согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207[4]. К данным мерам можно отнести следующие:

- 1) определение и документация целей создания безопасного ПО и мер по его разработке,
- 2) обеспечение и реализация внутренних проверок соблюдения мер по разработке безопасного ПО,
- 3) проведение оценок ПО на соблюдение требования безопасности ПО,
- 4) создание руководства по разработке безопасного ПО.

На этапе разработки требований к ПО должны быть сформулированы требования по безопасности, предъявляемые к ПО. Например, требования к проведению идентификации и аутентификации, обеспечению защиты от несанкционированного доступа, к обязательной обработке исключительных ситуаций и программных ошибок.

На этапе проектирования ПО должны быть смоделированы угрозы безопасности ПО и уточнен проект программы с учетом результатов моделирования. На данном этапе также можно сформировать исходные данные для проведения фаззинг-тестирования, динамического анализа программы, тестирования на проникновение. Под динамическим анализом понимают анализ программы в режиме непосредственного исполнения. При динамическом анализе используют программы отладчики (WinDBG, EDB, X32(64)dbg, GDB, Radare2). Фаззинг-тестирование подразумевает передачу программе случайных данных, не предусмотренных ее алгоритмом. Под тестированием на проникновение понимают моделирование действий потенциального нарушителя при взломе программы.

На этапе кодирования (программирования) необходимо обеспечить использование только идентифицированных инструментальных средств разработки. При создании программы использовать уточненный проект архитектуры ПО, созданный на предыдущем этапе. Для готового кода необходимо провести статический анализ и экспертизу исходного кода. Под статическим анализом понимают анализ исходного кода программы с помощью специальных инструментальных средств (статических анализаторов) без реального выполнения кода. Статический анализ кода - это процесс выявления ошибок и недочетов в исходном коде программы. Статический анализатор выполняет автоматизированный процесс обзора кода, являющийся одним из самых старых и надежных методов выявления дефектов. В качестве статических анализаторов можно использовать Microsoft Application Inspector, PVS-Studio, Coverity. Под экспертизой исходного кода понимают выявление в исходном коде потенциально уязвимых конструкций. На данном этапе также необходимо сформировать исходные данные (перечень выявленных потенциально уязвимых конструкций в исходном коде программы), которые будут использоваться при тестировании и исследовании программы. Результатом данного этапа должен быть программный код с устранёнными потенциальными уязвимостями и дефектами.

На этапе тестирования программы необходимо выполнить квалификационное тестирование, которое включает: функциональное тестирование, тестирование на проникновение, динамический анализ кода с учетом подготовленных на предыдущих этапах исходных данных для тестирования. Целью данного этапа является подтверждение того, что ПО обеспечивает

выполнение сертифицированных требований по безопасности. В результате данного этапа должны быть устранены найденные в результате тестирования уязвимости и недостатки.

### Обеспечение эксплуатационной безопасности

На этапе внедрения и эксплуатации ПО обеспечение безопасности ПО должно осуществляться не только разработчиком ПО, но и пользователем (отделами информационной безопасности организации, системными программистами).

Со стороны разработчика на этапе инсталляции программы необходимо обеспечить защиту от угрозы нарушения целостности программы. Разработчик ПО должен применять технические и организационные меры, необходимые для обнаружения модификации ПО. Разработчик также должен периодически выполнять поиск ошибок и устранять найденные уязвимости в программе путем выпуска обновлений.

Со своей стороны пользователь или отдел информационной безопасности организации должны обеспечить защиту от вредоносных программ и программных закладок. На рис.2 представлена статистика вредоносных программ от Лаборатории Касперского, которые были обнаружены в 2019 году [5]. Большею частью в этой таблице представлены троянские программы и хакерские утилиты, также присутствует вредоносная программа из категории вирус. Классификация вредоносных программ подробно рассмотрена в [6].

	Вердикт	%*
1	DangerousObject.Multi.Generic	26,43
2	Trojan.Multi.BroSubsc.gen	9,48
3	Trojan.Script.Generic	6,19
4	Trojan.Multi.GenAutorunReg.a	5,94
5	HackTool.Win64.HackKMS.b	4,40
6	HackTool.MSIL.KMSAuto.by	3,69
7	HackTool.Win32.KMSAuto.bu	3,54
8	Trojan.WinLNK.Agent.gen	3,45
9	HackTool.MSIL.KMSAuto.a	3,43
10	Trojan.WinLNK.Starter.gen	3,42
11	HackTool.MSIL.KMSAuto.dh	2,83
12	HackTool.Win32.KMSAuto.c	2,75
13	HackTool.MSIL.KMSAuto.di	2,65
14	Trojan.Win32.Generic	2,53
15	HackTool.Win32.KMSAuto.cb	2,50
16	HackTool.Win64.HackKMS.c	2,47
17	HackTool.MSIL.KMSAuto.bx	2,18
18	Trojan.Win32.AutoRun.gen	1,93
19	Virus.Win32.Sality.gen	1,90
20	HackTool.Win32.KMSAuto.m	1,90

Рисунок. 2. Локальные вредоносные объекты на компьютерах пользователей по статистике Лаборатории Касперского за 2019 год

Для защиты от вредоносных программ необходимо использовать антивирусное ПО. Также для проверки файлов в последнее время активно используются так называемые «песочницы». Под «песочницей» понимают среду защищенного исполнения программ [7]. Недавно компания Sophos сообщила, что Windows-утилита Sandboxie (одна из популярных «песочниц») стала бесплатной. Лаборатория Касперского в прошлом году анонсировала свою программу – Kaspersky Sandbox.

## Выводы

Безопасность ПО достигается использованием совокупности мер, направленных на предотвращение появления и устранение уязвимостей программы на различных этапах жизненного цикла программы. В соответствии с учетом жизненного цикла разработки ПО выделяют технологическую и эксплуатационную безопасность ПО. При обеспечении технологической безопасности ПО необходимо руководствоваться требованиями, указанными в руководствах [1,4]: при разработке ПО использовать только сертифицированные инструментальные средства, выполнять квалификационное тестирование и устранять уязвимости и недостатки в программах после каждого этапа проектирования и разработки ПО. При внедрении, эксплуатации и сопровождении ПО от разработчика требуется обеспечение целостности программ при установке, постоянной проверки программ на наличие уязвимостей и при необходимости выпуске обновлений безопасности. Со стороны пользователя требуется использование дополнительных средств защиты (антивирусных программ, сред защищенного исполнения программ).

## Библиографический список

1. ГОСТ Р 56939-2016 Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200135525>. (Дата обращения 10.02.2020).
2. База уязвимостей CVE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cvedetails.com/vulnerabilities-by-types.php>. (Дата обращения 10.02.2020).
3. **Казарин, О.В.** Теория и практика защиты программ / О.В. Казарин. – 2004. – 450 с.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-12207-2010>. (Дата обращения 17.02.2020).
5. KasperskySecurityBulletin 2019. Статистика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/KSB\\_2019\\_Statistics\\_RU.pdf](https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/KSB_2019_Statistics_RU.pdf). (Дата обращения 17.02.2020).
6. **Борисова, С. Н.** Вредоносные программы: классификация и особенности // Современные информационные технологии. - 2009. - № 10. - С. 170-172.
7. **Петрунин, С.В.** Защищенная среда запуска приложений (SANDBOX) / С.В. Петрунин, Н.К. Теплов, С.Н. Борисова // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы Сборник научных статей Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. Под редакцией Л.Р. Фионовой. 2018. - С. 216-218.

**S.N. Borisova**

## **SOFTWARE SECURITY FOR COMPUTER SYSTEMS**

Penza state University

SOFTWARE security is achieved by using a set of measures aimed at preventing the appearance and elimination of program vulnerabilities. Vulnerability in SOFTWARE can occur at different stages of the SOFTWARE lifecycle and will depend on different factors. At the design, development, and testing stages, potential vulnerabilities arise as a result of developer errors. At the program operation stage, information security risks may arise in systems that use this SOFTWARE due to previously undetected vulnerabilities in the SOFTWARE. Threats can also occur due to improper use OF the software by users (lack of anti-virus protection, downloading and running malware without prior verification).

**Keywords:** software, software vulnerability, malware, software security, static software analysis, penetration testing

К. А. Батенков

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ГРАНИЧНЫХ ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ

Академия ФСО России, г. Орёл

В работе проведен сравнительный анализ методов граничных оценок надежности структур сетей связи на конкретном примере.

**Ключевые слова:** сети связи, надежность, границы Эзари – Прошана, границы Литвака – Ушакова, вероятность связности.

### Введение

Существенным достоинством методов перебора типовых (связных или несвязных) состояний является то, что на их основе возможно получать граничные оценки вероятности связности сети. Так, при расчете границ Эзари – Прошана [1–5] используется полный набор несвязных (для верхней) и связных (для нижней) состояний сети связи. Данные границы основаны на утверждении, что вероятность связности сети при тех же условиях выше (ниже), чем у сети, составленной из последовательного (параллельного) соединения полного набора независимых несвязных (связных) подграфов. При расчете границ Литвака – Ушакова используются только реберно-непересекающиеся сечения (для верхней) и связные подграфы (для нижней), то есть подмножества элементов такие, в которых какой-либо элемент не встречается дважды [3, 6–8]. В данной границе учтено широко известное естественное свойство монотонности, заключающееся в уменьшении (увеличении) надежности сети при снижении (повышении) надежности любого элемента.

### Верхняя граница Эзари – Прошана

При расчете верхней границы Эзари – Прошана используется полный набор связных состояний сети связи (простых цепей) [9, 10].

Обозначим  $G_i, i = 1, 2, \dots, n$  – множество всех подграфов (простых цепей) исходного графа  $G$ , а событие, заключающееся в исправности всех элементов связного подграфа  $G_i$ , также обозначено  $G_i$ . Вероятность несвязности сети больше, чем вероятность неработоспособности параллельно соединенных всех независимых минимальных связных подграфов. Подобное утверждение равносильно тому, что вероятность связности сети меньше при прочих равных условиях, чем у сети, включающей параллельное соединение всего набора независимых связных подграфов. Таким образом, верхняя оценка Эзари – Прошана для вероятности связности сети имеет вид [18]

$$P_G \leq P_e^+ = 1 - \prod_{i=1}^n q_i,$$

где  $q_i = P(\overline{G}_i)$  – вероятность несвязности связного подграфа  $G_i, i = 1, 2, \dots, n$ .

Если связный подграф  $G_i$  состоит из  $n_i$  элементов с вероятностью исправной работы  $p_{i,j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_i$ , то вероятность несвязности подграфа определяется выражением

$$q_i = 1 - \prod_{j=1}^{n_i} p_{i,j}.$$

### Нижняя граница Эзари – Прошана

При расчете нижней границы Эзари – Прошана используется полный набор несвязных состояний сети связи (сечений) [9–11].

Обозначим  $G_i'$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – множество всех сечений (двухполюсной сети) исходного графа  $G$ , а событие, заключающееся в том, что все элементы сечения  $G_i'$  неисправны, также обозначено как  $G_i'$ . Нижняя оценка Эзари – Прошана для вероятности связности сети имеет вид [18]

$$p_G \geq p_e^- = \prod_{i=1}^n p_i,$$

где  $p_i = P(\overline{G_i'})$  – вероятность связности хотя бы одного элемента сечения  $G_i'$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Если сечение  $G_i'$  состоит из  $n_i$  элементов с вероятностью неисправной работы  $q_{i,j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_i$ , вероятность связности хотя бы одного элемента этого сечения определяется выражением

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^{n_i} q_{i,j}.$$

### Верхняя граница Литвака – Ушакова

При расчете верхней границы Литвака – Ушакова используются только реберно-непересекающиеся сечения, то есть подмножества элементов такие, в которых какой-либо элемент не встречается дважды [1, 12-15].

Структуры сетей связи обладают естественным свойством монотонности [19]: снижение надежности любого элемента приводит к уменьшению надежности сети. Идея данной оценки оценок базируется на этом свойстве монотонных структур. Выделим в графе сети связи  $G$  различные наборы взаимно независимых минимальных сечений  $G_i'$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Для любого из наборов  $N_k$  выполняется условие  $p_G \leq p_k$ , то есть верхняя граница Литвака–Ушакова  $p_i^+$  имеет вид

$$p_G \leq p_i^+ = \min_{k=1, 2, \dots, N} p_k.$$

Для нахождения вероятностей  $p_k$  учтем, что набор  $H_k$  включает  $m_k$  сечений, то есть  $H_k = \{G'_{k,i}\}_{i=1,2,\dots,m_k}$ ,  $G'_{k,i}$  –  $i$ -е сечение в  $k$ -м наборе с вероятностью связности  $p_{k,i}$ . Следовательно,

$$p_k = \prod_{i=1}^{m_k} p_{k,i}.$$

При этом аналогично ранее рассмотренному варианту, если сечение  $G'_{k,i}$  состоит из  $n_{k,i}$  элементов с вероятностью неисправной работы  $q_{k,i,j}$ ,  $j=1,2,\dots,n_{k,i}$ , вероятность связности хотя бы одного элемента этого сечения определяется выражением

$$p_{k,i} = 1 - \prod_{j=1}^{n_{k,i}} q_{k,i,j}.$$

В практических приложениях нет необходимости определять все возможные наборы независимых сечений. Если верхняя граница Литвака–Ушакова будет найдена не на всем множестве возможных наборов минимальных сечений, то она все же будет являться верхней границей, хотя может оказаться, что и не очень точной. Данное обстоятельство является очень важным, поскольку позволяет достаточно быстро построить неточную верхнюю границу.

### Нижняя граница Литвака – Ушакова

При расчете нижней границы Литвака–Ушакова используются только реберно-непересекающиеся связные подграфы, то есть подмножества элементов такие, в которых какой-либо элемент не встречается дважды [12–17].

Выделим в графе сети связи  $G$  разные наборы взаимно независимых минимальных связных подграфов  $G_i, i=1,2,\dots,n$ , а остальные элементы удалим из сети, снизив их надежность до минимально возможного значения (нуля), уменьшая тем самым и надежность сети в целом. Для любого из наборов  $N_k$  выполняется условие  $p_G \geq p_k$ , то есть нижняя граница Литвака – Ушакова  $p_l^-$  имеет вид

$$p_G \geq p_l^- = \max_{k=1,2,\dots,N} p_k.$$

Для построения таких наборов  $H_k$  независимых связных подграфов может быть использован следующий набор рекомендаций, дающий хорошие практические результаты [19].

Для нахождения вероятностей  $p_k$  учтем, что набор  $H_k$  включает  $m_k$  связных подграфов, то есть  $H_k = \{G_{k,i}\}_{i=1,2,\dots,m_k}$ ,  $G_{k,i}$  –  $i$ -й связный подграф в  $k$ -м наборе с вероятностью связности  $p_{k,i} = 1 - q_{k,i}$ . Следовательно,

$$p_k = 1 - \prod_{i=1}^{m_k} q_{k,i}.$$

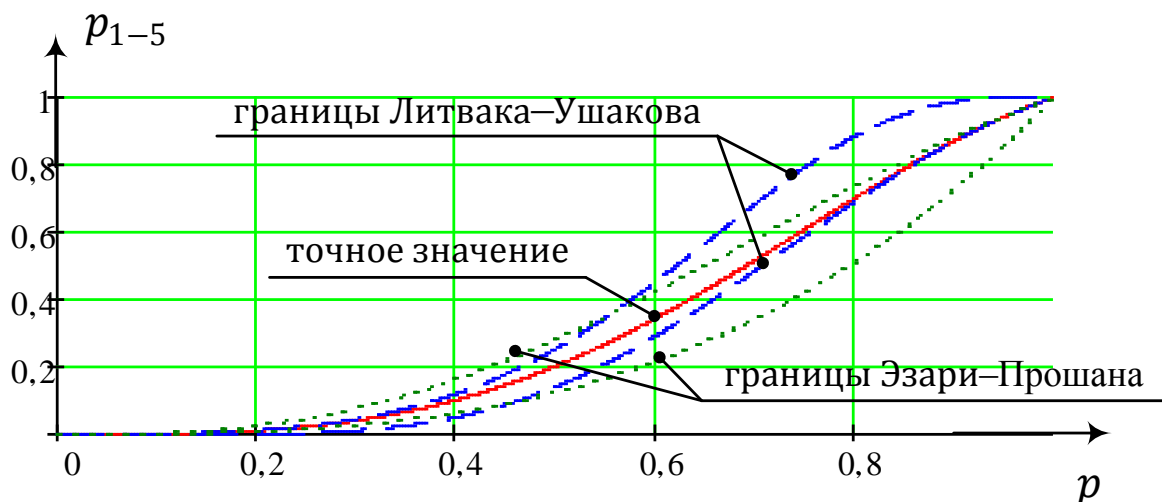
При этом аналогично ранее рассмотренному варианту, если связный подграф  $G_{k,i}$  состоит из  $n_{k,i}$  элементов с вероятностью исправной работы  $p_{k,i,j}$ ,  $j=1,2,\dots,n_{k,i}$ , то вероятность связности этого подграфа определяется выражением

$$P_{k,i} = \prod_{j=1}^{n_{k,i}} p_{k,i,j}.$$

Аналогично случаю наборов независимых сечений, также возможно определять негарантированную нижнюю оценку, вовлекая не все возможные наборы связных подграфов, а меньшее их число.

### Сравнительный анализ граничных оценок

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости верхних и нижних границ надежности сети связи, представленной на рис. 3 от надежности ее элементов. Все узлы сети являются абсолютно надежными, а вероятность исправности любой линии связи обозначена как  $p$  [18, 19].

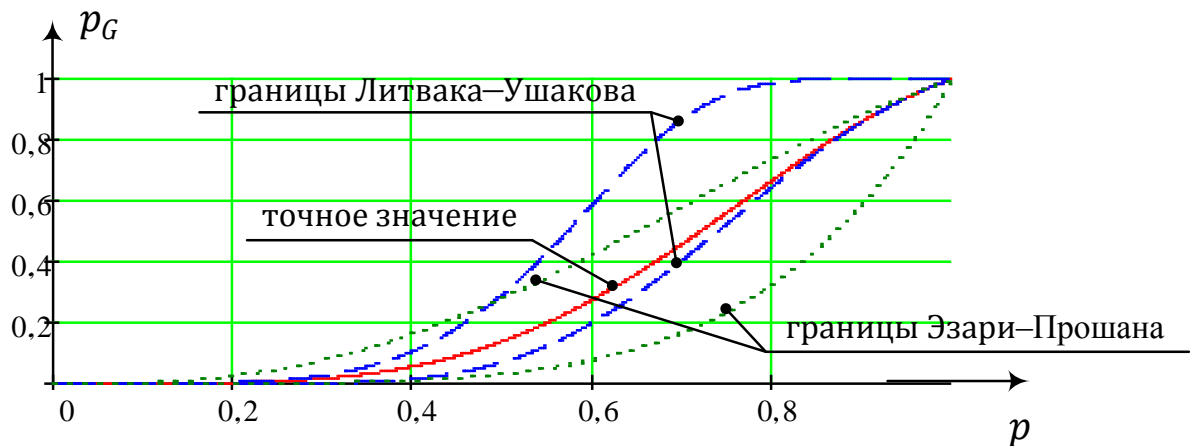


**Рисунок 1. Зависимости вероятности связности  $p_{1-5}$  графа, представленного на рис. 3, в направлении 1–5 от надежности  $p$  составляющих его ребер с граничными оценками**

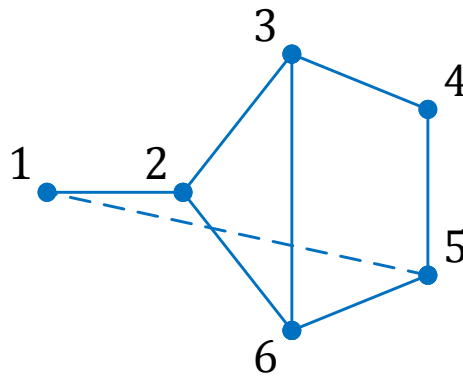
Данные зависимости демонстрируют, что верхняя граница Эзари – Прошана дает лучший результат при высоких значениях вероятности исправности линий связи  $p$ , а нижняя граница Литвака–Ушакова – для малых значений  $p$ . Заметим, что на практике чаще встречаются  $p$ , близкие к единице [1, 5], то есть граница Эзари – Прошана в этом смысле оказывается лучшей для большинства исследуемых сетей связи.

Однако с вычислительной точки зрения границы Эзари–Прошана обладают огромным недостатком: они требуют перечисления всех связных подграфов для вычисления верхней границы и всех минимальных разрезов для нижней, что само по себе нетривиально.





**Рисунок 2.** Зависимости вероятности связности  $p_G$  графа, представленного на рис. 3, в целом от надежности  $p$  составляющих его ребер с граничными оценками



**Рисунок 3.** Граф исследуемой сети связи

Попытка найти приближенную верхнюю или нижнюю границу Эзари – Прошана путем сокращения числа рассматриваемых связных подграфов в первом случае и числа минимальных разрезов во втором может привести к серьезным ошибкам. Представим себе, что, рассматривая верхнюю границу, мы не будем перечислять все связные подграфы, а ограничимся лишь некоторыми из них. Верхняя граница Эзари – Прошана понизится – формально улучшится. Продолжим эту процедуру улучшения верхней границы Эзари – Прошана. В какой-то момент останутся лишь независимые связные подграфы, то есть верхняя граница Эзари – Прошана совпадет с одной из нижних границ Литвака – Ушакова. Таким образом, полученная приближенная оценка Эзари – Прошана потеряет смысл верхней оценки. Это показывает несостоятельность подобных упрощений: нет гарантий, что на каком-то шаге «улучшения» границы Эзари – Прошана она не потеряет свойство оценки.

То же самое относится и к нижней границе Эзари – Прошана: исключая разрезы из полного набора, можно прийти к тому, что оставшиеся разрезы будут независимыми, а нижняя оценка Эзари – Прошана совпадет с верхней границей Литвака – Ушакова. Подобная приближенная граница Эзари – Прошана потеряет смысл нижней границы.

Границы Литвака – Ушакова лишены указанных недостатков. Вычисляя их, можно остановиться на любом шаге перебора вариантов наборов независимых связных и несвязных со-

стояний графа. Несмотря на то, что найденная оценка является наилучшей границей Литвака – Ушакова, тем не менее, любая из полученных оценок будет оставаться нижней границей или, соответственно, верхней.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. **Дудник, Б. Я.** Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко; под ред. Б. Я. Дудинка // М.: Радио и связь. 1984. - 216 с.
2. **Филин, Б. П.** Методы анализа структурной надежности сетей связи / Б.П. Филин.- Москва : Радио и связь, 1988. – 208 с.
3. **Ушаков, И. А.** Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов / И. А. Ушаков. – Москва : Дрофа, 2008. – 239 с.
4. **Половко, А.М.** Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. **ГОСТ Р 53111–2008.** Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. // М. : Стандартинформ. 2009. 16 с.
6. **Обоскалов, В.П.** Структурная надежность электроэнергетических систем: учеб. пособие / В.П. Обоскалов. - Екатеринбург: УрФУ. 2012. - 194 с.
7. **Zuev K. M., Wu S. & Beck J. L.** Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation // Probabilistic Engineering Mechanics 40. P. 25–35.
8. **Батенков, К. А.** Числовые характеристики структур сетей связи // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 5–28.
9. **Mussel, C., Hopfensitz M., Kestler H. A.** Boolnet package vignette. 2015.
10. **Teruggia, R.** Reliability Analysis of Probabilistic Networks, PhD Thesis, Univ. of Turin, School of Doctorate in Science and High Technology, January 2010.
11. **Батенков, К. А.** Общие подходы к анализу и синтезу структур сетей связи // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции. 2017. С. 19–23.
12. **Nozaki, T., Nakano T., Wadayama T.** Analysis of Breakdown Probability of Wireless Sensor Networks with Unreliable Relay Nodes // 2017 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Aachen, Germany. 2017. pp. 481–485.
13. **Takabe, S., Nakano T., Wadayama T.** Fault Tolerance of Random Graphs with respect to Connectivity: Phase Transition in Logarithmic Average Degree // arXiv:1712.07807, 2017.
14. **Zhao, J., Yagan O., Gligor V.** On the Strengths of Connectivity and Robustness in General Random Intersection Graphs // 53rd IEEE Conf. Decision and Control, Dec. 2014. pp. 3661–3668.
15. **Yagan, O. Makowski A. M.** Zero-one Laws for Connectivity in Random Key Graphs // IEEE Trans. Inf. Theory, May 2012. Vol. 58. No. 5. pp. 2983–2999.
16. **Батенков, К. А.** Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 5. С. 1093-1118.
17. **Huh, J.** H-vectors of matroids and logarithmic concavity // Adv. Math., 2015. No 270. pp. 49–59.
18. **Батенков, К.А.** Об анализе живучести сетей связи на основе вероятностного подхода // В сборнике: Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с

международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2016. – С. 6–8.

19. **Батенков, К.А.** Анализ надежности многополюсных сетей связи на основе метода минимальных сечений // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019) Сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Под. редакцией С.В. Бачевского. 2019. С. 108–112.

**К.А. Batenkov**

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR BOUNDARY ESTIMATION OF RELIABILITY OF COMMUNICATION NETWORK STRUCTURES**

Academy of Federal Guard Service

The paper presents a comparative analysis of methods for boundary estimates of the reliability of communication network structures on a specific example.

**Keywords:** network communication, reliability, borders AsariPrasana, the boundaries of Litvak-Ushakov, the probability of connectivity.

К.А. Батенков, А.Б. Фокин, А.Н. Переверзев

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ПУТЕЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ С ДВУХПОЛЮСНОЙ СВЯЗНОСТЬЮ

Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

Расчетная модель телекоммуникационной сети представлена в виде обобщенной модели Эрдеша – Реньи, на основании которой производится процедура формирования множеств путей для сетей двухполюсной связности.

**Ключевые слова:** сеть связи, граф, модель, путь, вероятность связности, устойчивость, двухполюсная связность, матрица.

### Введение

Существенный рост как размеров, так и сложности телекоммуникационных сетей приводит не только к большей их подверженности различного рода отказам, но и выносит на первый план проблемы, связанные с анализом устойчивости (надежности, живучести). Эти системы могут быть и локальными, и глобальными.

В свою очередь, задачи анализа надежности (устойчивости, живучести) характерны не только для телекоммуникаций, но и для систем, чьи компоненты подвержены одному или нескольким видам отказов, например, транспортные, энергетические, механические системы, интегральные цепи и даже программное обеспечение. Такие системы можно представить в форме сети, описывающей взаимосвязь ее отдельных элементов (вершин и ребер). Так, для телекоммуникаций каждая вершина сети представляет собой отдельное устройство, а ребра – линии связи между ними. При этом в зависимости от состояния ребер и вершин (работоспособное или отказ) сама сеть может быть работоспособной либо нет.

Для большинства сетей связи необходимым условием нормального функционирования является постоянная доступность заданного набора вершин и как следствие, высокая надежность сети. В большинстве случаев сети строятся с учетом наличия сразу нескольких путей распространения информации между любой парой вершин. Пути могут быть разнесены между заданной парой вершин, считается идеальным случаем или как допущение, предполагающее наличие между любой парой вершин нескольких непересекающихся множеств путей, а также маршрутов включающих общие ребра.

Основной проблемой в данной области является определение надежности подобных сетей, а также задание некоторых количественных показателей требуемых характеристик сети.

### Формирование множества путей в телекоммуникационных сетях с двухполюсной связностью

В настоящее время оценка устойчивости (надежности, живучести) немыслима без использования теории графов. Логический подход предполагает декомпозицию системы на ряд небольших функциональных элементов и в рамках телекоммуникационных сетей они обычно представляют собой отдельные сетевые устройства (коммутаторы, маршрутизаторы, терминалы и прочее), а также линии связи между ними (различные среды передачи). Считается,

что отказы устройств сравнительно менее вероятны, чем отказы линий связи, это предполагает считать данные устройства абсолютно устойчивыми (надежными, живучими).

Модель телекоммуникационной сети представим в виде обобщенной модели Эрдеша – Реньи[2]. В ней рассматривается случайный граф  $G$ , в котором жестко задано множество вершин  $V = \{1, \dots, v\}$  с мощностью  $v$ . Случайными в нем являются только ребра. Анализируются графы, в которых отсутствуют кратные ребра (мультиграфы), петли (псевдографы) и направленные ребра (орграфы). Всего потенциальных ребер в графе  $G_l = C_n^2$  штук. Вероятность существования ребра между вершинами  $i$  и  $j$  обозначена через  $p_{i,j} \in [0, 1]$  и не зависит от всех остальных  $l - 1$  ребер. Предполагая, что  $L$  – случайное множество ребер, случайный граф  $G$  приобретает форму обобщенной модели Эрдеша – Реньи, то есть  $G = (V, L)$ . Тогда вероятность  $p_G$  существования конкретного графа  $G$  есть

$$p_G = \prod_{(i,j) \in L} p_{i,j} \prod_{(i,j) \notin L} (1 - p_{i,j}).$$

В подобной постановке вероятность  $p(S)$  обладания случайным графом  $G$  некоторым свойством трактуется как сумма вероятностей  $p_G$  существования графов, принадлежащих множеству  $S$ , для которого это свойство выполняется, то есть

$$p(S) = \sum_{G \in S} p_G.$$

В контексте устойчивости телекоммуникационной сети под рассматриваемым свойством понимают связность сети в той или иной форме, а, следовательно, вероятность  $p(S)$  связности сети оценивается как сумма вероятностей  $p_G$  всех связных графов (на заданном множестве вершин), формирующих множество  $S$ . Также вероятность связности сети может трактоваться в рамках терминов коэффициента готовности, коэффициента оперативной готовности [3] и других показателей, характеризующих работоспособность телекоммуникационной сети [4].

Основываясь на представлении о понятии стохастической связности сети, как соответствии некоторого случайного графа свойства связности между заданным набором вершин, традиционно выделяют три меры связности: *двухполюсная, многополюсная и всеполюсная*.

*Двухполюсная связность* – это свойство сети, характеризующее наличием хотя бы одного пути между заданной парой вершин.

Событие связности рассматривается как существование некоторого подграфа  $S_i$  в конкретной реализации графа  $G$ , содержащего заданные вершины, исходного случайного графа  $G$  и однозначно являющегося деревом, листьями которого могут быть только эти заданные вершины. Для двухполюсной сети этими подграфами  $S_i$  оказываются деревья, содержащие заданную пару вершин, и по сути являющиеся путями.

Таким образом, множество  $S$  графов, для которого выполняется свойство связности, имеет следующий вид:

$$S = \{G: \exists S_i \subseteq G\}, \quad (1)$$

то есть множество  $S$  состоит из всех графов  $G$ , для которых существует хотя бы один подграф  $S_i$ , содержащийся в графе  $G$ .

Формально процедуру формирования множества путей целесообразно разбить на три этапа. На первом синтезируют множество путей от источника ко всем возможным вершинам, на втором отбирают из полученного множество только те пути, стоки которых совпадают с заданным стоком, а на третьем преобразуют пути в векторную форму.

Исходными данными является матрица смежностей  $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}_{i,j=1,v}$  случайного графа  $G$ [7], элементами  $a_{i,j}$  которой являются

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & p_{i,j} \neq 0, \\ 0, & p_{i,j} = 0. \end{cases}$$

Отметим, что естественным упрощением для детерминированного графа, вероятности связности ребер которого могут принимать значения только нуль или единица, а  $\text{nor}_{i,j} = \{0; 1\}$ , является представление, основанное на множестве  $L'$  относительно надежных ребер

$$L' = \{(i, j): p_{i,j} \neq 0\}.$$

Тогда элементы матрицы связностей принимают классический вид:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in L', \\ 0, & (i, j) \notin L'. \end{cases}$$

Заданное направление связи образуется двумя вершинами: истоком с номером  $v_s$  и стоком с номером  $v_t$ .

Изначально образуют матрицу путей единичной длины  $\mathbf{W}_0$  по следующему правилу. Каждый новый  $k$ -й столбец этой матрицы добавляется к уже существующим в случае наличия соответствующего ребра  $(v_s, i)$ , у графа  $G$ , а последовательный перебор производится по всем  $v$  вершинам графа:

$$\mathbf{W}_1^{(1)} = \left\{ \left[ \begin{array}{c} v_s \\ \min(i) \end{array} \right] : a_{v_s, i} = 1, i = 1, \dots, v \right\}, \quad (2)$$

$$\mathbf{W}_1^{(k)} = \left\{ \left[ \begin{array}{c} v_s \\ \min(i) \end{array} \right] : a_{v_s, i} = 1, [\mathbf{W}_1]_{2, k-1} < v, i = [\mathbf{W}_1]_{2, k-1} + 1, \dots, v \right\}, k \leq v, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}^{(k)}$  –  $k$ -й столбец матрицы  $\mathbf{X}$ ;  $\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}$  – вектор, построчно составленный из элементов  $i$  и  $j$ ;  $[\mathbf{X}]_{i,j}$  – элемент матрицы  $\mathbf{X}$ , стоящий на  $i$ -й строке в  $j$ -м столбце.

Отметим, что в случае отсутствия путей единичной длины матрица  $\mathbf{W}_1$  формироваться не будет (случай графа без ребер), а при их наличии – она будет состоять из двух строк, где первая строка будет заполнена элементами, значения которых будут равны номеру истока  $v_s$ , а во второй строке будут последовательно с меньшего к большему перечислены все смежные истоку вершины.

Последующие матрицы  $\mathbf{W}_m, m = 2, \dots, v - 1$ , являются матрицами путей длины  $m$  и формируются так, чтобы не образовывались петли. Каждый новый  $k$ -й столбец таких матриц добавляется к уже существующим в случае наличия соответствующего ребра  $(s', j), j = 1, \dots, v$ , у графа  $G$ , а последовательный перебор производится сначала по всем строкам матрицы  $\mathbf{W}_{m-1}$ , а затем по всем  $v$  вершинам графа:

$$\mathbf{W}_m^{(1)} = \left\{ \left[ \begin{array}{c} \mathbf{W}_{m-1}^{(i)} \\ \min(j) \end{array} \right] : a_{s', j} = 1, j \notin \mathbf{W}_{m-1}^{(i)}, j = 1, \dots, v \right\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_m^{(k)} = \left\{ \left[ \begin{array}{c} \mathbf{W}_{m-1}^{(i)} \\ \min(j) \end{array} \right] : a_{s', j} = 1, j \notin \mathbf{W}_{m-1}^{(i)}, [\mathbf{W}_m]_{m+1, k-1} < v, \right. \quad (5)$$

$$\left. j = [\mathbf{W}_m]_{m+1, k-1} + 1, \dots, v, s' = [\mathbf{W}_{m-1}]_{m, i}, i = 1, \dots, \text{cols}(\mathbf{W}_{m-1}) \right\},$$

где  $\begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ j \end{bmatrix}$  – блочный вектор, составленный из вектора  $\mathbf{X}$  и скаляра  $j$ ;  $\text{cols}(\mathbf{X})$  – число столбцов матрицы  $\mathbf{X}$ .

Отметим, что путь максимальной длины в любом графе на единицы меньше числа вершин графа, что соответствует матрице  $\mathbf{W}_{v-1}$ .

В результате данной процедуры образуется  $v - 1$  матриц путей, стоками в которой являются произвольные вершины. Для отбора путей, полезных для анализа, необходимо отбросить все пути, за исключением тех, стоки которых соответствуют вершине  $v_t$ . Тогда форми-

руются матрицы путей  $\mathbf{W}'_m, m = 1, \dots, v - 1$ , от истока  $v_s$  к стоку  $v_t$  путем последовательно перебора по всем матрицам путей  $\mathbf{W}_m$  и столбцам каждой из этих матриц:

$$\mathbf{W}'_m \langle 1 \rangle = \left\{ \mathbf{W}_m^{(\min(i))} : v_t = [\mathbf{W}_m]_{m+1,i}, i = 1, \dots, \text{cols}(\mathbf{W}_m) \right\}, \quad (6)$$

$$\mathbf{W}'_m \langle k \rangle = \left\{ \mathbf{W}_m^{(\min(i))} : v_t = [\mathbf{W}_m]_{m+1,i}, [\mathbf{W}'_m]_{m+1,k-1} < \text{cols}(\mathbf{W}_m), \right. \\ \left. i = [\mathbf{W}'_m]_{m+1,k-1} + 1, \dots, \text{cols}(\mathbf{W}_m) \right\}, \quad (7)$$

Отметим, что в результате некоторые матрицы  $\mathbf{W}'_m$  могут просто не существовать из-за отсутствия пути длины  $m$  между истоком  $v_s$  и стоком  $v_t$ .

Конечным этапом формирования множества путей является преобразование полученных матриц путей  $\mathbf{W}'_m$  к общему виду единой матрицы путей  $\mathbf{W} = \{w_{i,j}\}_{i=1,\dots,l, j=1,\dots,s}$ , где  $s$  – общее

число путей, каждый столбец которой соответствует определенному пути, а строка – ребру. Для этого все ребра  $(i, j) \in L', i, j = 1, \dots, v$ , упорядочиваются и им присваиваются обычно в порядке возрастания номеров инцидентных вершин определенные номера  $k = 1, \dots, l$ , то есть производится сопоставление между парами вершин и ребрами:  $(i, j) \rightarrow k$ . Таким образом, элементы матрицы путей  $\mathbf{W}$  образуются по следующему правилу:

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, i \in L'_j, \\ 0, i \notin L'_j, \end{cases} \quad (8)$$

где  $L'_j \in L'$  –  $j$ -й путь.

Процедура формирования матрицы путей  $\mathbf{W}$  на основе матриц  $\mathbf{W}'_m$  довольно проста и использует последовательный перебор всех столбцов ранее определенных матриц  $\mathbf{W}'_m, m = 1, \dots, v - 1$ ,

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, i \in \mathbf{W}'_m \langle k \rangle, \\ 0, i \notin \mathbf{W}'_m \langle k \rangle, \end{cases} \\ j = \begin{cases} k, j \leq \text{cols}(\mathbf{W}'_1), \\ k + \sum_{r=1}^{m-1} \text{cols}(\mathbf{W}'_r), j > \text{cols}(\mathbf{W}'_1). \end{cases} \quad (9)$$

Отметим также, что общее количество путей  $s$  между заданной парой вершин заранее, основываясь только на виде матрицы смежностей  $\mathbf{A}$ , определить практически невозможно [8], однако матрицы путей позволяют это сделать

$$s = \text{cols}(\mathbf{W}) = \sum_{r=1}^m \text{cols}(\mathbf{W}'_r)$$

Рассмотрим реализацию предложенных процедур на примере.

Структура сети представлена на рис. 4. Источник и сток (полюса) на рисунке отмечены квадратами:  $v_s = 1, v_t = 5$ . Матрица смежностей графа данной сети имеет вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

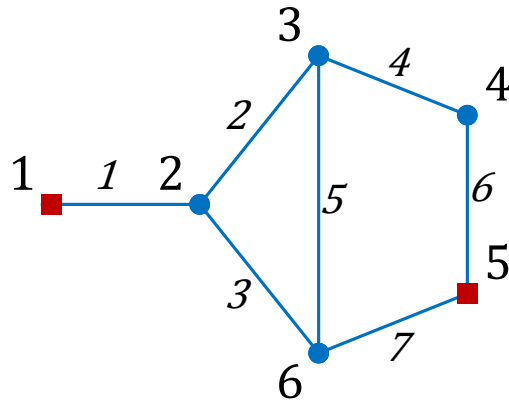


Рисунок 4. Двухполюсный граф исследуемой сети связи

Поскольку вершин в графе всего шесть ( $v = 6$ ), то матриц путей  $\mathbf{W}_i$  – пять ( $m = 5$ ), а согласно формулам (2)–(5)

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 3 & 6 \end{bmatrix}, \mathbf{W}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 6 & 6 \\ 4 & 6 & 3 & 5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 6 & 6 \\ 4 & 6 & 3 & 5 \\ 5 & 5 & 4 & 4 \end{bmatrix}, \mathbf{W}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 6 & 6 \\ 4 & 6 & 3 & 5 \\ 5 & 5 & 4 & 4 \\ 6 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с выражениями (6)–(7) непустых матриц путей от первой к шестой вершине оказывается всего три:

$$\mathbf{W}'_1 = \mathbf{W}'_2 = \emptyset, \mathbf{W}'_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix}, \mathbf{W}'_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 3 & 3 \\ 4 & 6 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}, \mathbf{W}'_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

Для построения обобщенной матрицы путей  $\mathbf{W}$  необходимо пронумеровать все ребра графа (на рис. 4 нумерация ребер приведена курсивным шрифтом), что проще всего сделать, используя матрицу инциденций [9]

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, согласно формуле (9) обобщенная матрица путей  $\mathbf{W}$  имеет размер  $7 \times 4$  ( $s = 4$ )



$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

а множество путей изображено на рис. 5.

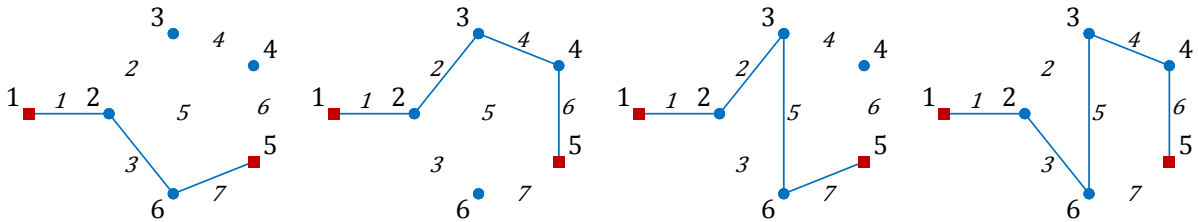


Рисунок 5. Пути (простые цепи) в направлении 1–5 графа, представленного на рис. 4

### Заключение

Следует отметить, что двухполюсные деревья относятся к простым цепям и являются частным случаем многополюсных деревьев, но всего с двумя полюсами.

На практике при расчете устойчивости (надежности, живучести) телекоммуникационной сети целесообразно рассматривать именно частные случаи, в том числе простых цепей, вследствие их меньшей вычислительной сложности.

### Библиографический список

1. **Chaturvedi, S. K.** Network Reliability Measures and Evaluation / Sanjay K. Chaturvedi. – Scrivener Publishing LLC. – 2016. – 237 p.
2. **Райгородский, А.М.** Модели случайных графов и их применения //Труды МФТИ. – 2010. Том 2, № 4. – С. 130–140.
3. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – Введ. 2008–12–18. – Москва : Стандартинформ, 2009. 16 с.
4. **Острейковский, В.А.** Теория надежности : учеб для вузов / В. А. Острейковский. – Москва : Высш. шк., 2003. – 463 с.
5. Paredes R. Network Reliability Estimation in Theory and Practice / R. Paredes, L. Duenas–Osorio, K. S. Meel, M. Y. Vardi // Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – 26 p.
6. **Татт, У.** Теория графов / У. Татт; пер. с англ. – Москва : Мир, 1988. – 424 с.
7. **Зыков, А.А.** Основы теории графов / А.В. Зыков.– М.: Наука, Гл. ред физ.-мат. лит., 1987. – 384 с.
8. **Цициашвили, Г. Ш.** Асимптотика вероятности связности графа с низконадёжными ребрами / Г. Ш. Цициашвили, М. А. Осипова, А. С. Лосев // Прикладная дискретная математика. – 2013. – № 1(19). – С. 93–98.

9. **Харари, Ф.** Теория графов / Ф. Харари; пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева ; под ред. Г. П. Гаврилова ; изд. 2-е. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.

**К.А. Batenkov, A.B. Fokin, A.N. Pereverzev**

**THE FORMING OF PATHS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS  
WITH BIPOLAR CONNECTIVITY**

Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

The computational telecommunication network model is presented in the generalized model Erdesh-Renyi, which is the base for the procedure for the forming of a number of paths for networks with bipolar connectivity.

**Key words:** connection network, graph, model, path, connectivity probability, sustainability, bipolar connectivity, matrix

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Краснодарское высшее военное училище,  
г. Краснодар

Рассмотрены общесистемные принципы и требования, предъявляемые к средствам защиты информации в целом и средствам антивирусной защиты в частности. На основе проведенного анализа проведена оценка влияния уязвимостей и угроз безопасности на оперативность автоматизированной системы. Формализованно описан процесс задействования ресурсов типовой автоматизированной системы при совместном решении задач по прямому назначению и защиты информации.

**Ключевые слова:** угрозы безопасности, программные средства защиты информации, параллельные вычисления.

### Введение

Развитие и активное внедрение современных информационных технологий стало фактором увеличения рисков нарушения безопасности информации. Одним из видов средств, активно применяемых для защиты информации в автоматизированных системах, являются программные. Такие средства используют вычислительные ресурсы автоматизированной системы, что негативно сказывается на производительности системы в целом. Учитывая, что современные задачи становятся все более и более ресурсоемкими, программные средства защиты могут существенно снизить оперативность обработки информации в автоматизированных системах.

В данной статье приводится сравнительный анализ влияния на производительность системы различных программных средств защиты информации. С использованием теории множеств формализованно описано задействование вычислительных ресурсов для совместного решения задач автоматизированной системой по прямому назначению и задач защиты информации.

### Сравнительный анализ использования информационных ресурсов в интересах защиты информации

По результатам сравнительного исследования 18 продуктов безопасности (антивирус Касперского, Avast, AVG, McAfee, Norton Security, Total Security, Windows Defender и других), проведенного в декабре 2019 года немецкой независимой лабораторией, специализирующейся на проверке и тестировании ведущих образцов антивирусного и защитного программного обеспечения, было выяснено: все средства защиты информации (в том числе предустановленный в Windows 10 защитник Windows Defender) в базовых настройках в среднем замедляют загрузку сайтов на 12-21%, загрузку (запуск) приложений — на 13-30%, установку стандартных приложений — на 18-51%, а копирование и перенос файлов — на 5-25% (см. таблицу далее). Для примера, защитник Windows Defender может

замедлять установку приложений до 51% [1]. Тестирование производилось на двух видах систем:

- 1) *среднепроизводительная система (standart)* – на базе Intel i3-6100, 8 ГБ оперативной памяти, SSD-накопителем на 256 ГБ на операционной системе Windows 10 Professional 64bit;
- 2) *высокопроизводительная система (high-end)* – на базе Intel i7-7770, 16 ГБ оперативной памяти, SSD-накопителем на 256 ГБ на операционной системе Windows 10 Professional 64bit.

#### Влияние средств защиты информации с базовыми настройками на скорость работы информационной системы

Вид замедления	Усредненные данные 18 продуктов безопасности		Антивирус Касперского	
	standart	high-end	standart	high-end
Замедление загрузки Веб-сайтов	17-21%	12-17%	18-23%	16-21%
Замедление загрузки файлов	1-6%	1-5%	0-1%	0-1%
Замедление загрузки (запуска) стандартных приложений	15-30%	13-14%	10%	7-8%
Замедление установки популярных приложений	18-34%	12-51%	11-30%	12-29%
Замедление копирования файлов (локально и в сети)	5-13%	5-25%	1-2%	1-3%

#### Варианты перераспределения ресурсов автоматизированной системы

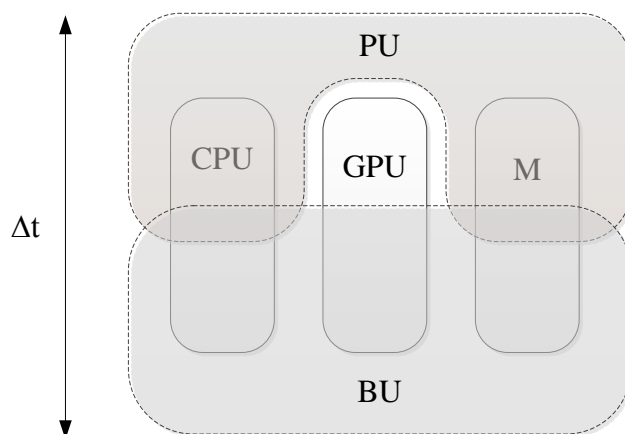
В стандартах и инструкциях, разрабатываемых в интересах защиты информации в практически любых крупных организациях, имеется, в том числе, и ряд дополнительных требований к настройкам средств защиты информации. В результате программные средства защиты информации могут реализовывать усложненные методы проверки и анализа, что еще более негативно влияет на быстродействие конечной автоматизированной системы [4].

Для формализации описания вариантов задействования ресурсов автоматизированной системы введем следующие обозначения:

- **PU (Protection Unit)** – подмножество необходимых ресурсов, которое необходимо задать для выполнения функции защиты информации автоматизированной системы за интервал времени  $\Delta t$ ;
- **BU (Base Unit)** – подмножество необходимых ресурсов, которое необходимо задать для решения задач в интересах автоматизированной системы за интервал времени  $\Delta t$ ;
- **M – (Memory)** – ресурс памяти (совокупность физической и оперативной памяти автоматизированной системы);
- **CPU – (Central Processor Unit)** – вычислительный ресурс центрального процессора;
- **GPU – (Graphics Processing Unit)** – вычислительный ресурс графического процессора.

На рис. 1 мы видим, что пересечение множеств  $PU \cap BU$  при повышении нагрузки на систему в интервал времени  $\Delta t$  происходит на ресурсах CPU и M. Следовательно,

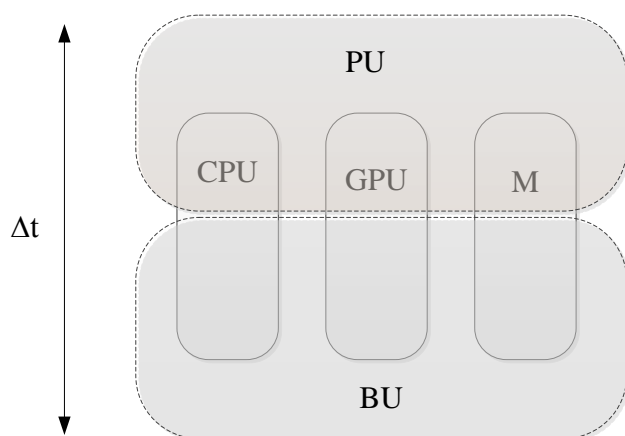
одновременное вычисление задач в интересах защиты информации и задач автоматизированной системы за время  $\Delta t$  при классическом подходе невозможно.



**Рисунок 1. Совместное использование ресурсов автоматизированной системы в промежуток времени  $\Delta t$  при классическом подходе**

Перейдем к формализованному описанию. Подмножество  $PU \subset (CPU \cup M)$  и  $BU \subset (CPU \cup GPU \cup M)$ . Для сохранения оперативности автоматизированных систем и сохранения должного уровня информационной безопасности необходимо, чтобы  $PU \cap BU = 0$ . Отсутствие пересечений данных множеств можно добиться двумя способами – путем увеличения времени  $\Delta t$  (что недопустимо по условию оперативности) или путем приращения неиспользуемых вычислительных ресурсов системы. За счет распараллеливания логико-математических задач защиты информации и подключения GPU возможно снятие части вычислительной нагрузки с CPU (Рисунок2). Тогда  $PU \subset (CPU \cup GPU \cup M)$ .

Уменьшение использования ресурса М в интересах защиты информации также может происходить за счет приращения вычислительных возможностей путем подключения различных видов процессорных вычислителей. Например, при дефиците вычислительных мощностей и имеющейся свободной памяти повысить производительность логических вычислений можно представив логическую функцию таблицей и разместив ее в памяти.



**Рисунок 2. Совместное использование ресурсов автоматизированной системы в промежуток времени  $\Delta t$  при использовании ресурсов GPU в интересах ЗИ**

## Заключение

Из проведенного анализа мы видим, что проблема влияния средств защиты информации на производительность автоматизированных систем является достаточно серьезной и требует системного решения. Увеличение вычислительных мощностей автоматизированной системы традиционно решалась наращиванием аппаратных ресурсов, однако, это приводит к удорожанию системы и не всегда возможно на практике. Одним из способов решения указанной проблемы является разработка методик эффективного использования незадействованных ресурсов автоматизированных систем для решения задач защиты информации программными средствами.

## Библиографический список

4. Av-test.org: «Antivirus & Security software Test»– **Независимая лаборатория, специализирующаяся на проверке ведущих образцов антивирусного ПО** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spkurdyumov.ru/economy/informacionnye-texnologii-sostoyanie-i-perspektivy>. (Дата обращения 10.02.2020).
5. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности ГОСТРИСО / МЭК 27005-2010; введ. 01.12.2011 – М. Стандартинформ, 2011. – 47 с.
6. **Kumar, Jain, A.** Information systems security: A review /A. Kumar Jain, Y. Singh, S. Updhyay// Ind Jour Math & Comp Sc. Jhs. – 2013. – №2, с. 26-30.
7. Anti-malware.ru: «Сравнение сертифицированных средств защиты информации от несанкционированного доступа для серверов и рабочих станций (СЗИ от НСД)» - сайт независимого информационно-аналитического центра по информационной безопасности – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anti-malware.ru/compare/information-protection-unauthorized-access-fstek-certified#part1>. (Дата обращения 05.02.2020).

**M. S. Gnutov, A. V. Kolovanov**

## ANALYSIS OF THE IMPACT OF INFORMATION SECURITY TOOLS ON THE PERFORMANCE OF AUTOMATED SYSTEMS

Krasnodar higher military school

System-wide principles and requirements for information security tools in general and antivirus software in particular are considered. Based on the analysis, the impact of security vulnerabilities and threats on the efficiency of the information system is assessed. The process of using the resources of a typical automated system is described in a formalized way.

**Keywords:** vulnerabilities, security threats, information security tools, antivirus software, central processing unit, graphics processor unit

Д.В. Дмитриев, А.В. Егоров

## БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью защиты от несанкционированного проникновения, получения услуг в различных отраслях, где необходимо верифицировать человека, например в системах контроля доступа, системах учета посещаемости.

**Ключевые слова:** верификация, биометрия, безопасность, нейронная сеть, разработка.

### Введение

Забывшие пароли или замена карточек доступа могут стать насущной проблемой для отдела безопасности, в то время как ненадежность пароля и кража карточек доступа представляют собой серьезные угрозы безопасности. Биометрическая верификация человека по лицу удобна, потому что она выполняется быстро и не требует от человека каких-либо специальных действий.

В местах с повышенными требованиями к безопасности, верификация по изображению лица может являться частью процедуры аутентификации личности и применяться в следующих задачах:

- пограничном контроле;
- при получении услуг в разных отраслях, от государства до получения кредита;
- в системах контроля доступа.

Такие задачи решаются сотрудниками безопасности, которые удостоверяются, что лицо человека соответствует лицу на фотографии в документе. Это вызывает дополнительные неудобства и ведет к увеличению расходов. Биометрическая верификация – подтверждение личности человека, когда системе заранее известно, кем представляется верифицируемый человек, обеспечивает повышенную безопасность и удобство для всех [1].

В мире биометрических технологий произошли существенные изменения, связанные с тем, что началось широкомасштабное внедрение биометрических систем. В связи с этим коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева ведется разработка системы биометрической верификация по лицу человека.

Основные преимущества:

- **Безопасность.** По сравнению с остальными решениями уникальная нейронная сеть практически исключает вероятность ошибки. Коэффициент ложной верификации сведен к минимуму, что обеспечивает максимальную безопасность независимо от того, используется технология отдельно или в совокупности с другими способами аутентификации.
- **Легкость использования.** Распознавание лиц является наиболее простым способом аутентификации, придуманным на сегодняшний день. Аутентификация на основе лица отбрасывает необходимость введения пароля, считывания по карточки, а в качестве идентификатора используется лицо человека.
- **Независимость.** В отличие от других способов аутентификации распознавание лиц не требует каких-либо действий. Достаточно всего лишь пройти мимо камеры.

- **Универсальность.** Помимо применения в целях контроля допуска перед началом работы или на контрольно-пропускных пунктах, алгоритмы способны обрабатывать изображения низкого качества, удаленности от камеры и с различным освещением.

- **Производительность.** Высокоэффективные алгоритмы не требуют высокой производительности от аппаратных средств и, следовательно, больших затрат. Мгновенный индексированный поиск среди множества лиц практически отменяет ограничения на количество зарегистрированных пользователей [2].

Система распознавания, основанная на применении искусственной нейросети, позволяет на основе анализа информации, поступающей из видеопотока диагностировать лицо человека. Это позволяет заблаговременно обеспечивать необходимой защитой охраняемый объект и сократить время для оперативного реагирования.

### Основная часть

Для распознавания человека на фотографии использовалась библиотека машинного обучения dlib, которая содержит удобные средства распознавания лиц. Библиотека написана на C++, но у нее есть Python API[3].

Для решения задачи верификации необходимо использовать сверточную нейронную сеть, а именно предварительно обученную нейронную сеть ResNet. От сети отрезаются слои, отвечающие за классификацию, и остаются только сверточные слои, которые извлекают ключевые признаки из изображения. Результат работы - набор чисел, который называется дескриптором. Такие дескрипторы извлечены из фотографии. Результатом работы нейронной сети является дескриптор из 128 чисел. Сеть обучена специальным образом так, чтобы дескрипторы фотографий одного человека находились рядом друг с другом, а дескрипторы фотографий разных людей - далеко друг от друга. Чтобы оценить близость дескрипторов в dlib используется Евклидово расстояние.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Для подтверждения того факта, что на фотографиях один и тот же человек необходимо определить оптимальный порог для значения евклидова расстояния между дескрипторами двух фотографий. Необходимое условие для прохождения верификации – расстояние между дескрипторами должно быть меньше заданного порога. Для решения данной задачи был выбран датасет, состоящий из 50 человек на каждого приходится по 15 изображений лица. Первая фотография является основной для запоминания пользователя в системе, остальные фотографии сравниваются с ней. Пороговое значение евклидова расстояния между дескрипторами двух фотографий варьируется от 0.1 до 0.9. Ошибка первого рода (ложная тревога) означает, что НС не смогла верно определить пользователя и был получен отказ в верификации для него. Ошибка второго рода (пропуск цели) означает, что НС распознала не того человека на изображении. Суммарная ошибка первого и второго рода возможна тогда, когда нейронная сеть верифицировала пользователя или как общее количество экспериментов за исключением ошибок первого рода минус ошибки второго рода. Результаты приведены в таблице.



## Результаты верификации при различном пороговом значении

Пороговое значение	Всего	Ошибка первого рода	Ошибка второго рода	Суммарная ошибка
0.1	700	700	0	700
0.2	700	639	0	639
0.3	700	398	0	398
0.4	700	97	0	97
0.5	700	7	75	82
0.6	700	0	0	0
0.7	700	0	536	536
0.8	700	0	646	646
0.9	700	0	686	686

Отобразим данную зависимость на графике. По оси ординат отложено значение вероятного исхода при верификации изображения лица, по оси абсцисс пороговое значение для сравнения двух векторов фотографий в евклидовом пространстве.

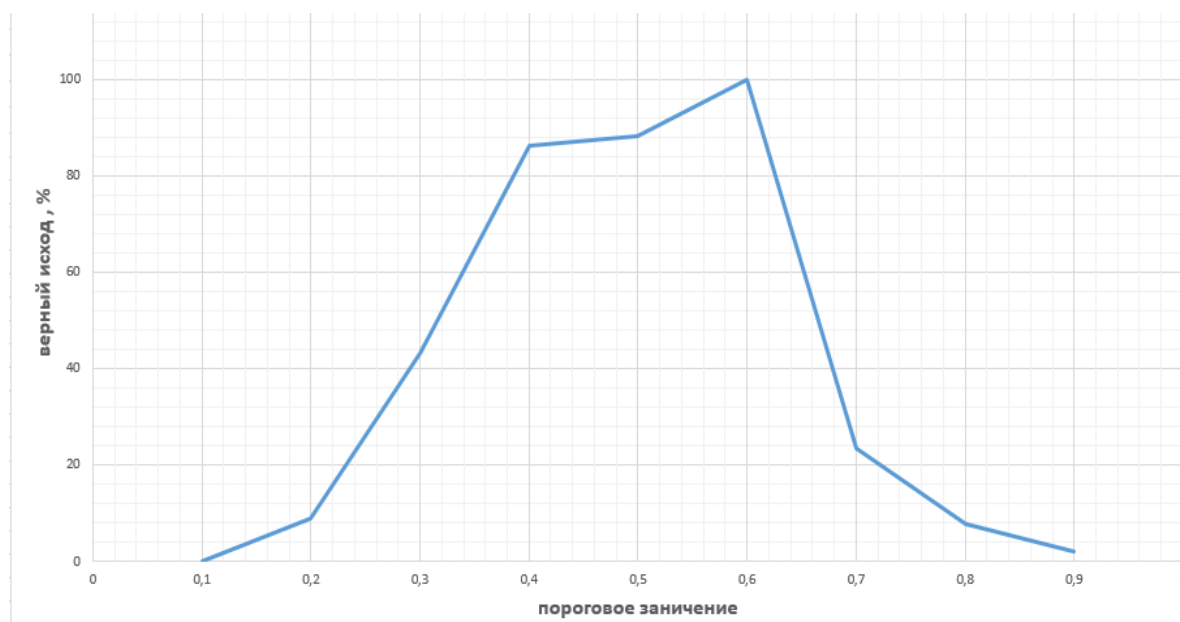


График по результатам верификации при различном пороговом значении

### Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- При уменьшении порогового значения увеличивается количество ошибок первого рода, потому что при уменьшении порогового значения разности двух векторов в евклидовом пространстве вероятность идентифицировать пользователя сводится к одной фотографии (которую запомнила нейронная сеть).
- При увеличении порогового значения увеличивается количество ошибок второго рода, это свидетельствует о том, что нейронная сеть принимает двух разных людей за одного и того, поскольку коэффициент разности двух векторов завышен.
- Оптимальный коэффициент порогового значения для нейронной сети - 0.6, при данном коэффициенте все пользователи были верно верифицированы.

### **Библиографический список**

1. **Кухарев, Г.А.** Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека / Г.А. Кухарев. – изд. СПб: Политехника, 2001. – 240 с
2. **Хайкин, С.** Нейронные сети. Полный курс / С.Хайкин; 2-е изд., пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с
3. Python. К вершинам мастерства / пер. с англ. – ДМК Пресс, 2016. – 768 с

**D. V.Dmitriev, A.V. Egorov**

### **BIOMETRIC VERIFICATION ON FACE RECOGNITION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to developing neural network to verification people on face recognition, selecting optimal threshold for the value of the Euclidean distance between vectors for which the result of the artificial neural network will be most accurate.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in testing neural network. The dataset consisting of 50 people was selected, each having 15 facial images. The first photo is the main one for remembering the user in the system, the rest of the photos are compared with her. The threshold value of the Euclidean distance between the descriptors of two photos I varied from 0.1 to 0.9.

**Findings:** As the threshold value decreases, the number of type I errors (false positive) increases. As the threshold value increases, the number of type II errors (false negative) increases. The optimal threshold coefficient for the neural network was selected.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for verification system that can be used in various service.

**Originality/value:** Implementations of neural network created during the research have shown good results in recognition problems and can be used in future.

**Key words:** verification, biometrics, security, neural network, development.

В.С. Дунин, Д.Е. Григоров

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВЫШЕНИЯ ПРИВИЛЕГИЙ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MICROSOFT WINDOWS 7 ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ТОКЕНА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЦЕССА

Дальневосточный юридический институт МВД России, г. Хабаровск

**Цель.** Исследование механизма повышения привилегий в отношении несертифицированных по требованиям безопасности и не имеющих обновлений, направленных на устранение ошибок и уязвимостей операционных систем Microsoft Windows 7 всех редакций.

**Методика сбора данных.** Анализ критических уязвимостей и потенциальных угроз операционных систем семейства Windows.

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Исследован не декларированный механизм повышения привилегий в операционной системе Microsoft Windows 7 путем модификации токена пользовательского процесса. Обозначены этапы формирования и инициализации блока токена пользовательского процесса. Показана нетривиальная подмена указателя токена данных в памяти ядра, выполняющего код, позволяющий предоставить другой набор привилегий пользовательскому процессу.

**Практическая значимость.** Результаты исследования способствуют проведению скорого аудита информационных систем на предмет наличия не закрытых уязвимостей ОС Windows 7 до принятия решений о переходе на сертифицированные по требованиям безопасности информационные операционные системы.

**Ключевые слова:** токен, пользовательский процесс, уязвимость, ядро памяти, эксплойт.

### Введение

Согласно официального информационного сообщения ФСТЭК России от 20 января 2020 г. № 240/24/250 прекращена поддержка и выпуск обновлений для операционных систем (ОС) Microsoft Windows 7 и Microsoft Windows Server 2008 R2, в том числе обновлений, направленных на устранение ошибок и уязвимостей в указанных операционных системах [3]. Там же отмечается, что прекращение выпуска обновлений в сочетании с вероятным обнаружением в обозначенных операционных системах новых уязвимостей приведет к возможности реализации угроз безопасности информации конфиденциального характера, обрабатываемой в информационных системах, применяемых федеральными органами государственной власти.

Прогнозируя появления реальных предпосылок к возникновению актуализированных угроз информационной безопасности и рост активности существующих атак со стороны потенциальных злоумышленников, представляется допустимым проведение дополнительного исследования механизма повышения привилегий доступа к системным ресурсам операционных систем Windows 7, применимого ко всем редакциям ОС. Это обусловлено, в том числе, наличием большого количества, разработанного под ОС Windows 7 специализированного прикладного программного обеспечения и как следствие появление сопутствующих уязвимых процессов [4].

## Токен пользовательского процесса

Множество эксплойтов для выполнения определенных злоумышленником инструкций требуют повышение привилегий к системным ресурсам. С учетом политик безопасности традиционным способом этого достигнуть не всегда удастся, нарушителям приходится прибегать к всевозможным ухищрениям и ошибкам в программном коде [1].

Существует несколько способов повышения прав непривилегированной учетной записи в операционной системе Windows 7, многие из них сводятся к перезаписи специального токена пользовательского процесса, указывающего на уровень прав приложения. В большинстве случаев, любая промежуточная деятельность многих эксплойтов направлена на подмену токена уровня доступа пользовательского процесса, например, уязвимость CVE-2018-8120 позволяет через разыменованное нулевого указателя записывать данные в любую область памяти[5].

Учетная запись пользователя и права доступа, связанные с запущенным процессом ОС Windows 7, определяются специальной характеристикой со смещением 0x208 в блоке EPROCESS, называемой токеном (Token). Структуры данных ядра, которые отслеживают различные специфичные для процесса данные, содержат указатель на токен процесса. Когда процесс пытается выполнить различные действия, такие как открытие файла, права и привилегии учетной записи в токене сравниваются с требуемыми привилегиями, чтобы определить, следует ли предоставить доступ или запретить.

Для каждого процесса, выполняющего Windows-программу, процесс подсистемы Windows (Csrss) поддерживает в дополнение к блоку EPROCESS параллельную структуру данных. Кроме того, часть подсистемы Windows, работающая в режиме ядра (Win32k.sys), поддерживает структуру данных для каждого процесса, которая создается при первом вызове потоком любой функции USER или GDI, реализованной в режиме ядра[2].

Список полей, составляющих блок EPROCESS, и их смещения в шестнадцатеричной форме, можно увидеть с помощью команды «dteprocess» (рис.1) отладчика ядра.

```
1 kd> dt _EPROCESS fffffa80018c8040
2 ntdll! _EPROCESS
3   +0x000 Pcb : _KPROCESS
4   +0x160 ProcessLock : _EX_PUSH_LOCK
5   +0x168 CreateTime : _LARGE_INTEGER 0x01d4ffe1`f068e91e
6   +0x170 ExitTime : _LARGE_INTEGER 0x0
7   +0x178 RundownProtect : _EX_RUNDOWN_REF
8   +0x180 UniqueProcessId : 0x00000000`00000004 Void
9   +0x188 ActiveProcessLinks : _LIST_ENTRY [ 0xfffffa80`0299e498 - 0xfffffa80`02838b90 ]
10  +0x198 ProcessQuotaUsage : [2] 0
11  +0x1a8 ProcessQuotaPeak : [2] 0
12  +0x1b8 CommitCharge : 0x21
13  +0x1c0 QuotaBlock : 0xfffff800`02816c00 _EPROCESS_QUOTA_BLOCK
14  +0x1c8 CpuQuotaBlock : (null)
15  +0x1d0 PeakVirtualSize : 0xac1000
16  +0x1d8 VirtualSize : 0x44d000
17  +0x1e0 SessionProcessLinks : _LIST_ENTRY [ 0x00000000`00000000 - 0x00000000`00000000 ]
18  +0x1f0 DebugPort : (null)
19  +0x1f8 ExceptionPortData : (null)
20  +0x1f8 ExceptionPortValue : 0
21  +0x1f8 ExceptionPortState : 0y000
22  +0x200 ObjectTable : 0xfffff8a0`00001910 _HANDLE_TABLE
23  +0x208 Token : _EX_FAST_REF
24  [...]
```

Рисунок 1. Блок EPROCESS запущенного приложения CMD.exe в операционной системе Windows 7

Каждый Windows-процесс представлен структурой EPROCESS. Кроме многочисленных атрибутов, относящихся к процессу, в блоке EPROCESS содержатся указатели на некоторые

структуры данных. Блок EPROCESS и связанные с ним структуры данных существуют в системном пространстве.

Следует подчеркнуть, что для нового запущенного процесса формируется токен, который будет указывать на принадлежность к какой-либо группе с определенным набором привилегий. Группа прав новоиспеченного процесса далека от привилегированных форм.

Токен содержит привязку к определенным группам прав – идентификаторам безопасности (SID). Идентификатор безопасности (SID) представляет собой уникальное значение переменной длины, используемое в операционных системах Windows для идентификации участника безопасности или группы безопасности. Особенно хорошо известны идентификаторы безопасности, идентифицирующие общих пользователей или общие группы. Их значения остаются постоянными во всех операционных системах. Например, идентификатор «S-1-1-0» обозначает локальную группу «Все».

Поскольку указатель токена – это типизированные данные в памяти ядра, для кода, выполняющегося в режиме ядра, тривиально изменить его так, чтобы он указывал на другой токен и, следовательно, предоставлял процессу другой набор привилегий.

### Механизм повышения привилегий

В структуре \_EPROCESS, поле Token объявлено как \_EX\_FAST\_REF, а не как ожидаемая структура \_TOKEN (рис. 2). Структура \_EX\_FAST\_REF – это уловка, основанная на предположении, что структуры данных ядра должны быть выровнены в памяти на 16-байтовой границе. Это означает, что указатель на токен или любой другой объект ядра всегда будет иметь последние 4 бита, равными нулю (в шестнадцатеричном формате последняя цифра всегда будет равна нулю). Поэтому Windows может свободно использовать младшие 4 бита значения указателя для чего-то другого (в этом случае счетчик ссылок может использоваться для внутренних оптимизационных целей). Как было сказано ранее, токен представляет собой значение размера указателя, расположенное со смещением 0x208.

```
1 kd> dt _EX_FAST_REF
2 nt!_EX_FAST_REF
3 +0x000 Object : Ptr64 Void
4 +0x000 RefCnt : Pos 0, 4 Bits
5 +0x000 Value : Uint8B
```

Рисунок 2. Структура «\_EX\_FAST\_REF»

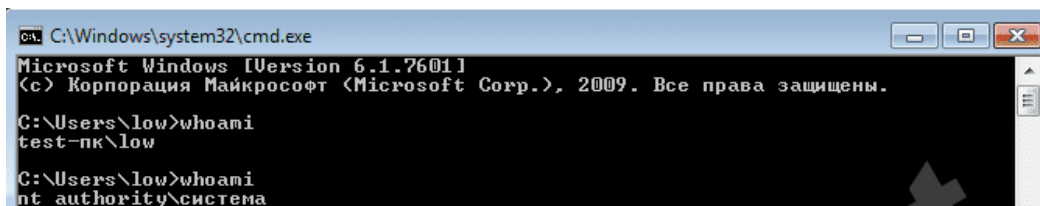
Чтобы получить фактический указатель из \_EX\_FAST\_REF требуется изменить последнюю шестнадцатеричную цифру на ноль, то есть замаскировать младшие 4 бита значения с помощью операции логического «И» (рис. 3).

```
1 kd> ? fffff8a0`0000404e & ffffffff`fffffff0
2 Evaluate expression: -8108898238400 = fffff8a0`00004040
```

Рисунок 3. Фактическое значение токена

С практической стороны использование данного механизма повышения привилегий выражена в эксплуатации уязвимости уровня ядра CVE-2018-8120, которая перезаписывает токен текущего процесса другим значением. В основе вышеназванной уязвимости лежит функция NtUserSetImeInfoEx компонента ядра Windows win32k. В частности, SetImeInfoEx, подпрограмма NtUserSetImeInfoEx, не проверяет указатель данных, позволяя разыменовать ну-

левой (NULL) указатель. Данная уязвимость позволяет злоумышленникам использовать уязвимость для записи на произвольный адрес в пространстве ядра. Стоит отметить, что, начиная с Windows 8, пользовательский процесс не может преобразовать данные нулевой страницы. Процесс разыменования пустого указателя довольно-таки прямолинейен. Сначала, в пользовательское пространство проецируется нулевая (NULL) страница. Затем помещается поддельная структура данных на страницу с целью спровоцировать запуск полезной нагрузки. Далее активируется уязвимость, связанная с нулевым указателем, что приводит к перезаписи токена (рис. 4).



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corp.), 2009. Все права защищены.
C:\Users\low>whoami
test-нк\low
C:\Users\low>whoami
nt authority\система
```

Рисунок 4. Результат перезаписи токена

## Выводы

Результат моделирования действий эксплойта для повышения уровня привилегий до уровня администратора показал, что отлаживаемый демонстрационный виртуальный хост (Windows 7 x64 6.1.7601 ServicePack 1 Сборка 7601), на который была направлена атака, продемонстрировал практическую возможность реализации механизма перезаписи токена.

С учетом популярности Windows 7, уязвимость достаточно часто используется злоумышленниками для получения несанкционированного доступа к системе. Однако в более поздних версиях ядра Windows проецировать пустое адресное пространство невозможно, поэтому данный класс уязвимостей для современных операционных систем не актуален, так как подобным проблемам подвергнута ОС Windows 7.

Полностью защитить маркер доступа от перезаписи не представляется возможным, так как использование программного обеспечения, запущенного от привилегированного пользователя и имеющего ошибки в коде, может скомпрометировать систему в целом. В любом случае, от таких ошибок как переполнение буфера стека и разыменования нулевого указателя необходимо избавляться на стадии отладки программного продукта.

С другой стороны, защитить маркер доступа вполне реально, если защитить от перезаписи отдельный регион памяти, специально выделенный для хранения системных и пользовательских токенов. Тогда будет происходить синхронизация имеющегося в токена в блоке процесса и изначально записанного маркера в сегмент защищенной памяти. При выполнении любой операции, требующей особой привилегии, необходимо сопоставление изначально и текущего токена – в случае их несовпадений произойдет отказ на выполнение команды.

В любом случае не стоит забывать о фундаментальных принципах безопасности, а именно использование стабильного и отлаженного программного обеспечения, регулярные обновления безопасности, грамотно настроенная политика безопасности и разграничение прав доступа, а также выраженное в ограничении запуска неразрешенных приложений на рабочих станциях. При разработке операционного программного обеспечения следует уделять особое внимание участкам кода, где присутствуют арифметические операции (особенно, если данные, участвующие в этих операциях, приходят со стороны пользователя). Особенно важна проверка функций на соблюдение пределов нижних и верхних границ результатов операций.

## Библиографический список

1. An Analysis of AWindows Kernel-Mode Vulnerability (CVE-2014-4113) // Trend Labs Security Intelligence Blog URL: <https://blog.trendmicro.com/trendlabs-security-intelligence/an-analysis-of-a-windows-kernel-mode-vulnerability-cve-2014-4113> (дата обращения: 16.02.2020).
2. **Руссинович, М.** Внутреннее устройство Microsoft Windows: 6-е издание / М. Руссинович, Д. Соломон. - Питер. 2013. 800 с.
3. Информационное сообщение ФСТЭК России о применении сертифицированных операционных Microsoft Windows 7 и Microsoft WindowsServer 2008 R2 в связи с прекращением их технической поддержки от 20 января 2020 г. № 240/24/250. URL: <https://fstec.ru/index.php/normotvorcheskaya/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/2016-informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-20-yanvarya-2020-g-n-240-24-250> (дата обращения: 16.02.2020).
4. Банк данных угроз безопасности информации. ФСТЭК России. URL: <https://bdu.fstec.ru> (дата обращения: 16.02.2020).
5. CVE-2018-8120 Win32k Elevation of Privilege Vulnerability. Security Vulnerability. URL: <https://portal.msrc.microsoft.com/en-us/security-guidance/advisory/CVE-2018-8120> (дата обращения: 16.02.2020).

**V.S. Dunin, D.E. Grigorov**

### **RESEARCH OF THE MECHANISM FOR INCREASING PRIVILEGES IN THE OPERATING SYSTEM MICROSOFT WINDOWS 7 BY MODIFICATION OF THE TOKEN OF THE USER PROCESS**

Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Khabarovsk

**Goal.** Investigation of the mechanism for increasing privileges in respect of non-certified security requirements and not having updates aimed at eliminating errors and vulnerabilities in all versions of Microsoft Windows 7 operating systems.

**The method of data collection.** Analysis of critical vulnerabilities and potential threats of Windows operating systems.

**The main results of modeling and their scientific novelty.** An undeclared mechanism for privilege escalation in the Microsoft Windows 7 operating system by modifying a user process token has been investigated. The stages of the formation and initialization of the token block of the user process are indicated. A non-trivial substitution of the data token pointer in the memory of the kernel executing the code is shown, which allows providing a different set of privileges to the user process.

**Practical significance.** The results of the study contribute to an early audit of information systems for the presence of not closed vulnerabilities in Windows 7 before making decisions on the transition to operating systems certified according to the requirements of information security.

**Keywords:** token, user process, vulnerability, memory core, exploit.

В.Т. Еременко, С. В. Еременко, Н. В. Чикалов

## ОБНАРУЖЕНИЕ ИНЦИДЕНТОВ НА ОБЪЕКТАХ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Орловский государственный университет, г. Орел

**Цель.** Произвести анализ известных алгоритмов и выбрать оптимальный вариант реагирования на инцидент на газотранспортном предприятии.

**Методика сбора данных.** Контроль основных параметров транспортировки газа, формирование статистических данных.

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Внедрение в модель управления ГТП базы данных «прецедент-реакция», внедрение алгоритма на основе нечеткой логики.

**Практическая значимость.** Процесс транспортировки газа является непрерывным и не может быть остановлен. Предложенный метод реагирования на инцидент позволяет минимизировать время обнаружения инцидента на газотранспортном предприятии.

**Ключевые слова:** Инцидент, система газоснабжения, газотранспортное предприятие, алгоритм обнаружения.

### Введение

Рост популярности платформ реагирования на инциденты (IRP) вызван видимыми атаками - например, Wanna Cry, Petya, большие DDoS-атаки. Вследствие этого, злоумышленники могут дистанционно создавать инциденты на газотранспортном предприятии. Это ведет за собой экономические потери, техногенные аварии. Особую актуальность тематика автоматизации реагирования на инциденты приобрела из-за точности и скорости процедур и процессов реагирования. Ведь именно в этот момент счет идет на секунды – должностным лицам оперативно-диспетчерской службы необходимо снизить время реагирования (а значит, понесенный ущерб) до минимального значения.

Цель любой стратегии управления инцидентами - быстрое и эффективное выявление происшествий. Такое управление представляет собой систематический процесс, включающий обнаружение, реагирование, устранение и восстановление нормальных условий транспортировки газа. Чем меньше проходит времени с момента возникновения инцидента до его полного устранения, тем эффективнее стратегия управления инцидентами.

Большая часть алгоритмов, предназначенных для автоматического обнаружения инцидентов, принимают данные, полученные при контроле транспортировки газа, в качестве исходных. В результате алгоритмы показывают, имел ли место инцидент. При этом необходимы различные входные данные в зависимости от типа используемого алгоритма. Все алгоритмы кроме алгоритма на основе нечеткой логики для реализации требуют информацию о месте возникновения инцидента.



## **Анализ алгоритмов обнаружения инцидентов на газотранспортном предприятии**

Шаблонные алгоритмы (алгоритм APID (All Purpose Incident Detection), алгоритм PATREG (Pattern Recognition Algorithm), алгоритм Калифорния) пользуются широкой популярностью. Вывод результата осуществляется на основе информации о размещении объекта, информации о движении потока. Принцип обнаружения следующий: алгоритмы сравнивают текущие условия эксплуатации относительно определенного заданного порога и определяют, произошел ли инцидент.

Статические методы обнаружения происшествий (алгоритм SND (Standard Normal Deviate), алгоритм Байеса). Принцип алгоритма SND следующий: из текущей контрольной переменной вычитается среднее отклонение, и все делится на стандартное отклонение. Алгоритм использует статистические методы Байеса, чтобы вычислить вероятность возникновения инцидента с использованием исторических данных о частоте событий и стандартное отклонение берется из собранных ранее данных.

Теория катастроф (алгоритм МакМастер (McMaster Algorithm)). Принцип работы данной альтернативы заключается в следующем: одна из переменных внезапно дискретно изменяется, при этом остальные связанные переменные продолжают изменяться непрерывно.

Алгоритм обнаружения инцидентов и определения их приоритетов на основе нечеткой логики. На протяжении определенного периода времени анализируется состояние процесса транспортировки газа на предмет возникновения инцидента. Будем применять вектор-столбец, состоящий из трех значений: 0, 1, 2. Если анализ показал, что транспортировка газа отклоняется от нормальных значений, то считается, что вероятно произошел инцидент – система возвращает единичное значение, в противном случае система возвращает нулевое значение. Если было возвращено единичное значение, то система повторяет этап обнаружения инцидента. Если процесс не нормализовался в течение трех интервалов измеряемого времени, то считается, что инцидент произошел – система возвращает значение 2. Далее запускаются процессы оповещения диспетчерской службы и дальнейшего реагирования на возникшую ситуацию в соответствии с предписаниями алгоритма. Если поток транспортировки газа нормализовался, значит, инцидент был устранен, и на выходе будет снова 0.

Этап классификации инцидента запускается после того, как система покажет, что инцидент возник. В качестве классификатора может быть использован метод  $k$ -средних. Данный метод относится к алгоритмам классификации с учителем. Данный метод заключается в следующем – минимизация среднеквадратичного отклонения точек от эталонных точек.

### **Выбор оптимального алгоритма обнаружения инцидента**

Продолжительность инцидента можно рассматривать как сумму следующих составляющих: время обнаружения, время реагирования и время устранения. Общая продолжительность инцидента зависит от времени реагирования на его возникновение. Данный параметр связан с централизованным дистанционным контролем, доступом к месту инцидента, возможностью доступа к системам технического обслуживания и ремонта, возможностью оперативной передачи информации по каналам связи.

Результаты задержки при выявлении показывают важность быстрого обнаружения инцидента с точки зрения предотвращения аварии, а также снижения затрат, связанных с ликвидацией происшествия.

Время обнаружения инцидента (MTTD – Mean Time to Detection) – время с момента начала инцидента, до момента его обнаружения. Обратим внимание на то, что MTTD не включает время, которое требуется для того чтобы проверить, действительно ли имело место возникновение инцидента. Обнаружение инцидента – первый и важнейший параметр, от которого зависит эффективность управления инцидентами, т.к. важно максимально быстро выявить инцидент после его начала. После того, как происшествие будет обнаружено, проверено, запускаются следующие этапы по устранению инцидента. Оперативное и точное управление инцидентами становится более важным в том случае, когда рассматривается негативное влияние на транспортировку газа на промышленную безопасность. Задержка в выявлении инцидента с высокой вероятностью приведет к аварии и экологической катастрофе.

Количество обнаруженных инцидентов (DR – Detection Rate) – отношение количества обнаруженных инцидентов к общему числу инцидентов, выражается в процентах. Параметр DR зависит от того, что мы будем воспринимать как инцидент, то есть, при каких условиях ситуация в системе транспортировки газа будет считаться инцидентом.

Количество ложных тревог (FAR – False Alarm Rate) – определяется как отношение количества ложных тревог к общему числу тревог, вычисляется в процентах.

Каждая из рассматриваемых альтернатив не является идеальной, и в том или ином критерии каждый алгоритм показывает тот или иной результат, но ни один из них не показывает себя лучшим по всем параметрам. Например, алгоритм APID хорошо показывает себя только в условиях интенсивного и плотного потока транспортировки газа; алгоритм PATREG показывает стабильный результат при средней и ниже средней интенсивности транспортировки газа. Это объясняется тем, что чем выше давление, тем интенсивнее поступают данные, поэтому описание транспортировки на выходе получается не совсем корректным; алгоритмы SNDи Байеса имеют уровень ложных тревог близкий к 0%; алгоритм МакМастер из теории катастроф имеет средние показатели по всем исследуемым параметрам; алгоритм на основе нечеткой логики имеет количество обнаруженных инцидентов близкое к 100%.

Для обеспечения наиболее эффективного реагирования на происшествие необходимо получать максимально полную и точную информацию о местоположении, типе и масштабе инцидента. Использование агентов для обнаружения инцидентов способствует получению более оперативной и развернутой информации о состоянии транспортировки газа. Своевременное реагирование на инцидент позволяет снизить возможные экономические затраты и аварии на производстве.

Поэтому для повышения эффективности работы системы обнаружения инцидентов необходимо обеспечить сбор данных с нескольких источников информации. Использование одновременно нескольких источников сможет снизить влияние недостатков каждого из источников, уменьшить время обнаружения инцидента, что в целом позволит увеличить общую эффективность системы обнаружения инцидентов. При рассмотрении характеристик процесса транспортировки газа и данных от вспомогательных подсистем решение проблемы управления инцидентами не может заключаться только в использовании алгоритмов. Поэтому рекомендуется наблюдение за работой алгоритма лица, компетентного в данном вопросе, и, соответственно, использование его знаний и опыта. При обнаружении инцидента

оператором должна быть выполнена необходимая строго определенная последовательность действий для правильного реагирования на внезапное происшествие.

Каждый инцидент особенный и сам процесс реагирования на каждое происшествие может быть точный и четкий только при условии, что подобные инциденты ранее имели место, то есть должна составляться прецедентная база. Для решения данной проблемы необходимо сформулировать точную и понятную процедуру алгоритма реагирования оператора на происшествие и разработать систему поддержки и принятия решений. Одной из наиболее значимых характеристик является неопределенность в принятии решений нечеткой логики. Следовательно, применение систем с нечеткой логикой стало наиболее подходящим решением проблемы в управлении инцидентами.

Модель нечеткой системы для обнаружения и реагирования на инцидент показывает свою эффективность при описании нечеткого определения условий возникновения инцидента и фактических суждений, используемых при обработке полученных данных о происшествии. Алгоритм на основе нечеткой логики отличается быстротой по времени определения возникновения инцидента, при этом показывая отличный результат по общему количеству обнаруженных инцидентов. Модель системы на основе нечеткой логики является гибкой в том смысле, что возможно создать любое нечеткое правило под необходимые условия для определения происшествия, связанного с особенностями транспортировки газа.

Необходимо отметить, что ни один алгоритм не сможет полностью оценить динамический характер транспортного потока. В процессе анализа алгоритмов была выявлена закономерность, которая создает проблему при реализации автоматизированной системы по обнаружению инцидентов: чем быстрее алгоритм обнаруживает возникший инцидент, тем выше вероятность, что срабатывание системы сигнализации окажется ложным.

На основе данных, полученных при анализе и сравнении альтернатив, можно сделать вывод, что на текущий момент времени не известен универсальный алгоритм, который способен показывать стабильную работу и высокий уровень критериев MTTD, DR и FAR вне зависимости от условий транспортировки, количества входных данных и окружающих факторов, которые могут затруднить точное и своевременное выявление инцидента.

В некоторых случаях предлагается использование весового алгоритма обнаружения инцидента, который будет объединять ранее рассмотренные алгоритмы и ставить им в соответствие определенные коэффициенты. Это позволит использовать сильные стороны всех алгоритмов с компенсацией их слабых сторон.

## **Выводы**

1. Ни один алгоритм не сможет полностью оценить динамический характер транспортного потока. В процессе исследования была выявлена закономерность, которая создает проблему при реализации автоматизированной системы по обнаружению инцидентов: чем быстрее алгоритм обнаруживает возникший инцидент, тем выше вероятность, что срабатывание системы сигнализации окажется ложным.

2. На основе данных, полученных при анализе и сравнении альтернатив, можно сделать вывод, что на текущий момент времени не известен универсальный алгоритм, который способен показывать стабильную работу и высокий уровень критериев MTTD, DR и FAR вне

зависимости от условий транспортировки, количества входных данных и окружающих факторов, которые могут затруднить точное и своевременное выявление инцидента.

3. Основную трудность в решении данного вопроса составляет то, что трудно разделить два состояния системы: состояние, которое находится в пределах нормы, и состояние, которое отклоняется от нормальных условий транспортировки, т.е. состояние возможного инцидента. Трудность заключается в том, что границы этих состояний нельзя четко обозначить, поэтому трудно определить порог, при котором традиционные методы обнаружения инцидентов будут считать, что произошел инцидент. Поэтому, так как существует ненулевая вероятность возникновения инцидента, возможно внедрение вспомогательной подсистемы управления газотранспортным потоком, которая основывается на нечеткой логике для модели «прецедент-реакция».

4. Преимущество алгоритма на основе нечеткой логики - выявление всех произошедших инцидентов за минимальное время. Недостаток – высокая вероятность того, что произошедшая ситуация будет распознана как инцидент, хотя с точки зрения оператора, это будет относиться к нормальным условиям транспортировки газа. Но этот недостаток нивелируется тем, что такая система не автоматическая, а автоматизированная, поэтому реакция на работу системы остается за лицом, принимающим решения, то есть за оператором.

5. Также необходимо обратить внимание на то, что область применения определяется особенностями использования каждого алгоритма, поскольку эффективность алгоритмов существенно отличается в различных условиях: производственные факторы, способы и инструменты, используемых для сбора информации о транспортировке газа, период сбора данных, а также особенности, которые возникают при транспортировке газа. В данном случае необходимо использовать весовой алгоритм для объединения нескольких алгоритмов и для определения инцидента или вероятности его возникновения. Это повысит эффективность обнаружения инцидентов при транспортировке газа.

### **Библиографический список**

1. ГОСТ Р 56091-2014 Техническое расследование и учет аварий и инцидентов на объектах Единой и региональных систем газоснабжения – М.: Стандартинформ, 2014. – 20с.

2. ГОСТ Р 51897-2011/Руководство ИСО 73:2009 "Менеджмент риска. Термины и определения» (идентичный международному документу Руководство ИСО 73:2009 "Менеджмент риска. Словарь. Руководство по использованию в стандартах»), с датой введения в действие 1 декабря 2012.

3. **Еременко, С.В.** Теоретические основы управления обменом данными в среде корпоративного портала промышленного предприятия / С.В. Еременко, М.Ю. Рытов, К.А. Мегаев. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2014. – 185 с.

4. **Еременко, С.В.** Моделирование процессов информационного взаимодействия в коммуникационной среде газотранспортных предприятий при возникновении инцидентов // Информационные системы и технологии. –2019. – № 6. – С. 66-70

5. **Мухин, К. О.** Методы, модели и алгоритмы управления процессами в производственных системах: диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Мухин Кирилл Олегович; [Место защиты: Владимир. гос. ун-т]. - Владимир, 2013. - 162 с.

V. T. Eryomenko, S. V. Eryomenko, N. V. Chikalov

**DETECTION OF INCIDENTS AT OBJECTS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE  
OF THE GAS SUPPLY SYSTEM  
DETECTION OF INCIDENTS AT OBJECTS  
OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OF THE GAS SUPPLY SYSTEM**

Orel State University

**Goal.**Analyze the known algorithms and choose the best way to respond to an incident at a gas transport company.

**The method of data collection.** Control of the main parameters of gas transportation , formation of statistical data.

**The main results of modeling and their scientific novelty.**Implementation of the "precedent-reaction" database in the GTR management model, implementation of an algorithm based on fuzzy logic.

**Practical significance.** The gas transportation process is continuous and cannot be stopped. The proposed method of responding to an incident allows you to minimize the time of detecting an incident at a gas transport company.

**Keywords:** Incident, gas supply system, gas transport company, detection algorithm.

Д.Д. Зверева

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СХЕМЫ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ  
МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж

Необходимость обеспечения эффективной работы организаций обуславливает изменения в функционировании используемых ими инфокоммуникационных сетей, предназначенных для передачи информации и доступа к информационным ресурсам. Изменение условий функционирования организаций, определяемое изменением объема их финансирования и (или) их информационных потребностей, может приводить к необходимости изменения условий аренды линий связи в сетях коллективного использования и (или) модернизации собственных сетей. Рассматриваются модели выбора оптимального варианта модернизации инфокоммуникационной сети для различных целей модернизации, численный метод и алгоритм оптимизации выбора вариантов модернизации сети, основанный на использовании схемы «ветвей и границ», включающий способы построения дерева частичных решений, оценок частичных решений и обхода дерева частичных решений.

**Ключевые слова:** инфокоммуникационная сеть, приоритетные направления передачи информации, пропускная способность сети.

Повышение эффективности работы организаций различного типа в современных условиях во многом определяется своевременностью и полнотой получаемой информации, что напрямую связано с условиями эксплуатации инфокоммуникационных сетей. Как показано в [1-3] показателями эффективности функционирования сетей, как правило, выступают:

- 1) значение взвешенной пропускной способности сети ( $P$ );
- 2) значения пропускных способностей выделенных приоритетных направлений передачи информации ( $p_i$ );
- 3) объем финансовых затрат на модернизацию инфокоммуникационной сети ( $S$ ).

Совершенствование условий эксплуатации сети достигается оптимизацией указанных параметров в рамках заданных ограничений. Указанная задача может быть решена с использованием схемы ветвей и границ [4-6]. Настоящая работа посвящена описанию численного метода использования данной схемы для решения указанной задачи.

Описание численного метода приведем для условного примера сегмента сети, представленного в виде взвешенного графа (рис. 1). В данном случае в сегменте имеется одно направление передачи информации, где узел-отправитель –  $v_1$ , а узел-получатель –  $v_4$ . Пропускной способностью данного направления является величина максимального потока, которая может быть определена с помощью алгоритма Форда - Фалкерсона [7,8].

Пропускные способности линий связи данного сегмента заданы в условных единицах. Таким образом, с помощью алгоритма Форда-Фалкерсона можно определить, что пропускная способность данного направления  $p = 11$ .

Примем, что возможные варианты модернизации заданы в табл. 1.

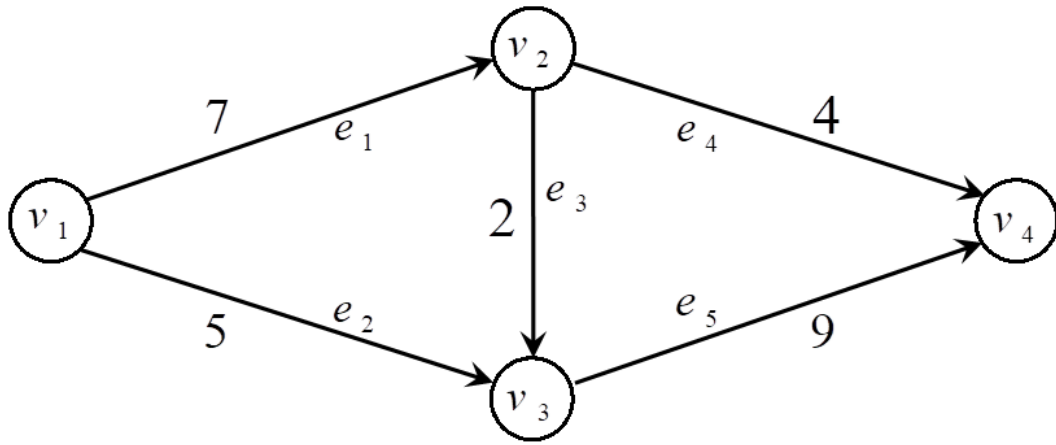


Рисунок 1. Условный пример сегмента сети

**Варианты модернизации сети**

Линия связи	Прирост пропускной способности линии связи	
$e_1$	0	0
$e_2$	2	1
$e_3$	0	0
$e_4$	0	1
$e_5$	0	2

Из таблицы видно, что в модернизации участвуют линии связи  $e_2, e_4$  и  $e_5$ , остальные линии связи при описании численного примера указываться не будут.

В [5,6] были введены следующие обозначения для вариантов модернизации инфокоммуникационной сети:

$\delta_{k,s}$  –  $s$ -й вариант изменения линии связи  $e_k$ ;

$\Delta_k = \{\delta_{k1}, \delta_{k2}, \dots, \delta_{kl}\}$  – множество всех вариантов изменения линии связи  $e_k$ ;

$c(\delta_{k,s})$  – финансовые затраты на изменение линии связи  $e_k$  по варианту  $\delta_{k,s}$ ;

$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{|\Theta|}\}$  – все варианты изменения инфокоммуникационной сети;

$\theta_j = \{\delta_{1,s_1}, \dots, \delta_{|E|,s_{|E|}}\}$  – отдельный вариант модернизации сети;

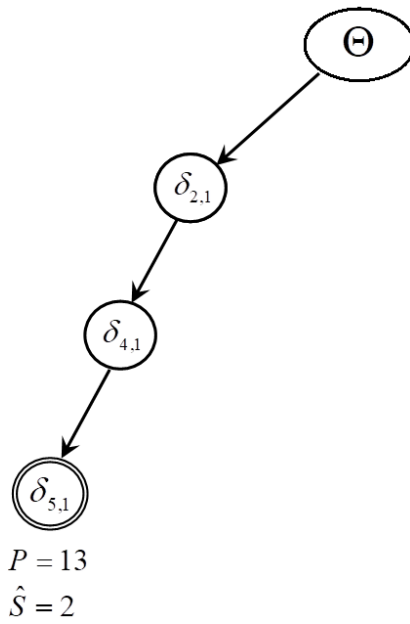
$\hat{S}$  – предельно допустимая стоимость (затраты) на изменение;

$\hat{P}$  – минимально допустимое значение взвешенной пропускной способности.

Для данного примера введем ограничение  $\hat{P} = 13$ . Ограничение на стоимость для данного условного примера зададим в виде максимума суммы всех увеличений пропускных способностей линий связи  $\hat{S} = \sum_{k=1}^5 \sum_{s=1}^2 \delta_{k,s} = 3$ .

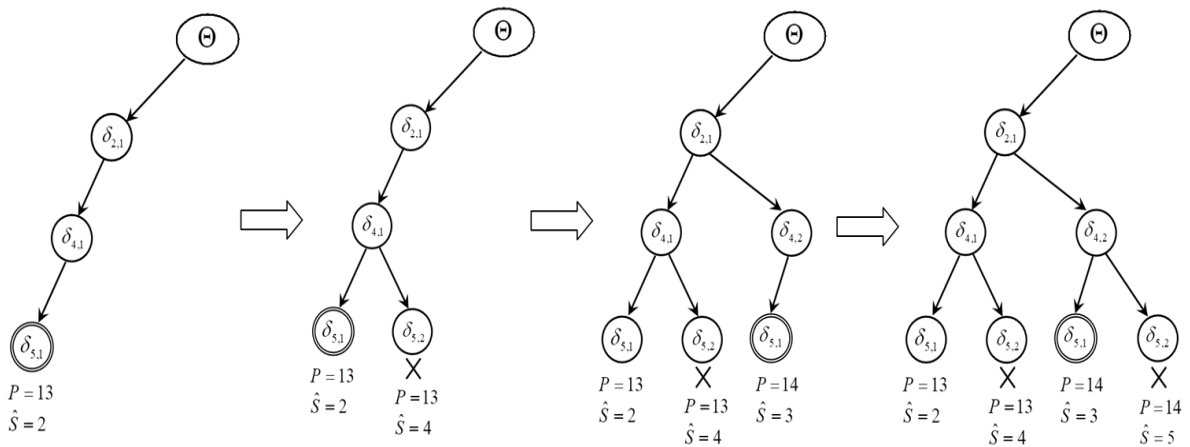
Покажем этапы обхода дерева частичных решений.

Первоначальный спуск по дереву частичных решений может быть осуществлен выбором первых вариантов модернизации каждой линии связи (рис. 2). Первоначальное решение найдено и удовлетворяет введенным ограничениям.



**Рисунок 2. Первоначальный спуск по дереву частичных решений**

Данное решение объявляется рекордным. Далее происходит оптимизация первоначального решения с помощью ограниченного обхода вершин дерева частичных решений, представленная на рис. 3.



**Рисунок 3. Обход дерева частичных решений**

Для оценки частичных решений выбираются варианты с наибольшей пропускной способностью линий связи.

Окончательный вид дерева частичных решений представлен на рис. 4.

Таким образом, был найден оптимальный вариант модернизации для описанного примера:  $\theta = \{\delta_{2,1}, \delta_{4,2}, \delta_{5,1}\}$ .

Аналогично может быть осуществлено решение задачи для оптимизации других показателей из указанных ранее.



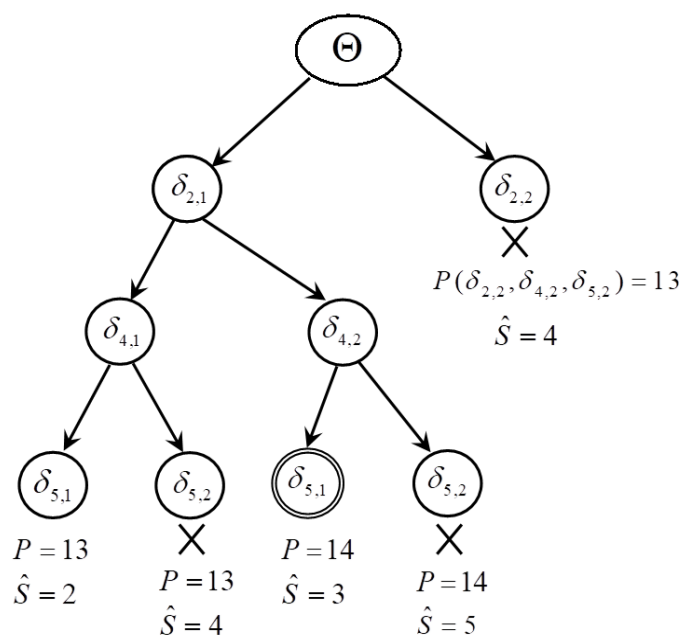


Рисунок 4. Дерево частичных решений

### Библиографический список

1. **Зверева, Д.Д.** Алгоритм оптимизации выбора вариантов модернизации инфокоммуникационной сети / Д.Д. Зверева, В.В. Меньших // Математические методы и информационно-технические средства: материалы XV Всероссийской научно-практической конференции (Краснодар, 21 июня 2019 г.). – Краснодар, 2019. – С. 61-64.
2. **Меньших, В.В.** Модель оптимизации выбора вариантов изменения инфокоммуникационной сети (сегмента сети) / В.В. Меньших, Д.Д. Зверева // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – №1. – С. 21-26.
3. **Меньших, В.В.** Модели и алгоритмы синтеза оптимальной структуры инфокоммуникационной сети с заданными параметрами / В.В. Меньших, Д.Д. Зверева // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции (Воронеж, 17-19 декабря 2018 г.). – Воронеж, 2019. – С. 860-867.
4. **Смирнов, С.Н.** Оптимизационные задачи на графах / С.Н. Смирнов, В.А. Галкина. – Москва: Гелиос АРВ, 2012. – 368 с.
5. **Zvereva, D.D.** Optimization of processes of modernization and operating conditions of infocommunication networks / D.D. Zvereva, V.V. Menshikh, A.V. Seifer // 2018 Global Smart Industry Conference (Chelyabinsk, 13-15 Nov. 2018). – Chelyabinsk, 2018. – P. 1-6.
6. **Menshikh, V.V.** Models and algorithms of optimal structure synthesis of infocommunication network with specified parameters / V.V. Menshikh, D.D. Zvereva // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1203. (2019). – 2019. – С. 012067.
7. **Зверева, Д.Д.** Об одном подходе к оценке пропускной способности инфокоммуникационной сети // Управление большими системами : сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Воронеж, 10-13 сентября 2018 г.). – Воронеж, 2018. – С. 216-219.

8. Оценка пропускных способностей направлений передачи информации с использованием алгоритма анализа потоков в сетях / Д.Д. Зверева, В.В. Меньших. — №2020611455; дата регистрации 31.01.2020

**D.D. Zvereva**

**APPLICATION OF BRANCH AND BOUND SCHEME FOR THE SELECTION OF OPTIONS FOR MODERNIZATION OF INFOCOMMUNICATION NETWORKS**

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation

The need to ensure the effective performance of organizations causes changes in operating conditions of their infocommunication networks, which are used for data transfer and access to data resources. Change in conditions of organizations performance may lead to the need for making changes in the conditions of lease of communication channels in public networks and (or) modernization of their own networks. In previous works, models were developed for choosing the best option for upgrading the infocommunication network for various modernization purposes, a numerical method and an algorithm for optimizing the choice of network modernization options based on the use of the branch and bound scheme, including methods for constructing a partial solution tree, estimating partial solutions, and traversing of partial solutions tree.

**Keywords:** infocommunication network, priority ways of information transfer, network throughput, maximum flow.

С.Л. Зефирова, А.Ю. Щербакова

## ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Рассматривается способ оценки информационной безопасности, основанный на оценке существующего уровня информационной безопасности объекта и прогнозе его развития.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, оценка соответствия информационной безопасности, уровень возможности процессов управления информационной безопасностью.

Оценка информационной безопасности (ИБ) объекта заключается в выработке оценочного суждения относительно адекватности используемых защитных мер и процессов управления ИБ или целесообразности (достаточности) затрат для обеспечения необходимого уровня ИБ на основе измерения и оценивания критических факторов объекта оценки.

Наиболее применяемой и хорошо разработанной является оценка соответствия ИБ объекта установленному эталону. Под оценкой соответствия ИБ объекта установленным требованиям понимается деятельность, связанная с прямым или косвенным определением выполнения или невыполнения соответствующих требований ИБ объекта. С помощью оценки соответствия ИБ оценивается правильность реализации защитных мер и правильность реализации процессов системы управления ИБ и идентифицируются недостатки реализации [1].

В результате проведения такой оценки ИБ формируется оценка степени соответствия ИБ эталону, в качестве которого могут быть приняты (в совокупности или отдельно):

- требования законодательства Российской Федерации в области ИБ;
- отраслевые требования по обеспечению ИБ;
- требования нормативных, методических и организационно-распорядительных документов по ИБ объекта;
- требования национальных и международных стандартов в области ИБ.

Однако если оценка соответствия правильности реализации защитных мер является информативной и основанной на значительном количестве нормативных, методических и организационно-распорядительных документов по ИБ объекта (политика ИБ объекта, план обработки риска, план реализации защитных мер и другое), то оценка соответствия правильности реализации процессов управления ИБ является не столь информативной, поскольку не даёт оценку возможности процессов, а даёт лишь оценку уровня реализации процессов управления ИБ.

Таким образом, формирование и применение при проведении аудита ИБ оценки соответствия для защитных мер и оценки возможности для процессов управления ИБ создаст наиболее адекватные информационные потребности для улучшения и совершенствования ИБ объекта.

Правильность реализации защитных мер определяется с помощью измерения атрибутов (свойств, характеристик) защитных мер. Измерение атрибутов осуществляется с помощью методов измерения, включающих следующие процедуры:

- сбор свидетельств оценки атрибутов с помощью опроса, наблюдения, документальной проверки;

– измерение (оценивание) атрибутов относительно определенной шкалы, зафиксированной или в анкетах (для совокупности атрибутов), или в метриках (для каждого атрибута).

С целью оценки соответствия атрибутов процессов обеспечения ИБ установленным критериям оценка строится на основе показателей функционирования защитных мер, которые применяются для измерения правильности реализации защитных мер объекта.

Для описания соответствия реальных атрибутов  $Y$  требуемым атрибутам  $Y^{TP}$  введем числовую функцию на множестве атрибутов защитных мер - функцию соответствия:

$$\rho = \rho(Y, Y^{TP}) \quad (1)$$

Эту функцию можно использовать в качестве показателя  $W$  функционирования (правильности реализации) защитных мер объекта:

$$W = \rho(Y, Y^{TP})$$

Показатель функционирования  $W$  защитной меры есть мера степени соответствия реальных атрибутов требуемым.

Для отдельной защитной меры измеряется  $W_{ji}$  - частный показатель  $i$ -го атрибута (защитной меры)  $j$ -й области обеспечения ИБ. Для совокупности защитных мер единой области обеспечения ИБ (криптографическая защита, антивирусная защита и др.) вычисляется  $W_j$  - комплексный показатель  $j$ -й области обеспечения ИБ.

Характеристики и свойства защитных мер, которые несут атрибуты, не равнозначны с точки зрения значимости защитных мер для обеспечения ИБ. Поэтому необходимо определить способ объединения частных показателей при формировании комплексных показателей из частных.

Комплексные показатели при различной значимости частных показателей можно вычислять с помощью свёртки:

$$W_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} W_{ji},$$

где  $\alpha_{ji}$  - коэффициент значимости частного показателя  $i$ -ого атрибута (защитной меры)  $j$ -ой области обеспечения ИБ.

Так получается оценка соответствия реализованных защитных мер установленным требованиям и оценка реализованных областей обеспечения ИБ относительно установленной шкалы уровней соответствия областей обеспечения ИБ.

Следующим этапом оценки ИБ объекта является оценка возможности процессов управления ИБ [1].

Оценка возможности процессов управления информационной безопасностью основывается на следующих принципах:

- процессы управления ИБ оцениваются по пяти уровням: от первого (минимального) до пятого (максимального), причём, каждый следующий уровень включает полностью реализацию предыдущих уровней;
- каждый уровень описывается определенным набором показателей и их значениями;
- оценка процессов управления ИБ осуществляется на основе свидетельств оценки возможности процессов.

Каждому уровню возможности сопоставляются соответствующие общие характеристики процессов управления ИБ. Эти характеристики приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Общие характеристики уровней возможности процессов управления ИБ**

Уровень возможности процессов управления ИБ	Общие характеристики уровней возможности процессов управления ИБ
Первый уровень	<p>На объекте осознается существование проблем ИБ и необходимость их решения.</p> <p>Деятельность в области ИБ реализована в виде некоторых процессов управления ИБ, однако они не всегда достигают ожидаемых результатов.</p> <p>Организованный подход к управлению ИБ отсутствует.</p> <p>В организации могут быть разработаны отдельные локальные нормативные документы по обеспечению ИБ.</p>
Второй уровень	<p>На объекте заинтересованы в качественном и своевременном решении существующих проблем ИБ.</p> <p>Деятельность в области ИБ реализована в виде некоторых процессов управления ИБ. Процессы, в основном, достигают своего назначения. Однако многие реализованы бессистемно, реализуются от случая к случаю на индивидуальной основе.</p> <p>Реализация процессов управления ИБ во многом зависит от компетенции отдельных лиц; в организации не создана система обучения и информирования работников о принятых процессах управления ИБ</p>
Третий уровень	<p>В организации уделяется должное внимание проблемам в области ИБ и их решению, ответственности в области ИБ.</p> <p>Процессы управления ИБ зафиксированы документально (определены цели осуществления процессов, определены ответственность и полномочия, ресурсы, необходимые для осуществления процессов и т. п.). Также определены ожидаемые результаты реализации процессов. Процессы управления ИБ включают в свой состав процедуры, некоторые из которых соответствуют общепринятой практике.</p> <p>На объекте реализован формализованный подход к обучению и информированию о процессах управления ИБ.</p> <p>На объекте может осуществляться планирование, контроль и оценка некоторых процессов обеспечения и управления ИБ, частичный контроль за соблюдением установленных требований, однако процедуры контроля не формализованы</p>
Четвёртый уровень	<p>На объекте установлена ответственность за управление ИБ (распределены роли по обеспечению и управлению ИБ, назначены исполнители ролей и т.п.).</p> <p>Регламентированные процессы выполняются управляемым образом: планируются, реализуются, контролируются, измеряются.</p> <p>Осуществляется контроль выполнения требований нормативных документов в области ИБ.</p> <p>Процессы управления ИБ соответствуют общепринятой практике.</p> <p>Процессы подвержены измерению (оценке) и постоянному контролю. В случае, если процессы неэффективны, могут быть приняты соответствующие меры.</p>

Пятый уровень	<p>Определены цели улучшения процессов и процедур управления ИБ, которые обеспечивают достижение целей объекта.</p> <p>Процессы управления ИБ полностью интегрированы в деятельность объекта.</p> <p>Идентифицированы возможности улучшений, связанные с новыми технологиями.</p> <p>Непрерывное совершенствование ИБ направлено на:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- улучшение процессов и процедур управления ИБ;</li> <li>- создание и поддержку системы управления ИБ, адекватной целям ИБ объекта.</li> </ul>
---------------	--

Для оценки возможности процессов управления ИБ используются основные и комплексные показатели. Комплексные показатели  $K_i$  ( $i$  – номер комплексного показателя) возможности процессов управления ИБ отражают совокупность характеристик уровней возможности. Основные показатели  $K_{ij}$  ( $i$  – номер комплексного показателя,  $j$  – номер основного показателя в комплексном показателе) отражают отдельные характеристики уровней возможности процессов управления ИБ и входят в состав комплексных показателей. Обозначение и наименование комплексных показателей показано в табл.2.

Таблица 2

### Комплексные показатели оценки возможности процессов управления ИБ

Обозначение комплексного показателя	Наименование комплексного показателя
$K_1$	Первый уровень
$K_2$	Второй уровень
$K_3$	Третий уровень
$K_4$	Четвёртый уровень
$K_5$	Пятый уровень

Основные показатели оценки возможности процессов управления ИБ разрабатываются для каждого комплексного показателя. Например, для комплексного показателя  $K_3$  основные показатели могут быть следующими (табл.3).

Таблица 3

### Основные показатели для комплексного показателя $K_3$

Уровень возможности процесса	Основной показатель процесса
$K_{3.1}$	Зафиксирован ли документально процесс управления ИБ?
$K_{3.2}$	Существует ли на объекте ролевая политика в области ИБ?
$K_{3.3}$	Определены ли цели осуществления процесса управления ИБ?
$K_{3.4}$	Определены ли ответственности и полномочия по осуществлению процесса управления ИБ?
$K_{3.5}$	Идентифицированы ли ресурсы и информация, необходимая для осуществления процесса управления ИБ?
$K_{3.6}$	Определен ли перечень результатов (выходов) процесса управления ИБ?

К <sub>3.7</sub>	Формализована ли существующая на объекте практика в области управления ИБ в виде процедур процесса управления ИБ?
К <sub>3.8</sub>	Регламентирован ли на объекте подход к обучению и информированию о реализованном процессе управления ИБ?
К <sub>3.9</sub>	Установлены ли на объекте требования по осуществлению контроля за реализацией процесса управления ИБ?
К <sub>3.10</sub>	Осуществляется ли на объекте оценка процесса управления ИБ?

Основные показатели определяются с помощью методов измерения, включающих следующие процедуры:

- сбор свидетельств оценки возможности процессов управления ИБ с помощью опроса, наблюдения, документальной проверки;
- измерение (оценивание) основных показателей относительно определенной шкалы, зафиксированной или в анкетах (для совокупности основных показателей), или в метриках (для каждого основного показателя).

Шкала может быть следующей:

- Н – не выполнен [0% - 15%]. Свидетельств выполнения основного показателя мало или они отсутствуют;
- Ч – частично выполнен (15% - 50%). Имеются свидетельства частичного, некоторого выполнения основного показателя;
- В – в основном выполнен (50% - 85%). Имеются свидетельства существенного выполнения основного показателя. В оцениваемой характеристике процесса возможны некоторые слабые места;
- П – полностью выполнен (85% - 100%). Имеются свидетельства систематического и полного выполнения основного показателя.

Модель формирования уровня возможности процесса представляется соответствием комплексных показателей возможности процесса и их оценок уровням возможности процесса (табл.4).

Таблица 4

#### Модель формирования уровня возможности процесса

Уровень возможности процесса	Комплексный показатель процесса	Оценка комплексного показателя
Уровень 1	К <sub>1</sub>	В основном выполнен или полностью выполнен
Уровень 2	К <sub>1</sub> К <sub>2</sub>	Полностью выполнен В основном выполнен или полностью выполнен
Уровень 3	К <sub>1</sub> К <sub>2</sub> К <sub>3</sub>	Полностью выполнен Полностью выполнен В основном выполнен или полностью выполнен
Уровень 4	К <sub>1</sub> К <sub>2</sub> К <sub>3</sub> К <sub>4</sub>	Полностью выполнен Полностью выполнен Полностью выполнен В основном выполнен или полностью выполнен
Уровень 5	К <sub>1</sub> К <sub>2</sub> К <sub>3</sub> К <sub>4</sub> К <sub>5</sub>	Полностью выполнен Полностью выполнен Полностью выполнен Полностью выполнен В основном выполнен или полностью выполнен

Предложенная оценка ИБ объекта при проведении аудита ИБ позволяет сформировать оценку соответствия правильности реализации защитных мер, что важно для оценивания текущего уровня защищённости объекта, и оценку возможности процессов управления ИБ, что необходимо для прогнозирования развития уровня ИБ объекта.

---

1. **Андрианов, В.В.** Обеспечение информационной безопасности бизнеса / В.В. Андрианов, С.Л. Зефирова, В.Б. Голованов, Н.А. Голдуев; Под ред. А.П.Курило – М.: Издательство Альпина Паблицерз, 2011 – 373 с.

**S.L. Zefirov, A.Y. Shcherbakova**

**INFORMATION SECURITY ASSESSMENT  
OF THE OBJECT DURING INFORMATION SECURITY AUDIT**

Penza State University

A method for information security assessment based on an existing information security level of an object and a forecasting of its development is being considered.

**Keywords:** information security, conformity information security assessment, level of information security management processes capability



С.О. Иванов

## ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

**Цель работы:** Для анализа рисков информационной безопасности необходимо иметь данные об актуальных угрозах, новых уязвимостях, и точной величине ущерба. В глобальной сети Интернет существует множество источников, которые помогут собрать данные.

**Результат:** В работе рассматриваются наиболее значимые отечественные и зарубежные источники данных по информационной безопасности: отчеты IT-компаний, содержимое международных и национальных баз, публикации информационно-аналитических центров. Приведено сравнение источников.

**Научный подход:** Ключевым критерием отбора источников являлись регулярность появления данных, их объективность и значимость. Сравнение источников данных было проведено по открытости данных, многосторонности, масштабу деятельности

**Новизна:** Использование представленных источников данных позволит разработать методики оценки актуальных рисков, адекватную систему управления безопасности компаний.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, источники информации, статистика, отчеты IT-компаний, информационно-аналитические центры.

### Введение

Анализ рисков информационной безопасности – важный элемент оценки и контроля эффективности системы защиты информации организации. Однако для его проведения необходимы актуальные, точные и полные данные. Необходимо собрать и проанализировать данные об актуальных угрозах, новых уязвимостях, точной величине ущерба. Целью данной работы найти отечественные и зарубежные источники данных по информационной безопасности.

Основными требованиями к источникам являются: регулярность появления данных, их объективность и значимость. Все источники данных по ИБ можно разделить на три группы: отчеты IT-компаний, содержимое международных и национальных баз, публикации информационно-аналитических центров.

### Отчеты IT-компаний

Хорошими источниками данных являются IT-компании, которые предоставляют ежегодные/ежеквартальные отчеты по своим продуктам. Многие используют автоматизированные системы для сбора данных об инцидентах. Например АО «Лаборатория Касперского» использует данные Kaspersky Security Network для сбора статистики об активности ИТ-угроз [1]. Существует так же ESET Threat Intelligence – платный облачный сервис от компании ESET предоставляющий информацию о кибер-инцидентах и целевых угрозах [2].

Учитывая распространённость операционной системы Windows, стоит обратить внимание на регулярные публикации компании Microsoft о тенденциях и угрозах кибербезопасности – Security Intelligence Report [3].

В рамках подхода «интеллектуальное лидерство» в сфере информационных технологий компания CISCO публикует серию отчетов по информационной безопасности в различных сферах [4], а также ежегодные итоговые отчеты.

В области защиты промышленных предприятий и объектов критически важных инфраструктур компания АО «Лаборатория Касперского» запустила глобальный проект Kaspersky Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, публикующий отчеты об угрозах и уязвимостях в данной сфере [5].

### **Интернет базы**

Популярный показатель для сравнения качества программных продуктов по кибербезопасности – число «неустранённых» уязвимостей (unpatched vulnerabilities), предоставляемых компанией Secunia (поглощена Flexera). Компании Secunia ежегодно выпускает Flexera Annual Vulnerability Review Report [6] содержащий данные о распространенности уязвимостей и карту угроз информационной инфраструктуры.

Что бы согласовать базы уязвимостей различных организаций в 1999 году был запущен проект CVE (англ. Common Vulnerabilities and Exposures) [7] – база данных общеизвестных уязвимостей информационной безопасности, где каждая уязвимость имеет свой идентификационный номер, описание и оценка. Продолжением CVE является CWE (Common Weakness Enumeration) – общий перечень уязвимостей и недостатков безопасности программного обеспечения, отчеты [8] которого используются для оценки качества и безопасности используемых программ.

После атаки «червя Морриса» в 1988 году во многих странах имеются команды «Computer emergency response team» или «CERT», занимающихся сбором информации об инцидентах, их классификацией и нейтрализацией. Большинство групп CERT создаются университетами и крупными ИТ-компаниями, и поэтому занимаются и аналитической работой. Компьютерная команда экстренной готовности США (US-CERT) предоставляет бюллетени и аналитические отчеты о новых уязвимостях и развитии киберугроз [9].

Проект Топ-10 сообщества OWASP (Open Web Application Security Project) обобщает информацию о наиболее критичных рисках веб-приложений [10].

В Российской Федерации есть свой проект по сбору и классификации угроз и уязвимостей – Банк данных угроз безопасности информации ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» [11].

### **Публикации информационно-аналитических центров**

Многие информационно-аналитический центры проводят, собирают и анализируют данные в области ИБ.

Немецкий интернет-портал Statista собирает данные исследовательских институтов и различных секторов экономики. Это она из наиболее успешных статистических баз данных в мире. В категории Statistics and Market Data on Cyber Crime [12] можно найти статистику, факты и рыночные данные, связанные с киберпреступлениями, включая информацию об их влиянии на демографию.

Сообщество BISA объединяет профессионалов в области информационной безопасности, руководителей бизнес подразделений, представителей регуляторов и других специалистов, заинтересованных в развитии информационной безопасности в России и мире. Сообщество выпускает ежеквартальный журнал о трендах, знаниях и личном опыте в области защиты информационных активов «Безопасность деловой информации» [13]. Сообщество выделяет следующие наиболее информативные и авторитетные онлайн-источники информации в области ИБ, которые можно использовать для сбора информации:

- Аналитическая центр компании InfoWatch [14] – мониторинг утечек информации, аналитические отчеты по утечкам и защищенности организаций различных отраслей;
- Подписки по безопасности и приватности IDC [15];
- Ponemon Institute [16] – независимый исследовательский и образовательный центр, специализирующийся в области бизнес-практики и госуправления;
- Федеральная торговая комиссия США (Federal Trade Commission) [17], занимающаяся вопросами защиты прав потребителей в США, в том числе защитой права на неприкосновенность частной жизни, защитой персональных данных граждан;
- Портал новостей об утечках конфиденциальной информации [18].

Независимый российский информационно-аналитический центр «Anti-Malware.ru» публикует исследования различных секторов рынка информационной безопасности [19]. Помимо аналитики, специалисты центра регулярно проводят тесты и сравнения средств защиты информации, по итогам которых наиболее качественным аппаратным и программным продуктам присваивается наградной знак Certified by AM Test Lab.

Данные предоставляемые каждой группой источников имеют свои достоинства и недостатки. Основные достоинства: открытость данных, многосторонность, масштабность деятельности. Результаты сравнения источников представлены в таблице.

#### Сравнение источников данных

Источник	Открытость	Многосторонность	Масштаб
Статистика киберугроз от Касперского	+	-	+
ESET Threat Intelligence	-	-	+
Microsoft Security Intelligence Report	+	+	_***
Отчеты CISCO по ИБ	+*	+	+***
Отчеты Kaspersky ICSystems CERT	+	_**	+
Ежегодный обзор уязвимостей Flexera	+*	-	+
База уязвимостей CVE	+	_**	+
Отчеты CWE	+	_**	+
Аналитические отчеты US-CERT	+	+**	_***
Топ-10 сообщества OWASP	+	-	+
БДУ ФСТЭК	+	_**	-
Данные по киберпреступлениям Statista	-	+	+
Сообщество BISA	+*	+	-
Аналитическая центр компании InfoWatch	+*	+	-
Подписки по безопасности и приватности IDC	-	+	+***
Исследования Ponemon Institute	+	+	+***
Данные Федеральной торговой комиссии США	+	+	-
Портал databreaches	+	_**	+***
«Anti-Malware.ru»	+	+**	+

- \* требуется регистрация,
- \*\* специализированность,
- \*\*\* только зарубежные страны.

## Заключение

Для сбора данных не подходят публикации, в которых представлено мнение экспертов и даются прогнозы. Исходные данные, представленные в них, имеют ограниченный характер, и получены из источников, которые не всегда раскрыты. К этой группе также относятся блоги специалистов по информационной безопасности. Основная проблема публикаций информационно-аналитических организаций – закрытость, платность материалов. С другой стороны данные представленные интернет сообществами открыты, но имеют узкую направленность – только уязвимости и слабости программного обеспечения. Для поиска данных о частоте и ущербе от инцидентов лучше использовать отчеты IT-компаний, но следует иметь ввиду, что сведения об ущербе, нанесенном компаниям и фирмам, обезличен, так как эта информация влияет на имидж и рейтинг компании.

В целом при сборе данных, следует учитывать их вид и систему измерения, так как в дальнейшем их будет необходимо сопоставлять при проведении анализа рисков.

## Библиографический список

1. Статистика киберугроз от Лаборатории Касперского [Электронный ресурс]. – URL: <https://statistics.securelist.com/ru>
2. ESET Threat Intelligence [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eset.com/us/business/services/threat-intelligence/>
3. Microsoft Security Intelligence Report [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.microsoft.com/en-us/security/business/security-intelligence-report>
4. Отчеты CISCO по информационной безопасности [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.cisco.com/c/ru\\_ru/products/security/security-reports.html](https://www.cisco.com/c/ru_ru/products/security/security-reports.html)
5. Отчеты Kaspersky ICSYSTEMS CERT [Электронный ресурс]. – URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/category/reports/>
6. Ежегодный обзор уязвимостей Flexera [Электронный ресурс]. – URL: <https://info.flexera.com/SVM-REPORT-Vulnerability-Review-2020>
7. База уязвимостей CVE [Электронный ресурс]. – URL: <https://cve.mitre.org/>
8. Отчеты об уязвимостях программного обеспечения CWE [Электронный ресурс]. – URL: <https://cwe.mitre.org/data/reports.html>
9. Аналитические отчеты US-CERT [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.us-cert.gov/ncas>
10. Топ-10 сообщества OWASP [Электронный ресурс]. – URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/>
11. Банк данных угроз безопасности информации ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» [Электронный ресурс]. – URL: <https://bdu.fstec.ru>
12. Статистика и рыночные данные по киберпреступлениям [Электронный ресурс] // Немецкий интернет-портал Statista. – URL: <https://www.statista.com/markets/424/topic/1065/cyber-crime/>
13. «Безопасность деловой информации» [Электронный ресурс] // Сообщество BISA. – URL: <https://bis-expert.ru/bdi>
14. Аналитическая центр компании InfoWatch [Электронный ресурс]. – URL:

<http://www.infowatch.ru/analytics>

15. Подписки по безопасности и приватности IDC [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.idc.com/prodserv/subservices.jsp>

16. Исследования Ponemon Institute в области приватности и безопасности [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ponemon.org/library>

17. Данные Федеральной торговой комиссии США [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ftc.gov/enforcement/data-visualizations>

18. Портал новостей об утечках конфиденциальной информации [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.databreaches.net/>

19. Информационно-аналитический центр «Anti-Malware.ru» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.anti-malware.ru>

**S.O. Ivanov**

## **INFORMATION SECURITY DATA SOURCES**

The Ulianov Chuvash State University

**Purpose:** To analyze information security risks, it is necessary to have data on current threats, new vulnerabilities, and the exact amount of damage. There are many sources on the global Internet that can help you collect data.

**Result:** The paper considers the most significant domestic and foreign data sources on information security: reports of IT companies, contents of international and national databases, publications of information and analytical centers. A comparison of sources is given.

**Design/methodology/approach:** The key criteria for selecting sources were the regularity of data appearance, their objectivity and significance. Data sources were compared based on data openness, versatility, and scale of activity

**Originality/value:** The exploitation of the presented data sources bring to develop methods for assessing actual risks and an adequate information security system management of companies.

**Keywords:** information security, data sources, statistics, reports of IT companies, information and analytical centers.

А.Н. Ивкин, М.Е. Бурлаков

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ПРАВИЛ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,  
г. Самара

В связи с постоянным развитием компьютерных систем и разработкой всевозможных приложений, очевидно, увеличивается потенциальная угроза результативных атак. Система обнаружения вторжений является одним из наиболее важных инструментов защиты от сетевых атак. Для реализации системы обнаружения вторжений основанной на аномалиях необходим корректный набор данных. Существует целый ряд наборов данных, таких как KDD99, ISC2012, ADFA2013 и т.д., которые используются для оценки эффективности предлагаемых методов обнаружения и предотвращения вторжений. Большинство наборов данных содержат устаревшую информацию, недостаточно разнообразный трафик, однотипные атаки, сильно урезанную информацию о пакетах, нехватку атрибутов. В исследовательской работе произведен сравнительный анализ 15 различных наборов данных для систем обнаружения вторжении. В данной работе оценивается важность отдельных атрибутов, для обнаружения определенных атак. Так же оценивается эффективность применения 8 различных алгоритмов машинного обучения. Мерами оценки эффективности рассмотренных наборов выступает: точность, полнота, F-мера. В завершении создаются экспертные правила из инструмента машинного обучения и внедряются в систему обнаружения вторжений, с целью реализации системы основанной на правилах инструмента машинного обучения. Предложенный метод показывает эффективные показатели обнаружения.

**Ключевые слова:** система обнаружения вторжений, набор данных, машинное обучение, экспертные правила, сетевые атаки.

### Введение

Система обнаружения вторжений (СОВ) - это программное или аппаратное средство, предназначенное для выявления факта несанкционированного доступа в компьютерную систему или локально-вычислительную систему. Обнаружение вторжений играет важную роль в процессе защиты сети, направляя администратору предупреждения о вредоносных событиях. Таким образом, постоянно растет количество исследований в области СОВ, с целью реализации наиболее эффективной системы. Для тестирования и оценки эффективности различных методов применяемых в СОВ, необходим корректный набор данных с реальным трафиком и современными сетевыми атаками. Некоторые наборы не могут быть представлены в открытом доступе из-за наличия конфиденциальной информации, другие содержат нехватку трафика и отсутствие разнообразия представляемых атак. Также необходимо отметить, что из-за постоянного развития вредоносного программного обеспечения и стратегий развития атак в целом, эталонные наборы данных должны периодически обновляться. Согласно исследова-

ниям [1-3] предложено множество способов оценки наборов данных для СОВ. В данной работе используется наиболее современная система оценки [3], состоящая из 11 критериев: разнообразие атак, доступные протоколы, набор выделенных атрибутов, неоднородность, топология сети, используемые сетевых взаимодействий, количество и качество трафика, анонимность, маркировка, метаданные и наличие записи всего используемого в модели трафика.

В данной работе произведен сравнительный анализ наборов данных, находящихся в открытом доступе. В работе применены восемь алгоритмов машинного обучения и получены оценки классификации. С помощью написанного программного обеспечения были определены наиболее важные атрибуты для каждой из представленных атак, а также реализовано программное обеспечение для извлечения экспертных правил из инструмента машинного обучения WEKA и внедрения правил в СОВ. Таким образом, была реализована эффективная СОВ на основе экспертных правил, полученных при использовании алгоритма машинного обучения на актуальном наборе данных.

### **Сравнительный анализ наборов данных**

С целью показать необходимость корректного набора данных, демонстрируются проблемы и недостатки в 14 проанализированных наборах данных, находящихся в открытом доступе.

- DARPA (Lincoln Laboratory 1998-99). Данный набор не соответствует реальному современному сетевому трафику и содержит всевозможные нарушения. Таким образом, набор устарел для эффективной оценки СОВ, как с точки зрения сетевых атак и нехватки данных, так и с точки зрения топологии сети.
- KDD'99 (University of California, Irvine 1998-99). Устаревший набор, содержащий большое количество избыточных записей, а также поврежденные данные.
- DEFCON (The Shmoo Group, 2000-2002). Трафик данного набора не соответствует реальному, так как генерировался в ходе открытого конкурса по информационной безопасности.
- CAIDA (Center of Applied Internet Data Analysis 2002-2016). Содержит 3 разных набора данных: CAIDA OC48, CAIDA DDOS, CAIDA Internet2016. Данные наборы очень специфичны для детектирования атак и содержат анонимную информацию, что делает их неэффективными при сравнительном анализе.
- LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). В наборе отсутствует полезная нагрузка и содержится большое количество анонимной информации.
- CDX (United States Military Academy 2009). В наборе отсутствует достаточное разнообразие трафика.
- Kyoto (Kyoto University 2009). Нормальные данные в данном наборе содержат только DNS и почтовый трафик, что не отражает реальный сетевой трафик и уменьшает общее количество ложных срабатываний.
- Twente (University of Twente 2009). Набор содержит не маркированный трафик, нехватку общего трафика и однообразные сетевые атаки.
- UMASS (University of Massachusetts 2011). UMASS создан с использованием одного сценария атаки, следовательно отсутствует разнообразный трафик, что делает его бесполезным для тестирования методов СОВ.

- ISCX2012 (University of New Brunswick). В ISCX не представлены важные современные сетевые протоколы, кроме того распределение сгенерированных атак не соответствует реальной статистике.

- HTTPCSIC2010 (Spanish Research National Council). HTTP узко специализированный набор данных с нехваткой общего объема информации, сетевых атак и разновидностей используемых протоколов.

- ADFA (University of New South Wales). ADFA содержит неверно промаркированные данные и недостаточное разнообразие сетевых атак.

CICIDS (Canadian institute for cybersecurity) [4]. Согласно проведенному сравнительному анализу (табл. 1), данный набор выбран для дальнейшей исследовательской работы, так как удовлетворяет всем критериям эталонного набора.

**Таблица 1**

**Результаты сравнительного анализа представленных наборов**

	Разн. атак	Разн. протокол.	Атрибуты	Неоднородность	Топология сети	Сет. взаимодей.	Трафик	Анонимность	Маркировка	Метаданные	Захват трафика
<b>DARPA</b>	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+
<b>KDD</b>	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	+
<b>Kyoto</b>	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+
<b>CDX</b>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+
<b>LBNL</b>	-	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-
<b>CAIDA</b>	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-
<b>DEFCON</b>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+
<b>UMASS</b>	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+
<b>Twente</b>	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+
<b>ISCX</b>	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
<b>ADFA</b>	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+
<b>HTTPCSIC</b>	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+
<b>CICIDS</b>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

### **Набор данных CICIDS**

Набор данных CICIDS содержит наиболее распространенные атаки (Web based, Bruteforce, DoS, DDoS, Infiltration, Heartbleed, Bot and Scan) и протоколы (HTTP, HTTPS, FTP, SSH, email). Представленный в табличном формате набор имеет 79 различных атрибутов для каждого пакета. Неоднородность набора достигается путем захвата сетевого трафика с основного коммутатора, а также записываются все системные вызовы и дампы памяти компьютеров, на которые производятся атаки. Топология сети включает модем, брандмауэр, коммутаторы, маршрутизаторы, а также наличие различных операционных систем (Windows, Ubuntu и Macintosh). При генерации трафика (рис.1) эмулировалось две сети, сеть злоумышленника и сеть жертвы.



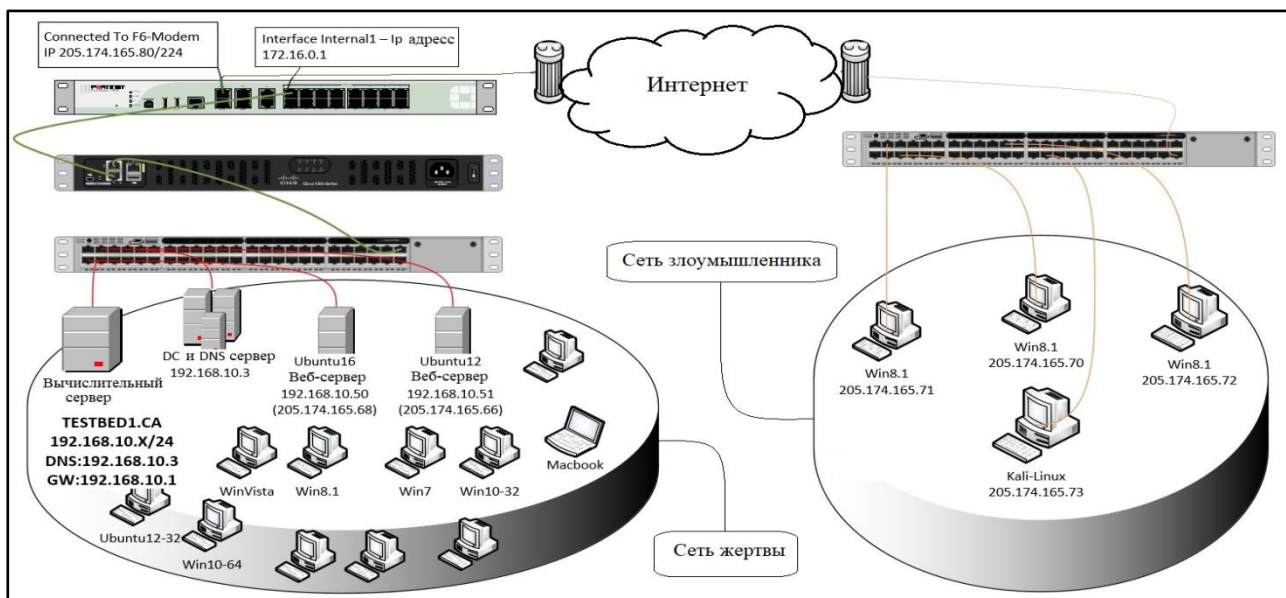


Рисунок 1. Архитектура генерации трафика CICIDS

Стоит отметить, что в данном наборе существует профиль нормального поведения, то есть использовалось программное обеспечение для эмуляции реального поведения пользователей в сети. Период записи сгенерированного трафика продолжался пять дней, как показано в табл.2.

Таблица 2

Наименование перехваченного трафика по дням

День	Наименование
Понедельник	Нормальный трафик
Вторник	BForce,SFTP и SSH
Среда	DoS, Heartbleed Attacks Slowloris, Slowhttptest, Hulk иGoldenEye
Четверг	Web и Infiltration Attacks Web BForce, XSS иSqlинъекции. Infiltration Dropbox Download иCool disk
Пятница	DDoS LOIT, Botnet ARES, PortScans

### Классификация данных

Для анализа выбранного набора данных, использовался инструмент машинного обучения WEKA. WEKA - программное обеспечение с открытым исходным кодом для машинного обучения [5]. В инструменте WEKA, для каждого из алгоритмов заданы входные параметры по умолчанию. В данной работе используются, полученные экспериментальным путем, наилучшие параметры входа для каждого из алгоритмов [6].

Метрики, используемые для измерения эффективности предложенных методов, - это точность и полнота. Точность системы (*precision*)– это часть атак действительно являющихся атаками в отношении ко всем определенным системой атак. Полнота системы (*recall*) – это часть найденных атак в отношении ко всем имеющимся атакам. В поисках баланса между точностью и полнотой на первый план выходит метрика, непосредственно объединяющая

два понятия *F-мера* или гармоническое среднее точности и полноты. Предложенный набор данных проверен на различных алгоритмах машинного обучения с представлением результатов классификации в табл. 3. На рис. 2, представлен вывод работы алгоритма J48 на примере набора CICIDS за среду.

Таблица 3

Оценка эффективности алгоритмов на наборе CICIDS

Алгоритм	Точность	Полнота	Fмера
KNN	0.96	0.96	0.96
RF	0.98	0.97	0.97
ID3	0.98	0.98	0.98
Adaboost	0.77	0.84	0.80
MLP	0.77	0.83	0.76
Naive-Bayes	0.88	0.84	0.86
QDA	0.97	0.88	0.92
J48	0.98	0.98	0.98

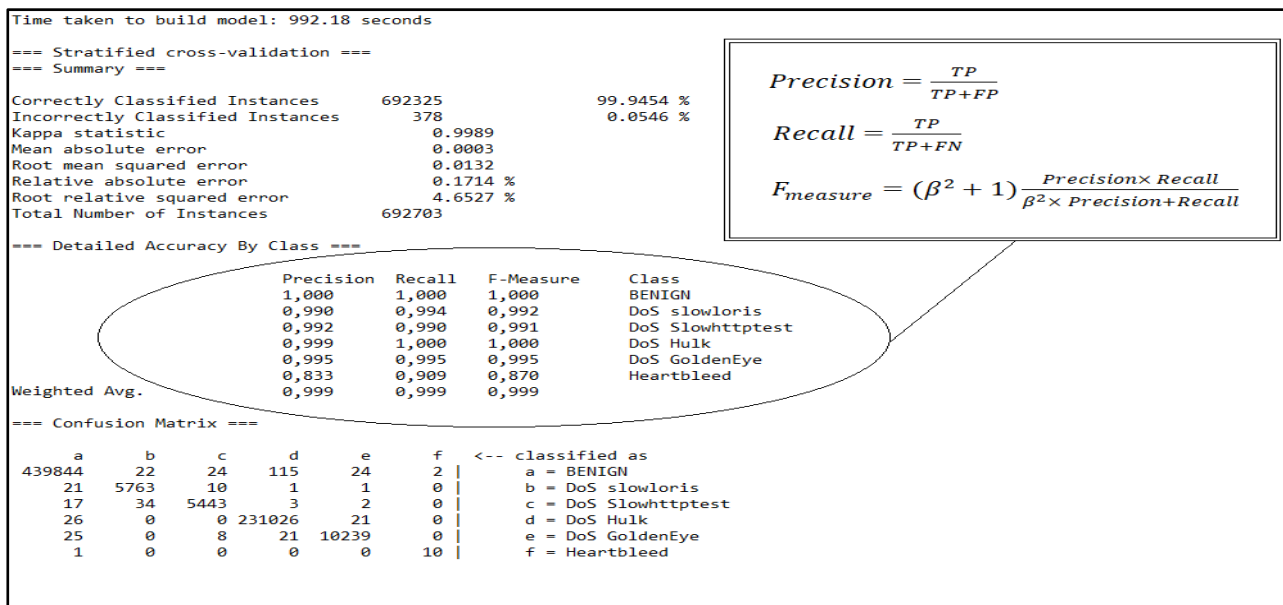


Рисунок 2. Вывод работы инструмента машинного обучения на наборе CICIDS за среду

### Составление экспертных правил

В результате проведенной оценки эффективности алгоритмов был выбран алгоритм j48. С помощью написанного программного обеспечения были составлены экспертные правила для каждой из атак набора, с целью дальнейшего внедрения в СОВ. Реализованная СОВ показывает эффективные показатели верно классифицированной информации, свыше 98%. Пример составленного правила показан на рис. 3. Вследствие работы были выявлены наиболее важные атрибуты для каждой из атак. Например, для DoS атаки типа Golden Eye, атрибуты V.Packet LenStd, Flow IAT Min, Fwd IAT Min, Flow IAT Mean представляют больший интерес, чем остальные.

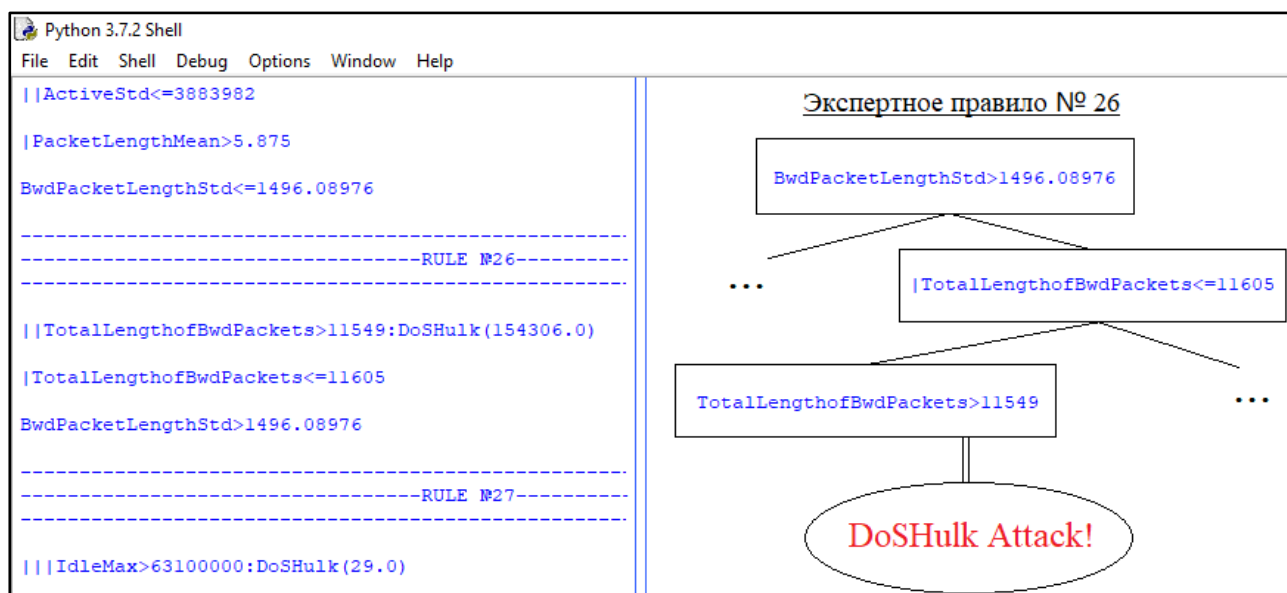


Рисунок 3. Составление экспертных правил для каждой из атак

### Заключение

В настоящее время большое количество методов и инструментов используются для обнаружения вторжений в компьютерную сеть, и проводятся исследования с целью улучшить число распознанных вторжений, несмотря на постоянно появляющиеся новые атаки. Одним из основных средств выявления сетевых атак является СОВ. В работе показана необходимость применения корректного набора данных, с этой целью проведен сравнительный анализ 15 различных наборов. Также в работе предложен метод обнаружения вторжений с использованием экспертных правил машинного обучения. В исследовательской работе были проанализированы результаты 8 алгоритмов машинного обучения и получены максимальные показатели эффективности. В работе было реализовано программное обеспечения для составления экспертных правил и внедрения в сетевую СОВ. Предлагаемая система на наборе данных CICIDS позволяет быстро и эффективно обнаруживать отдельные атаки, обеспечивая эффективные показатели обнаружения (свыше 98 %). Вследствие работы были определены наиболее важные атрибуты набора CICIDS для каждой из атак.

### Библиографический список

1. **Ali, L.W.** Network intrusion detection and prevention: Concepts and techniques // L. W. Ali, T. Mahbod. – Springer Science, LLC 2010 – С. 205.
2. **Ali, Shiravi.** Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection // Ali Shiravi, M. T. HadiShiravi, and A. A. Ghorbani. – Computers and Security. – 2012. – №31 – С. 357.
3. **Gharib, A.** An evaluation framework for intrusion detection dataset // A. Gharib, I. Sharafaldin, A. A. Ghorbani. – In 2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS). – 2016. – С. 1–6.
4. **Iman, S.** Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization // S. Iman, A. H. Lashkari and A. A. Ghorbani. – Portugal, 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP). – 2018. – С. 108.

5. **Hall, M.** The WEKA data mining software // M. Hall, F. Eibe, H. Geoffrey. – ACM SIGKDD explorations newsletter. – 2009. – №1 – С. 10.
6. **Ивкин, А.Н.** Использование алгоритмов машинного обучения в сетевой системе обнаружения и предотвращения вторжений / А.Н. Ивкин, М.Е. Бурлаков. – Ставрополь: Изд-во СФУ, 2019, 25 с.

**A.N. Ivkin, M. E. Burlakov**

## **RESEARCH OF DATA SETS AND COMPOSITION EXPERT RULES FOR INTRUSION DETECTION SYSTEM**

Samara University

**Purpose:** This article is devoted to research the datasets. The best presented datasets was analyzed using a machine learning tool, in order to get the best performance. Also in this paper we propose a method for constructing the intrusion detection system (IDS). The method is based on the implementation of expert rules, obtained from machine learning tool.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists of a comparative analysis of fifteen IDS datasets: HTTPCSIC2010, ADFA, CAIDA, DEFCON and so on. Also consists in testing and comparison eight machine learning algorithms. The approach to the implementation of the IDS was writing software for creating expert rules.

**Findings:** By using eleven presented criteria, the most correct data set was selected. Also, the most efficient machine learning algorithm was chosen. Implemented system based on machine learning algorithm using the CICIDS, shows effective performance (over 98% of correctly classified instance).

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects to research newer datasets. Also, further refinement of the implemented model is also possible.

**Originality/value:** This study allows us to effectively identify new attacks in real network traffic not represented in signatures (giving invulnerability to zero day attack).

**Key words:** intrusion detection system, data set, machine learning, expert rules, network attacks.

М.А. Коткова, А.Е. Миндров, Е.В. Охлопкова

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СНИЖЕНИЯ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СРЕДСТВ КОММУНИКАЦИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Развитие современных технологий постепенно ведет мир к созданию новой реальности. Но далеко не все технологии настолько продуманы и защищены от внешнего воздействия, в частности, от взломов, хищения, фальсификации различного рода ценной информации. Промышленные предприятия взаимодействуют со своими сотрудниками, партнерами и потребителями через цифровые каналы связи, отправляя и получая информацию. Соответственно они должны быть уверены в том, что эта достоверная информация, иначе доверие к предприятию будет падать, а это приведет к разрушению бизнеса в целом. Необходимо осуществить разработку и исследование методов и алгоритмов снижения угроз информационной безопасности средств коммуникаций с целью выявления более безопасного метода передачи защищенной информации.

**Ключевые слова:** методы снижения угроз, информационная безопасность, цифровые каналы связи, квантовые технологии, виртуальная частная сеть, шифрование данных.

### Введение

В настоящее время большинство методов защиты информации основывается на шифровании данных, соответственно доступ к ним есть только у сотрудника, имеющего код расшифровки. Но злоумышленнику не составит труда перехватит пароль или же вычислить его с помощью сторонних программ. Обеспечение информационной безопасности должно быть направлено прежде всего на предотвращение рисков, а не на ликвидацию их последствий. Именно принятие предупредительных мер по обеспечению конфиденциальности, целостности, а также доступности информации и является наиболее правильным подходом в создании системы информационной безопасности.

Любая утечка информации может привести к серьезным проблемам для предприятия — от значительных финансовых убытков до полной ликвидации. Конечно, проблема утечек появилась давно, но именно с появлением ПК и интернета возникли новые приемы незаконного получения информации. Достаточно уничтожить информацию посредством вирусов, устроив диверсию. Чаще всего «утекают» из предприятия документы финансового характера, технологические и конструкторские разработки, логины и пароли для входа в сеть других организаций. Но серьезный вред может нанести и утечка персональных данных сотрудников.

Безопасность секретной информации на предприятиях – одна из основных проблем многих компаний. Если вдаваться в подробности, то самые частые случаи — это утечка платежной информации и персональных данных — 80%. Хотя количество угроз постоянно растет, появляются все новые и новые вирусы, увеличивается интенсивность и частота DDoS-атак, разработчики средств защиты информации тоже не стоят на месте [4]. На каждую угрозу разрабатывается новое защитное ПО или совершенствуется уже имеющееся.

Целью данной работы является проведение исследования, сравнение и разработка новых методов снижения угроз информационной безопасности средств коммуникаций промышленных предприятий, а также разработка модифицированного и усовершенствованного алгоритма, который выдерживает многие атаки. Кроме того, наглядно демонстрируется работа квантовых технологий в сравнении с классическими методами шифрования, и сравниваются методы снижения риска угроз информационной безопасности для предприятия. Таким образом, модифицированный метод можно будет в дальнейшем использовать при защищенной передаче данных.

### **Сравнение двух методов снижения угроз информационной безопасности**

Для исследования был выбран такой метод снижения угроз как применение классического шифрования по средствам виртуальной частной сети. Концепция виртуальной частной сети, более известная как VPN, появилась как финансовая альтернатива защищенной коммуникации через общественные каналы связи (интернет), и вскоре стала технологией, ориентированной на безопасность, гарантирующей целостность, конфиденциальность и подлинность информации [1]. Благодаря достижениям в области криптографии, вычислительной техники и интернета стало возможным шифровать трафик данных и туннелировать его через интернет на сервер, расположенный в частной сети. Защищенный туннель создает виртуальную связь, которая расширяет частную сеть через общедоступную сеть. VPN может использовать технологии безопасности протокола IP (IPsec), безопасности транспортного уровня (SSL/TLS), безопасности транспортного уровня данных (DTLS), безопасного подключения устройств или сетей через общедоступные сети, чтобы расширять или формировать частную сеть.

VPN обеспечивает средства доступа к защищенной корпоративной сети через небезопасные общедоступные сети. В то время как VPN является улучшенной технологией по сравнению с передачей незашифрованных данных по сетям общего пользования, потенциальные недостатки безопасности должны учитываться пользователями, планирующими развертывание VPN или уже использующими эту технологию. Использование VPN значительно увеличивает безопасность каналов связи распределенных узлов [2].

Также был исследован и другой метод снижения угроз, а именно метод применения квантовой криптографии. Квантовая криптография — метод защиты коммуникаций, основанный на принципах квантовой физики. В отличие от традиционной криптографии, которая использует математические методы, чтобы обеспечить секретность информации, квантовая криптография сосредоточена на физике, рассматривая случаи, когда информация переносится с помощью объектов квантовой механики. Процесс отправки и приёма информации всегда выполняется физическими средствами, например, при помощи электронов в электрическом токе, или фотонов в линиях волоконно-оптической связи. Подслушивание может рассматриваться как изменение определённых параметров физических объектов — в данном случае, переносчиков информации.

Технология квантовой криптографии опирается на принципиальную неопределённость поведения квантовой системы, выраженную в принципе неопределённости Гейзенберга — невозможно одновременно получить координаты и импульс частицы, невозможно измерить один параметр фотона, не исказив другой.

Используя квантовые явления, можно спроектировать и создать такую систему связи, которая всегда может обнаруживать подслушивание. Это обеспечивается тем, что попытка из-

мерения взаимосвязанных параметров в квантовой системе вносит в неё нарушения, разрушая исходные сигналы, а значит, по уровню шума в канале легитимные пользователи могут распознать степень активности перехватчика [3].

Квантовая криптография направлена на защиту информации, передаваемой между отдельными пользователями системы или источниками данных в одной сети. Ее основная цель – защитить ключ шифрования от возможного перехвата. Данная задача выполняется благодаря тому, что нарушитель, пытающийся перехватить квантовый обмен, обязательно оставит явные следы. Благодаря защищенной передаче закрытых ключей квантовая криптография сможет обеспечить долгосрочную защиту информации. Эта технология не требует создания новой инфраструктуры и может работать на уже существующих оптоволоконных линиях, взаимодействуя с используемыми устройствами шифрования. Вместе с тем аппаратные решения пока относительно дороги.

### Результаты проведенных исследований

Для проведения исследований была развернута VPN сеть на двух виртуальных машинах и третья виртуальная машина была задействована для совершения атак. Проводилась реализация передачи данных посредством квантовых технологий. Сведения о произведенных угрозах описаны в таблице.

#### Сравнение исследуемых методов снижения угроз защиты информационной безопасности

Наименование угрозы/процедуры	Классические методы шифрования по средствам VPN	Квантовые методы криптографии
Man-in-the-middle (MITM)	Была проведена атака на VPN, при которой злоумышленник проникает в канал шифрования между отправителем и получателем, создавая два отдельных зашифрованных соединения. Атака осуществляется в момент обмена ключами шифрования: злоумышленник перехватывает их и навязывает обеим сторонам свои ключи. При использовании SSL и сертификатов ему достаточно встроиться в цепочку доверия браузера.	В квантовой криптографии используют сложный ключ, который передается от отправителя к получателю посредством элементарных частиц света - фотонов. Защита ключа от перехвата обеспечивается благодаря тому, что самый чувствительный прибор изменит состояние фотона. Таким образом, злоумышленник испортит передаваемую информацию и будет замечен.
Утечка трафика	Тот трафик, который должен быть передан через VPN-соединение в зашифрованном виде, попадает в сеть в открытом виде. Данный сценарий не является следствием ошибки в VPN-сервере или клиенте. Самый простой вариант — внезапный разрыв VPN-соединения.	Процесс отправки и приёма информации всегда выполняется физическими средствами, например, при помощи электронов в электрическом токе, или фотонов в линиях волоконно-оптической связи. Подслушивание может рассматриваться как изменение определённых параметров физических объектов — в данном случае, переносчиков информации. Поэтому утечка трафика не может произойти незамеченной.

Расшифровка информации	VPN трафик можно легко расшифровать, если для аутентификации используются протокол MSCHAPv2 через PPTP. При использовании MSCHAP, не нужно знать сам пароль, нужен лишь его MD4-хеш, который используется как входные данные для DES-операций. Облачные сервисы взломов ключей достигают производительности до 18 млрд ключей в секунду, таким образом, подбор DES ключа занимает не более 23 часов реального времени.	В данном методе эта атака не сможет быть реализована, по причине того, что в квантовой криптографии для передачи информации используются поляризованные фотоны. Ключ — одинаковая последовательность нулей и единиц. Если злоумышленник захочет перехватить данные, он должен будет измерять поляризацию фотонов. А так как он не знает базиса то, если не угадает правильно, не получит верных данных.
Человеческий фактор	Так как в передаче данных по средствам VPN используется дополнительный узел соединения, то не факт, что необходимое программное обеспечение будет работать исправно. Возможно, что в каких-то своих корыстных целях человек просто совершит подмену файла и тому подобное.	Человеческий фактор присутствует всегда и везде, но в данном методе минимизирует использование стороннее программное обеспечение.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. Использование технологий VPN для обеспечения информационной безопасности (статья) [Электронный ресурс] // А.Ю. Николахин: [сайт]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tehnologii-vpn-dlya-obespecheniya-informatsionnoy-bezopasnosti>
2. **Росляков, А.В.** Виртуальные частные сети. Основы построения и применения / А.В. Росляков. - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2006. - 300 с
3. Квантовая криптография, или как свет формирует ключи шифрования (статья) [Электронный ресурс] // А.В. Корольков: [сайт]. URL: <https://www.osp.ru/school/1999/07/13031903>
4. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах (проект) [Электронный ресурс] // ФСТЭК России: [сайт]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/812>

**М.А. Kotkova, А.Е. Mindrov, Е.V. Okhlopkova**

### **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS FOR REDUCING THE THREAT TO INFORMATION SECURITY OF COMMUNICATION MEANS IN INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva

The development of modern technology is gradually leading the world to create a new reality. But not all technologies are so thought out and protected from external influences, in particular,



from hacking, theft, falsification of various kinds of valuable information. Industrial enterprises interact with their employees, partners and consumers through digital communication channels sending and receiving information. Accordingly, they must be sure that this reliable information, otherwise the credibility of the company will fall, and this will lead to the destruction of the business as a whole. It is necessary to carry out the development and research of methods and algorithms for reducing threats to the information security of communication tools in order to identify a more secure method for transmitting protected information.

**Keywords:** threat reduction methods, information security, digital communication channels, quantum technologies, virtual private network, data encryption.

А. Г. Кругов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ ПОБОЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ  
ОБЪЕКТА ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

Центр информационных технологий, связи и защиты информации  
УМВД России по Тверской области

Рассматривается подход к описанию динамики процесса реализации технического канала утечки информации, возникающего за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации. В основу описания положено представление этого процесса в виде этапов по обеспечению согласования разнородных характеристик структурных элементов такого рода канала с характеристиками сигналов, используемых в качестве материальных носителей перехватываемой информации на каждом этапе, с целью обеспечения требований нарушителя к ее свойствам.

**Ключевые слова:** технический канал утечки информации, побочные электромагнитные излучения, радиоэлектронное устройство, характеристики сигналов, согласование характеристик, объект информатизации.

**Введение**

В соответствии с определением, приведенным в [1], различные объекты информатизации (ОИ) в зависимости от их назначения отличаются по совокупности информационных ресурсов, средств и систем обработки информации, используемых в соответствии с заданной информационной технологией, а также средств их обеспечения, помещений или объектов, в которых эти средства и системы установлены. Для современных ОИ характерно использование различного рода сигналов в качестве материальных носителей информации (далее информационных сигналов). Как показано в [2], характеристиками сигналов определяются свойства информации, характеризующие ее ценность для легитимных пользователей ОИ. Применение радиоэлектронных устройств (РЭУ) в составе технических средств (ТС) ОИ для обработки и передачи этих сигналов обуславливает возникновение сигналов побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) (далее информативных (опасных) сигналов) этих РЭУ, которые могут быть использованы нарушителем для реализации технического канала утечки информации (ТКУИ). Следует отметить различие целей и условий реализации процессов обработки и передачи информации на ОИ и процессов ее перехвата нарушителем. Выбор РЭУ в составе ТС ОИ осуществляется при проектировании и разработке объекта (предварительно) в интересах обеспечения свойств информации, характеризующих ее ценность для легитимных пользователей. Реализация ТКУИ, возникающих за счет ПЭМИ, осуществляется в интересах обеспечения свойств перехватываемой информации, характеризующих ее ценность для нарушителя, в динамике его реализации в реальном масштабе времени.

В соответствии с существующим методическим подходом описание ТКУИ составляют датчик информативного сигнала (ДИС), как объект разведки, техническое средство развед-

ки (ТСР) и среда распространения информативного сигнала. Применительно к ТКУИ, возникающим за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, в качестве ДИС рассматриваются различные РЭУ в составе ТС ОИ, средой распространения сигналов ПЭМИ этих РЭУ является воздух, а нарушитель применяет для перехвата этих ПЭМИ разведывательные радиоприемники (РРП). Структурные элементы ТКУИ разнородны и имеют различные характеристики, а сигналы при распространении в среде ослабляются по мощности (напряженности электрического (магнитного) поля). В этих условиях нарушитель для обеспечения свойств перехватываемой информации, удовлетворяющих его требованиям, может применять для реализации ТКУИ различные РРП.

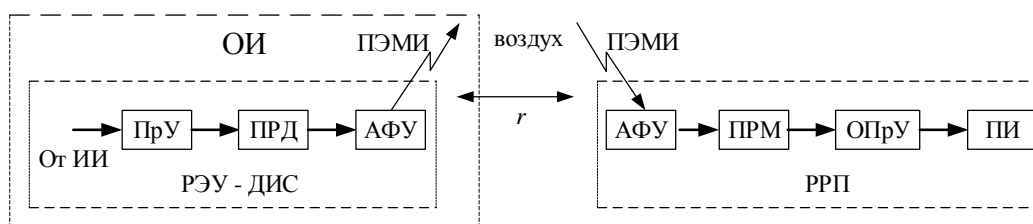
В данной работе исследуются условия, характеризующие динамику реализации нарушителем ТКУИ рассматриваемого типа, в интересах обоснования выбора эффективных мер защиты информации от утечки.

### **Вербальная модель технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств технических средств объекта информатизации**

На ОИ в процессе обработки и передачи информации от источника (ИИ) к получателю (ПИ) осуществляются ее преобразования с использованием соответствующих устройств: на передаче по пути – информация → сообщение → сигнал; на приеме по пути – сигнал → сообщение → информация [3]. При этом каждое преобразование осуществляется с использованием различных преобразующих устройств (ПрУ) и обратных ПрУ (ОПрУ), соответственно. Как показано в [4] для передачи информации в этих условиях формируется некоторая траектория преобразований, состоящая из различных РЭУ. Выбор такой траектории осуществляется с учетом обеспечения свойств информации, характеризующих ее ценность для легитимных пользователей, удовлетворяющую их требованиям.

Поскольку РЭУ в составе каждого элемента траектории может выступать в качестве ДИС ПЭМИ, то нарушитель имеет возможность реализации множества ТКУИ. При этом с целью обеспечения свойств перехватываемой информации, удовлетворяющих его требованиям, по аналогии с [4] осуществляется выбор соответствующей траектории реализации.

По аналогии с [5] представим состав такой траектории в виде на рис. 1.



**Рисунок 1. Структура траектории реализации технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации**

Необходимым условием возможности реализации ТКУИ рассматриваемого типа является наличие в составе ДИС элементов, чувствительных к информационным сигналам перехватываемой информации в соответствующей форме представления (речевой, документальной, телекоммуникационной). Эти элементы используются для модуляции сигналов ПЭМИ информационным сигналом, поступающим от ИИ [6]. Кроме того, в составе такого ДИ должны быть

элементы передатчика (ПРД), обеспечивающие формирование и усиление возникающих при этом ПЭМИ, а также проводники, выполняющие роль антенно-фидерных устройств (АФУ). В свою очередь, нарушитель должен использовать для приема этих ПЭМИ соответствующий РРП, включающий АФУ, приемник (ПРМ), ОПРУ и устройство отображения перехватываемой информации (ПИ). Соответствие заключается в обеспечении согласования электрических характеристик РРП с соответствующими электрическими характеристиками ПЭМИ [5]. В качестве электрических характеристик РРП рассматриваются  $\mu_{РРП}$  чувствительность к принимаемым сигналам ПЭМИ, полоса пропускания  $\Delta F_{РРП}$  и время обеспечения приема  $\Delta \tau_{РРП}$ . Основными характеристиками сигнала ПЭМИ являются отношение сигнал / шум  $A^{ПЭМИ} / P_{ш}$ , ширина спектра частот  $\Delta f^{ПЭМИ}$  и время, в течение которого сигнал ПЭМИ может использоваться в качестве материального носителя перехватываемой информации  $\Delta \tau^{ПЭМИ}$ . Условия согласования определяются в соответствии с [5]:

$$A^{ПЭМИ} / P_{ш} \geq \mu_{РРП}, \quad (1)$$

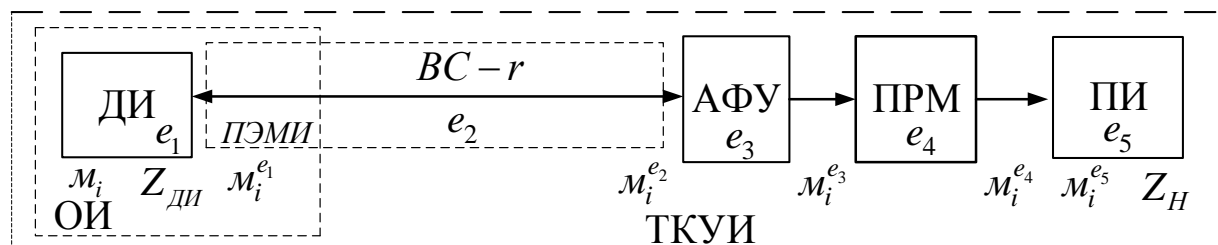
$$\Delta F_{РРП} \geq \Delta f^{ПЭМИ}, \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{РРП} \geq \Delta \tau^{ПЭМИ}. \quad (3)$$

Таким образом, ТКУИ рассматриваемого типа, включающий ДИС ПЭМИ, РРП и воздух атмосферы в качестве среды распространения этих излучений, может быть представлен в виде радиотехнической системы передачи информации с присущими для систем такого рода характеристиками [7]. Его функционирование основано на функциональной связи информационных параметров ДИС с одним или несколькими электрическими параметрами радиосигналов.

Для реализации ТКУИ, возникающих за счет ПЭМИ, нарушителю необходимо учитывать сведения об обрабатываемой на ОИ информации, о структуре и закономерностях функционирования ТС объекта, об используемых схемных и технологических решениях, о методах, способах и мерах защиты информации. С учетом этих сведений осуществляется выбор места расположения, тип и режимы работы РРП в целях обеспечения требований к свойствам перехватываемой информации.

С учетом указанных обстоятельств структуру ТКУИ, приведенную на рис. 1, представим в виде траектории преобразований на этапах  $e_i, i = 1, 2, \dots, 5$  (рис. 2).



**Рисунок 2. Этапы реализации технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации**

Поскольку нарушитель, реализующий ТКУИ, не имеет возможности изменить структуру ОИ, использование РЭУ ОИ в качестве ДИС представлено одним этапом  $e_1$ .

На рис. 3 ДИС массива  $m_i$  является одно из РЭУ ОИ. В результате прохождения информации массива  $m_i$  через ДИС (этап преобразований  $e_1$ ), на его выходе возникает сигнал ПЭМИ (массива  $m_i^{e_1}$ ), модулированный информационным сигналом и имеющий характеристики  $A_{m_i}^{e_1}$  и  $\Delta f_{m_i}^{e_1}$ . При распространении через воздушную среду  $BC$  протяженностью  $r$  (этап  $e_2$ ) сигнал ПЭМИ претерпевает изменения в соответствии с условиями распространения, в результате чего на вход АФУ РРП поступает сигнал ПЭМИ массива  $m_i^{e_2}$  с характеристиками  $A_{m_i}^{e_2}$  и  $\Delta f_{m_i}^{e_2}$ , отличающимися от характеристик сигнала массива  $m_i^{e_1}$  за счет ослаблений по мощности (или напряжённости электрического (магнитного) поля) и частотных искажений, связанных с условиями распространения сигнала в воздушной среде. Указанные ослабления и искажения обусловлены ограничениями на действия нарушителя по обнаружению сигнала ПЭМИ, выбору направления максимального уровня этих излучений и места расположения РРП с учетом обеспечения выполнения условия (1). АФУ выделено отдельным этапом реализации ТКУИ (этап  $e_3$ ) в связи с возможностью применения нарушителем антенн с различными коэффициентами усиления в соответствии с [8], чувствительностью  $\mu_{АФУ}$  и полосой пропускания  $\Delta F_{АФУ}$ . В АФУ сигнал ПЭМИ преобразуется в колебания электрического тока, модулированные информативным сигналом массива  $m_i^{e_3}$  с характеристиками  $A_{m_i}^{e_3}$  и  $\Delta f_{m_i}^{e_3}$  и поступающие на вход приемного устройства ПРМ (этап  $e_4$ ), с характеристиками чувствительности  $\mu_{ПРМ}$  и полосы пропускания  $\Delta F_{ПРМ}$ . После некоторых преобразований в ПРМ сигналы в виде колебаний электрического тока массива  $m_i^{e_4}$  с характеристиками  $A_{m_i}^{e_4}$  и  $\Delta f_{m_i}^{e_4}$  поступают на устройство отображения перехваченной информации (этап  $e_5$ ) с характеристиками  $A_{m_i}^{e_5}$  и  $\Delta f_{m_i}^{e_5}$ , определяющими свойства информации, характеризующие ее ценность  $Z_H$  для нарушителя (ПИ).

Очевидно, что ограничения возможностей нарушителя по реализации ТКУИ рассматриваемого типа обусловлены наличием в траектории его реализации воздушной среды распространения сигнала ПЭМИ, частично расположенной в пределах ОИ.

Характеристики ПЭМИ меняются в зависимости от расстояния до ДИС [7, 8].

До настоящего времени проведено большое количество исследований по распространению электромагнитных колебаний в воздушной среде распространения в различных условиях.

В общем случае среда распространения характеризуется коэффициентом ослабления.

Для ТКУИ, структура которого приведена на рис. 1 и 2, выражение (3) запишем в виде:

$$P_2 = P_1 \cdot K_o(r), \quad (4)$$

где  $K_o(r) = (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda^2) / (4\pi r^2)$  – коэффициент ослабления сигнала ПЭМИ по мощности на пути распространения от ДИС до антенны РРП;

$P_1$  и  $P_2$  – мощности радиосигнала на выходе ПРД и на входе ПРМ, соответственно;

$\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты полезного действия фидеров передающей и приемной антенн, соответственно;

$G_1 = D_1 \cdot \eta_{A1}$  и  $G_2 = D_2 \cdot \eta_{A2}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, соответственно;

$D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты направленного действия антенн;

$\eta_{A1}$  и  $\eta_{A2}$  – коэффициенты полезного действия антенн;

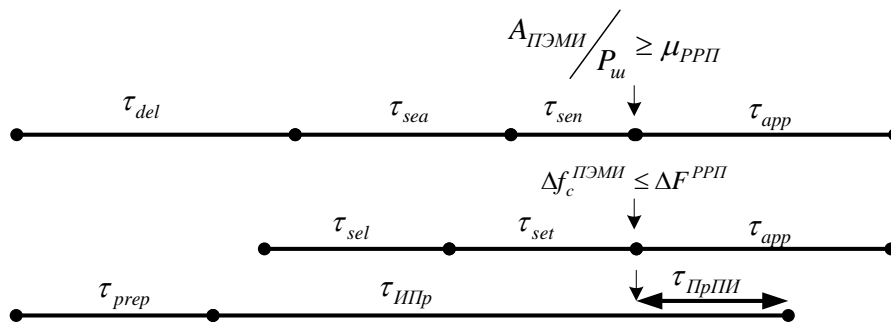
$\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения;

$r$  – расстояние между передающей и приемной антеннами.

В соответствии с используемым в настоящее время измерительно-расчетным подходом для расчёта величины  $K_o(r)$  используется приближённая «трёхзонная» формула [9]. В [9] приведены точные формулы для коэффициента ослабления ПЭМИ  $K_o(r)$ .

С учетом реализации ТКУИ на этапах ( $e_2 - e_5$ ) будем считать, что ТКУИ существует (выполняется условие (3)) в течение времени, когда выполняются условия (1) и (2).

В интересах иллюстрации динамики реализации процессов передачи информации (ИПр) на объекте информатизации и перехвата (ПрПИ) на рис. 3 представлены временные диаграммы их реализации.



**Рисунок 3. Временные диаграммы реализации технического канала утечки информации и процесса передачи информации на объекте информатизации**

Время, в течение которого выполняется условие (1), может быть представлено как сумма времен, связанных с обнаружением нарушителем сигнала ПЭМИ  $\tau_{del}$ , поиском направления максимального уровня ПЭМИ  $\tau_{sea}$  и места размещения РРП в соответствии с его чувствительностью  $\tau_{sen}$ . Время, в течение которого выполняется условие (2), может быть представлено как сумма времен, связанных с выбором нарушителем РРП, имеющего полосу пропускания, соответствующую условию (2)  $\tau_{sel}$  и настройки этого приемника с целью извлечения и отображения перехваченной информации  $\tau_{set}$ . Непосредственное применение РРП  $\tau_{app}$  начинается с момента, когда выполняются оба условия (1) и (2).

Время реализации ИПр процесса передачи информации включает  $\tau_{prep}$  – время подготовки ТС передачи информации на ОИ к работе и  $\tau_{IIPr}$  – время непосредственной реализации информационного процесса по передаче этой информации.

Динамика обеспечения основных свойств перехватываемой информации, характеризующих ее ценность для нарушителя, состоит в следующем.

Начальные моменты временных отрезков  $\tau_{del}$  и  $\tau_{prep}$  и  $\tau_{sel}$  могут не совпадать.

Нарушитель может обнаружить ПЭМИ после включения ТС ОИ в режим настройки и проверки функционирования, предшествующий режиму непосредственной реализации информационного процесса  $ИП_r$ .

Начальные моменты процедур обнаружения ПЭМИ, выбора РРП и определения места его применения также могут не совпадать по времени. Однако процесс  $ПрПИ$  начинается с момента окончания процедур  $\tau_{sen}$  и  $\tau_{set}$ .

Цель перехвата информации считается достигнутой при выполнении условия:

$$\tau_{ПрПИ} = \tau_{ПрПИ}^{mp}, \quad (5)$$

где  $\tau_{ПрПИ}^{mp} = k_{ПИ} \cdot \tau_{ИП_r}$ ,  $k_{ПИ}$  – коэффициент, определяющий часть перехваченной нарушителем информации, удовлетворяющую требованиям нарушителя.

Таким образом, можно считать, что процедуры, составляющие представленные на рис. 3 процессы, независимы, могут выполняться как последовательно, так и параллельно, а времена выполнения этих процедур случайны.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость разработки математических моделей для оценки защищенности информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ в рассматриваемых условиях. Такого типа модели до настоящего времени не разрабатывались. Однако рассмотренная в данной работе вербальная модель ТКУИ может использоваться в качестве основы для их разработки.

Так характеристики ПЭМИ РЭУ ОИ при их использовании в качестве ДИС в структуре ТКУИ определяются экспертным путем.

Выполнение условий (1) и (2) обеспечивается на этапах  $e_2$  и  $e_3$ , а выполнение условия (5) – на этапе  $e_4$ . Обеспечение требований нарушителя к свойствам перехватываемой информации проверяется на этапе  $e_5$ .

## Заключение

Рассмотренный в работе подход к исследованию динамики процесса реализации технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации может использоваться для описания ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ различных объектов информатизации. На основе разработанных описательных моделей с использованием аппарата сетей Петри-Маркова могут разрабатываться аналитические модели динамики реализации ТКУИ, учитывающие вероятностно-временные характеристики действий нарушителей на различных этапах их реализации, позволяющие получить аналитические соотношения для расчета показателей для оценки защищенности информации от утечки как без применения, так и в условиях применения мер защиты [10].

## Библиографический список

1. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. [Электронный ресурс] / утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. N 374-ст – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51275-2006>.

2. **Авсентьев, О.С.** Формирование обобщенного показателя ценности информации в каналах связи / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – №2. – С. 55-63.
3. **Васильев, К.К.** Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. -Ульяновск: УлГТУ, 2008. - 452 с.
4. **Авсентьев О.С.** Модель оптимизации процесса передачи информации по каналам связи в условиях угроз ее безопасности / О.С. Авсентьев, В.В. Меньших, А.О. Авсентьев // Телекоммуникации. – 2016. - №1. С. 28 – 32.
5. **Авсентьев О.С.** Математическая модель защиты информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.Г. Вальде, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2016. – №3. – С. 42 – 50.
6. **Меньшаков, Ю. К.** Теоретические основы технических разведок : учеб. пособие / под ред. Ю. Н. Лаврухина. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 536 с.
7. **Никольский, Б. А.** Основы радиотехнических систем [Электронный ресурс] : [электрон. учебник] / Б. А. Никольский; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,612 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
8. **Кубанов, В.П.** Влияние окружающей среды на распространение радиоволн / В.П. Кубанов. — Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с., ил.
9. **Авдеев, В.Б.** Расчёт коэффициента ослабления побочных электромагнитных излучений / В.Б. Авдеев, А.Н. Катруша // Специальная техника. – 2013. – № 2. – С. 18–27.
10. **Язов, Ю.К.** Основы методологии количественной оценки эффективности защиты информации в компьютерных системах [Текст] / Ю.К. Язов. – Ростов-на-Дону : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 274 с.

**A.G. Krugov**

**RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE PROCESS OF IMPLEMENTATION  
OF THE TECHNICAL CHANNEL OF INFORMATION LEAKAGE DUE TO SIDE  
ELECTROMAGNETIC RADIATION OF RADIO ELECTRONIC DEVICES  
OF THE OBJECT OF INFORMATIZATION**

Center for information technology, communications and information security  
Ministry of internal Affairs of Russia in the Tver region

**Purpose:** The article describes the description of the implementation process of the technical channel of information leakage arising due to spurious electromagnetic radiation of electronic devices of an object of informatization, in terms of the dynamics of its implementation.

**Design/methodology/approach:** A verbal model based on the provisions of the general communication theory is proposed, in which the process of the type under consideration is presented in the form of steps to ensure the harmonization of the heterogeneous characteristics of the structural elements of the studied channel with the characteristics of the signals used as material carriers of intercepted information at each stage, in order to meet the requirements of the violator to its properties.

**Findings:** The proposed approach can be used in practice in preparing the source data for the numerical solution of the problem of assessing the security of information from leakage through technical channels at the computerization facility.



**Research limitations/implications:** The proposed verbal model can be used as the basis for the development of an analytical model using the apparatus of Petri-Markov networks in the interest of numerically assessing the security of information from leakage due to spurious electromagnetic radiation.

**Originality/value:** Moreover, this model is useful in substantiating effective measures to protect information of an informatization object from leakage through technical channels of the type in question.

**Key words:** technical channel of information leakage, secondary electromagnetic radiation, electronic device, signal characteristics, coordination of characteristics, object of informatization.

Н.Г. Лабутин, П.В. Костин

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИН НАПРАВЛЕНИЯ «ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

Приволжский институт повышения квалификации ФНС России,  
г. Нижний Новгород

Современные технологии виртуализации в компьютерной технике позволяют оптимизировать использование средств вычислительной техники, программного обеспечения для изучения практической части дисциплин направления «Информационная безопасность». В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности и качества обучения слушателей по получению практических навыков работы с программными средствами защиты информации на практических занятиях по программам «Информационная безопасность» за счёт применения среды виртуализации.

**Ключевые слова:** среда виртуализации, практические занятия по информационной безопасности, виртуальная машина, использование технологий виртуализации в обучении, Microsoft Hyper-V.

### Введение

При изучении дисциплин направления «Информационная безопасность» обучающимся (слушателям) необходимо получить практические навыки использования программных и программно-технических средств защиты информации. С этой целью в рамках указанных дисциплин проводятся практические занятия и лабораторные работы, на которых слушатели должны научиться устанавливать, настраивать и использовать по функциональному назначению защитные средства, являющиеся специфическими программными средствами. Как правило, средства защиты информации работают по модели «клиент-сервер», требуют максимальных разрешений на доступ к объектам и полномочий пользователя в системе.

Этим объясняется сложность в использовании средств вычислительной техники при проведении таких занятий. Каждому обучающемуся требуется несколько компьютеров для установки и использования «клиент-серверных» приложений. Каждому обучающемуся необходимо назначать максимальные разрешения на доступ к объектам и полномочия на выполнение действий в системе, что, как правило, противоречит политике безопасности информации в организации и приводит к негативным последствиям в работе компьютерной системы образовательной организации, связанным с нарушением правильной работы информационных систем и проявлениями инцидентов информационной безопасности.

Одним из вариантов преодоления этих сложностей может быть закупка и использование дорогостоящих стендов и специальных аппаратных комплексов, имитирующих работу реальной информационной системы или сети.

Другой вариант – применение виртуальных машин в среде виртуализации. Именно по этому пути было решено пойти в Приволжском институте повышения квалификации ФНС России. Далее рассмотрены основные аспекты и положительный опыт от применения виртуальных машин в составе среды виртуализации нашего института для обучения слушателей по дисциплинам направления «Информационная безопасность».

## Применение технологий виртуализации и виртуальных машин на практических занятиях по информационной безопасности

Виртуализация — предоставление набора вычислительных ресурсов или их логического объединения, абстрагированное от аппаратной реализации, и обеспечивающее при этом логическую изоляцию друг от друга вычислительных процессов, выполняемых на одном физическом ресурсе [1].

Понятие виртуализации неразрывно связано с понятиями «среда виртуализации» и «виртуальная машина». Логическая схема виртуализации на уровне отдельного компьютера представлена на рис. 1.



Рисунок 1. Схема виртуализации на уровне локального компьютера

На рис.1 сокращение «ОС» обозначает «операционная система».

Основой использования виртуальных машин на реальном компьютере является гипервизор (см. рис. 1). Это программное обеспечение, которое позволяет на одной физической машине одновременно работать нескольким операционным системам и напрямую взаимодействовать им с физической аппаратной частью компьютера. При этом все виртуальные машины, каждая со своей операционной системой, работают независимо от других.

Таким образом, под виртуальной машиной будем понимать программное обеспечение, предназначенное для эмуляции аппаратного оборудования компьютера, а также установленную на него операционную систему и прикладные программы.

Под средой виртуализации будем понимать программное обеспечение, предназначенное для имитации отдельных компьютеров и компьютерных сетей с независимой аппаратной конфигурацией и индивидуальным для каждого компьютера системным и прикладным программным обеспечением, а также, для управления виртуальными машинами.

Основные преимущества использования среды виртуализации с виртуальными машинами для обучения слушателей работе со специальным программным обеспечением для защиты информации:

- экономия аппаратных и энергоресурсов;

- виртуальные машины можно хранить в виде файлов на сервере, их количество ограничивается ёмкостью памяти сервера;
- работой виртуальных машин на реальных компьютерах можно управлять удалённо по компьютерной сети;
- на одном компьютере можно запускать несколько виртуальных машин, их количество ограничено ресурсами компьютера и сети;
- виртуальные машины можно объединять в компьютерные сети, работающие «поверх» физических сетей, за счёт чего каждый обучающийся имеет возможность экспериментировать с сетевыми устройствами и сегментами сети на своём рабочем месте.

Созданная в Приволжском институте повышения квалификации ФНС России среда виртуализации предназначена, прежде всего, для проведения практических и лабораторных занятий, позволяющих получить слушателям практические навыки работы с программными средствами защиты информации по направлению «Информационная безопасность». Она основана на технологии «частного облака». В среде виртуализации применены наиболее перспективные технологии виртуализации – Microsoft Hyper V [2] (рис. 2).

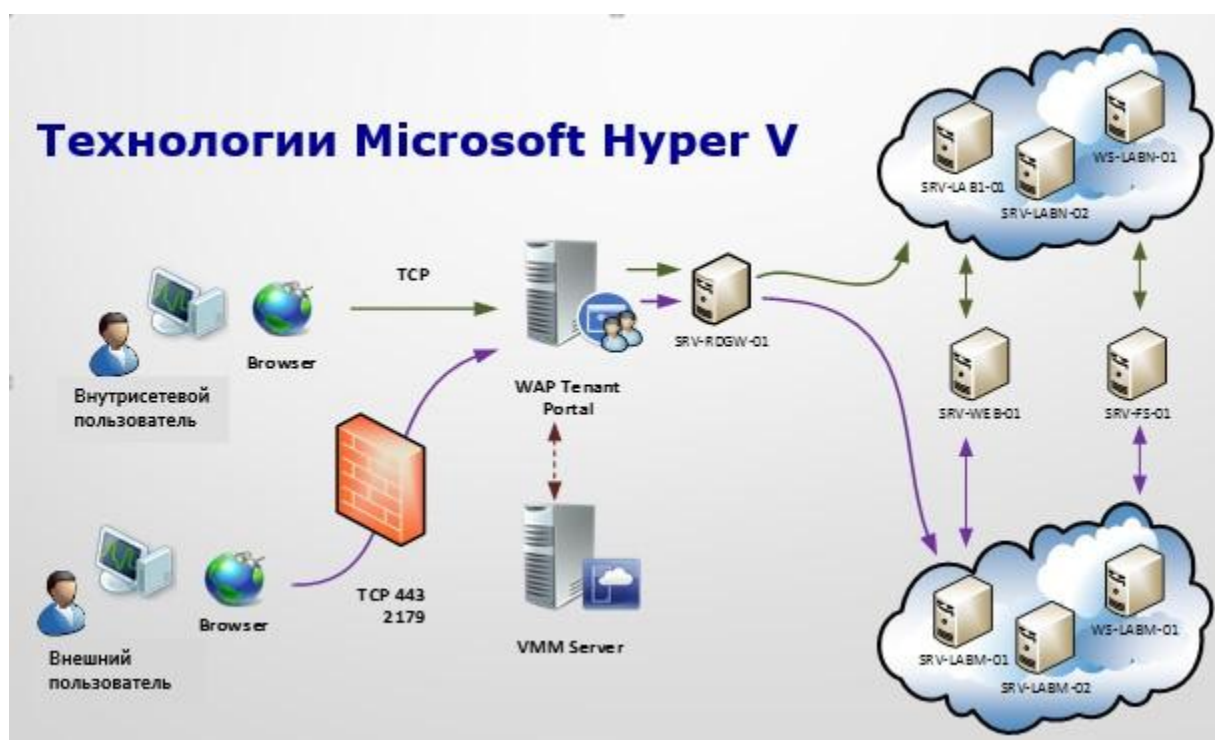


Рисунок 2. Схема применения технологии Microsoft Hyper V

### Положительный опыт использования среды виртуализации

В результате использования среды виртуализации в нашем институте накопился некоторый опыт, который представлен далее.

Всего в среде виртуализации института создано:

- 65 виртуальных машин типа «рабочая станция» на основе операционной системы Windows 7;
- 65 виртуальных машин типа «сервер-шлюз» на Windows Server 2012 R2.
- 65 виртуальных машин типа «сервер-удостоверяющий центр» на Windows Server 2008 R2.

У всех виртуальных машин имеются виртуальные сетевые подключения, адреса которых пользователи имеют возможность изменять. В виртуальных машинах типа «сервер-шлюз» настроено два сетевых подключения, что позволяет устанавливать и настраивать на них межсетевые экраны, преобразователи сетевых адресов (NAT) и другие средства межсетевых взаимодействий [3].

Каждый пользователь среды виртуализации на своём компьютере может одновременно работать с несколькими виртуальными машинами разных типов, что даёт возможность экспериментировать с различными программными средствами, работающими по системе «клиент-сервер». Например, средство управления комплексными решениями Kaspersky Security Center, средство комплексной защиты от несанкционированного доступа «Блок-хост-сеть» и т.д.

Как и в других виртуальных машинах, в Microsoft Hyper V предусмотрены контрольные точки (точки восстановления в исходное состояние). Контрольные точки могут быть использованы не только для приведения виртуальной машины к изначальному состоянию, но и для сохранения какого-либо состояния виртуальной машины для каждого обучающегося на дальнейших занятиях по данной теме. Использование контрольных точек позволяет слушателям не беспокоиться за свои неправильные действия, которые могут привести к неисправности систем и виртуальных машин. На самом деле, если виртуальная машина «зависла» или неправильно работает, то её всегда можно вернуть в исходное состояние.

В результате использования виртуальных машин слушатели получили возможность исследования фактически всех функций средств защиты информации от несанкционированного доступа в информационные системы и средств криптографической защиты. Естественно, это положительно повлияло на качество обучения по дисциплинам направления «информационная безопасность» и получение навыков практического использования средств защиты информации.

По результатам опроса слушателей Института, закончивших обучение по программам дополнительного профессионального образования по направлению «Информационная безопасность», использование среды виртуализации и виртуальных машин позволило им лучше усвоить практический материал занятий по темам, изучающим программные средства защиты информации.

В 2016 году с применением виртуальных машин в Институте проводилось 8 тем дисциплин направления «Информационная безопасность», в 2019 году – 14 тем. В 2016 году и в 2019 году было опрошено по 150 слушателей, то есть, выборки были одинаковыми. На вопрос «Насколько способствовало использование среды виртуализации на занятиях качественному получению навыков работы с программными средствами защиты информации?» ответили «максимально»: в 2016 году – 102 слушателя (68% от общего числа опрошенных), а в 2019 году – 144 слушателя (96%).

### **Заключение**

Таким образом, практическая ценность применения среды виртуализации («частного облака») для проведения практических занятий и лабораторных работ по направлению «информационная безопасность» неоспорима и заключается в следующем:

1. Слушатели могут экспериментировать с установкой, настройкой и использованием специального программного обеспечения, не опасаясь за возможность нарушения работы не только отдельных компьютеров, но и всей локальной сети Института.

2. Слушатели имеют возможность работы со специальным ПО, которое нельзя использовать на обычных компьютерах в локальной сети организации.
3. Одновременно можно работать с несколькими виртуальными машинами на одном рабочем месте, что очень удобно для проверки функционала и возможностей программных средств защиты информации в автоматизированной системе.
4. Нет необходимости закупать и настраивать специальные дорогостоящие «стендовые» компьютерные комплексы для возможности использования специального защитного программного обеспечения.
5. В целом, повышается качество и эффективность получения слушателями практических навыков техники защиты информации.

### Библиографический список

1. **Ермакова, Т.И.** Проведение занятий с применением интерактивных форм и методов обучения: учеб. пособие / Т.И. Ермакова, Е.Г. Ивашкин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 158 с.
2. Обзор Hyper-V. Интернет-публикация. – URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/hh831531\(v=ws.11\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/hh831531(v=ws.11).aspx).
3. **Лабутин, Н.Г.** Инновационные методики проведения занятий в компьютерных классах учреждений дополнительного профессионального образования // Научный форум: Инновационная наука: сб. ст. по материалам I междунар. науч.-практ. конф. — № 1(1). — М., Изд. «МЦНО», 2016. — С. 29-32.

**N. G. Labutin, P.V. Kostin**

### USE OF VIRTUAL MACHINES TO STUDY "INFORMATION SECURITY" DISCIPLINES

Volga Institute of Advanced Training of the Federal Tax Service of Russia,  
Nizhny Novgorod, Russia

**Purpose:** Consider the positive experience of using virtualization technologies for practical exercises on the direction of information security.

**Design/methodology/approach:** methods are used to analyze student learning results and their questionnaires

**Findings:** Analysis of the benefits of using virtual machines for hands-on training concluded that they are effective in training students in the field of information security

**Research limitations/implementations:** no limitations and consequences of the study

**Originality/value:** The article discusses the positive experience of application of innovative technologies of information systems operation virtualization.

**Keywords:** the virtualization environment, a practical training on information security, quality of a practical training, use of technologies of virtualization in training, Microsoft Hyper-V.

О.В. Липилин, М.С. Коростелев, Я.Д. Рубцов

## ЗАЩИТА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СРЕДСТВА КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ АТАК ПО ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ

Пензенский государственный университет,  
г. Пенза

Атака по времени выполнения является актуальной для программной реализации средства криптографической защиты информации. Успешная реализация атаки позволяет нарушителю информационной безопасности получить информацию, сокращающую количество вычислительных затрат при проведении атак другого типа. В некоторых случаях атака по времени выполнения позволит вычислить секретный ключ. В статье рассматривается подверженность криптографических операций атаке по времени выполнения, реализация защитных мер и результаты исследования, демонстрирующие эффективность принятых защитных мер.

**Ключевые слова:** угроза, атака по времени выполнения, побочный канал, программное средство криптографической защиты информации.

### Введение

Практическая стойкость криптографических преобразований, применяемых для обеспечения безопасности информации, не позволяет за допустимое время проводить эффективные математические атаки на них. В настоящее время более эффективными способами реализации атак на криптографические схемы являются атаки на средства криптографической защиты. Такие атаки используют уязвимости программных, программно-аппаратных и аппаратных средств криптографической защиты информации. Реализация угроз информационной безопасности в этом случае не связана с криптографической стойкостью реализованного преобразования, а с особенностями аппаратно-программных ресурсов, на которых реализовано преобразование.

Одним из самых распространенных способов реализации криптографических преобразований является программная реализация. Достоинствами такой реализации являются:

- простота разработки, за счет чего достигается низкая стоимость разработанного программного средства криптографической защиты информации по сравнению с другими способами реализации;
- простота ввода в эксплуатацию, для чего требуется лишь запустить необходимые установочные файлы;
- простота встраивания программного средства криптографической защиты в существующие информационные процессы;
- низкая стоимость эксплуатации и технического обслуживания программного средства криптографической защиты информации, не требующие наличия специализированного оборудования и специальных навыков у персонала;
- простота вывода программного средства криптографической защиты из эксплуатации.

При всех достоинствах разработки и эксплуатации программного средства криптографической защиты информации, у такого способа имеется ряд существенных недостатков, среди которых можно выделить следующие:

- сложность обеспечения защиты программного средства криптографической защиты информации и его среды функционирования от несанкционированного доступа злоумышленника;
- доступность программного кода средства криптографической защиты информации для анализа злоумышленником, что позволяет ему обнаружить уязвимости программного кода, позволяющие реализовать угрозы безопасности информации.

Несмотря на все недостатки, именно программная реализация средства криптографической защиты информации является наиболее распространенным на сегодняшний момент способом обеспечения безопасности информации как в крупных организациях, так и частными лицами.

Программная реализация средства криптографической защиты информации подвержена следующим угрозам:

- угрозы, связанные с несанкционированным доступом к программному средству криптографической защиты информации;
- угрозы, связанные с исследованием исполняемого кода средства криптографической защиты информации;
- угрозы, связанные с использованием анализа информации, сопутствующей функционированию средства криптографической защиты информации, получаемой по побочным каналам.

Программная реализация средства криптографической защиты информации наиболее подвержена разновидности последнего вида атак, называемой атакой по времени выполнения [1]. Целью статьи является рассмотрение вопроса защиты информации от угроз, реализуемых с использованием атаки по времени выполнения.

### **Причины появления атаки по времени выполнения**

Атака по времени выполнения является разновидностью атаки по побочным каналам, и реализуется на основе информации, получаемой злоумышленником при наблюдении за выполнением криптографических преобразований в техническом устройстве и измерении изменения каких-либо характеристик. В данном случае такой характеристикой является время выполнения отдельных операций, являющихся составной частью реализуемого криптографического алгоритма.

Атака по времени выполнения основана на том, что на различных аппаратных платформах для выполнения различных операций требуется различное количество тактов процессора. Результатом является различное время выполнения операций. Замеряя время выполнения каждой операции, злоумышленник может определить последовательность выполнения операций, текущий шаг алгоритма криптографического преобразования, выполняемые операции и, наконец, получить информацию о размерности операндов, либо определить значения операндов. Если в исследуемой операции используется ключ или его часть, то успешная реализация атаки может привести к вычислению части ключа, либо к полной его компрометации.

В криптографических преобразованиях используются операции различного типа, как арифметические, так и битовые примитивы. Возможность успешной реализации атаки по времени выполнения зависит от зависимости времени выполнения используемых операций от значений операндов, либо зависимости времени выполнения преобразования от набора используемых операций.

В зависимости от различия времени выполнения операций от значений операндов операции подразделяются на следующие виды:



- не подверженные атакам по времени выполнения – такие операции всегда выполняются за одинаковое количество тактов процессора, независимо от значений операндов. К таким относятся операции табличной замены (чтения значения по адресу), сдвиги на фиксированное количество разрядов и логические побитовые операции;
- ограниченно подверженные атакам по времени выполнения – такие операции при определенных условиях могут выполняться разное время в зависимости от значения операндов. К ним относятся операции сложения и вычитания;
- подверженные атакам по времени выполнения – такие операции, время выполнения которых всегда зависит от значений операндов. К таким операциям относятся операции умножения, деления, возведения в степень и сдвиги на разное количество бит.

Среди операций, подверженных атакам по времени выполнения особо выделяются операции сложения над группой точек эллиптической кривой. Особенностью выполнения операции сложения является различный способ выполнения операции в случае разных и одинаковых точек – в первом случае выполняется сложение точек, во втором случае – удвоение точки. Успешность проведения атаки по времени выполнения определяется тем, что время выполнения операции сложения отличается от удвоения точек.

Сложение точек описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} x_3 \equiv \lambda^2 - x_1 - x_2 \pmod{p} \\ y_3 \equiv \lambda(x_1 - x_3) - y_1 \pmod{p} \end{cases}$$

где  $p$  – характеристика поля;  $x_1, y_1$  – координаты первой точки (первого слагаемого);  $x_2, y_2$  – координаты второй точки (второго слагаемого);  $x_3, y_3$  – координаты результата сложения первой второй точек (сумма);  $\lambda$  - коэффициент, вычисляемый следующим образом:

$$\lambda \equiv \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \pmod{p}.$$

Удвоение точек описывается следующим образом:

$$\begin{cases} x_3 \equiv \lambda^2 - 2x_1 \pmod{p} \\ y_3 \equiv \lambda(x_1 - x_3) - y_1 \pmod{p} \end{cases}$$

где  $x_1, y_1$  – координаты удваиваемой точки.

Как видно из выражения, сама формула не отличается от сложения, различие заключается в выражении, описывающем вычисление коэффициента  $\lambda$ :

$$\lambda \equiv \frac{3x_1^2 - a}{2y_1} \pmod{p},$$

где  $a$  – коэффициент эллиптической кривой.

Поскольку разрядность всех чисел, используемых в операциях, значительно превышает разрядность регистров процессора, используемого для вычисления, то операции сложения и удвоения точки значительно отличаются по времени выполнения. Так при удвоении точки из-за возведения координаты  $x_1$  во вторую степень, время вычисления коэффициента  $\lambda$  превышает время вычисления при выполнении сложения.

На основе эллиптических кривых построен стандарт вычисления электронной подписи ГОСТ 34.10-2012. Процедура генерации ключей описывается следующим образом:

- ключом подписи (секретным) является случайное число  $d$ ;
- ключом проверки электронной подписи является точка  $Q(x_q, y_q) = dP$ , где  $P$  – точка эллиптической кривой, являющаяся параметром схемы электронной подписи.

Рассмотрим каким образом различие во времени выполнения удвоения и сложения точек может привести к успешной реализации атаки по времени выполнения.

Ключ подписи  $d$  является целым числом. Вычисление ключа проверки подписи заключается в умножении целого числа на точку. Умножение можно представить как последовательное сложение точки:

$$dP = \underbrace{P + P + P + \dots + P}_d.$$

Однако для сокращения вычислительных затрат используется бинарный алгоритм умножения, заключающийся в представлении целого числа в виде двоичного вектора:

$$d = \{d_{m-1}2^{m-1} + \dots + d_12^1 + d_02^0\}.$$

Алгоритм вычисления следующий:

шаг 1: значение результата  $Q = 0$ ;

шаг 2: счетчик  $i=m-1$ , где  $m$  – количество двоичных разрядов в  $d$ ;

шаг 3: удвоение точки  $Q = 2Q$

шаг 4: если  $d_i=1$ , то  $Q = Q + P$ ;

шаг 5: если  $i>0$ , переход на шаг 3; иначе  $Q = dP$ .

Таким образом, при выполнении вычисления открытого ключа, измеряя время выполнения каждой итерации умножения точки на число, можно вычислить значение ключа электронной подписи (секретного ключа): время выполнения каждой итерации будет соответствовать значениям битов ключа.

### **Защита от атаки по времени выполнения**

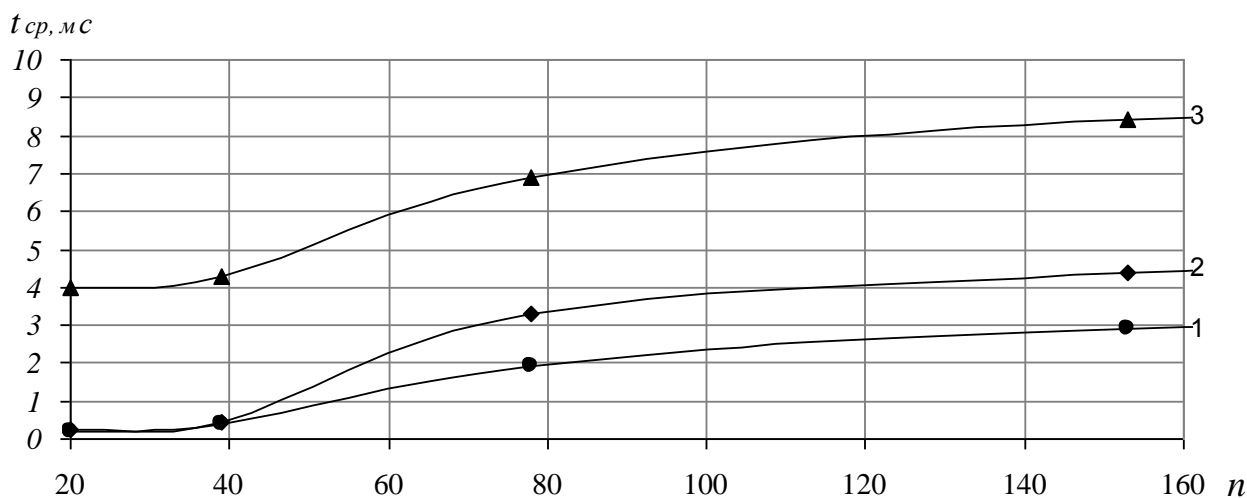
Особенностью функционирования программного средства криптографической защиты информации является разнородность среды его функционирования (совокупности программных и аппаратных ресурсов, используемых совместно со средством криптографической защиты информации). Иными словами – нельзя предсказать, как будет эксплуатироваться программное средство криптографической защиты информации и какие возможности будут у нарушителя информационной безопасности. В нормативных документах [2,3] предусмотрен механизм классификации средств криптографической защиты информации в зависимости от предполагаемых возможностей нарушителя информационной безопасности. Требования к классу используемого средства и перечень организационно-технических мер может полностью исключить возможность проведения атаки по времени выполнения. Однако выполнение требований нормативных документов является обязательным для организаций, где можно сформировать необходимую среду функционирования программного средства криптографической защиты информации. Для средств, используемых простыми пользователями, выполнение таких требований практически невозможно, поэтому при разработке программной реализации средства криптографической защиты информации защиту от атак необходимо реализовать внутри программного средства.

Основными методами защиты, позволяющими снизить вероятность успешной реализации атаки по времени, являются [1]:

- рандомизация времени выполнения операций, когда вместе с операциями, реализующими преобразование, вводятся дополнительные незначимые операции со случайными значениями аргументов, либо произвольные временные задержки выполнения. В результате время выполнения даже одинаковых операций будет сильно различаться, что не позволит сопоставить выполняемые операции и значения операндов;
- выравнивание времени выполнения, когда время выполнения каждой операции выбирается максимально возможным, независимо от значений аргументов.

Следует учесть, что второй метод применим в основном к операциям, в которых время выполнения в основном зависит от размерности – таким как операции умножения или сложения. При выполнении сложения точек эллиптической кривой время выполнения зависит от особенной используемого алгоритма вычисления, поэтому в качестве защитной меры целесообразно использовать рандомизацию времени выполнения операций.

Было проведено экспериментальное исследование подверженности времени выполнения операций сложения и удвоения точек, а также проверка эффективности использования рандомизации времени выполнения операций. Результат исследований среднего времени выполнения операций  $t_{cp}$  от разрядности операндов  $n$  представлены на рисунке. Кривая 1 соответствует среднему времени выполнения операции сложения точек, кривая 2 – среднему времени удвоения точек. Из графиков видно, что при размере операндов более 50 бит становится возможным опередить выполняемую операцию. Кривая 3 соответствует среднему времени выполнения обеих операций при применении рандомизации. Из графиков видно, что опередить выполняемую операцию нельзя. Однако применение защитной меры значительно снижает производительность устройства.



Среднее время выполнения операций в зависимости от разрядности операндов

### Заключение

Рассмотрение угрозы проведения атаки по времени выполнения является актуальной проблемой при программной реализации средства криптографической защиты информации, следовательно, при его разработке необходимо реализовывать защитные меры, позволяющие снижать вероятность успешной реализации атаки.

Следует заметить, что атакам по времени выполнения могут быть подвержены не только средства криптографической защиты информации при выполнении криптографических преобразований, а также другие подсистемы обеспечения информационной безопасности. Например, если алгоритмы проверки паролей подсистемы аутентификации зависят от длины

вводимого пароля, то атака позволит определить длину пароля. Следовательно, при реализации любой подсистемы безопасности информации, в которой используются вычисления на основе информации, раскрытие которой приведет к полной компрометации системы, следует снижать возможность реализации угроз по времени выполнения.

### Библиографический список

1. **Панасенко, С.П.** Алгоритмы шифрования. Специальный справочник / С.П. Панасенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 567 с.: ил.

2. Приказ Федеральной службы безопасности Российской Федерации от 10 июля 2014 г. N 378 «Об утверждении Состав и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных с использованием средств криптографической защиты информации, необходимых для выполнения установленных Правительством Российской Федерации требований к защите персональных данных для каждого из уровней защищенности».

3. Р 1323565.1.012-2017. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации.

**O.V. Lipilin, M.S. Korostelev, Y.D. Rubtsov**

### ENCRYPTION SOFTWARE PROTECTION AGAINST TIMING ATTACKS

Penza State University

**Purpose:** This article is devoted to consider the issue of information protection from threats that may be implemented using a timing-attack.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in an experimental analysis of the effectiveness of various protective measures: randomization of execution time and runtime alignment.

**Findings:** This article defines a methodology for analyzing the effectiveness of protective measures against timing-attack.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for both studying new modifications of considered methods of protection against runtime attacks and for applying considered methods to existing practical realization problems.

**Originality/value:** This article identifies several approaches to developing security measures against timing-attack on encryption software.

**Key words:** threats, timing-attack, side channel, encryption software

В.Ю. Карпычев, Д.А. Ляхманов, А.С. Охотников

## ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОВ УТЕЧКИ ПАРОЛЕЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ КЛАВИАТУРНОГО ВВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

**Цель.** Разработка методики скрытого выявления фактов утечки паролей на основе анализа динамики клавиатурного ввода пользователя.

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Проведен статистический анализ динамики клавиатурного ввода при наборе парольных фраз различного вида и установлен факт наличия устойчивых поведенческих особенностей, на основе которых может быть сформирован поведенческий шаблон, однозначно идентифицирующий пользователя. Проведено исследование изменчивости поведенческого шаблона в процессе многократного ввода одинаковой символьной последовательности, как следствие появления мышечной памяти.

**Практическая значимость.** В статье предложена методика идентификации пользователя на основании динамики клавиатурного ввода коротких символьных последовательностей, которая может найти применение в программных средствах, предназначенных для выявления фактов несанкционированной передачи или утечки долгосрочных символьных паролей.

**Ключевые слова:** скрытая идентификация, утечка паролей, клавиатурный почерк, поведенческий шаблон.

### Введение

Парольные и атрибутные методы идентификации и аутентификации, традиционно используемые в системах управления доступом, имеют ряд существенных недостатков. Одним из основных является неоднозначность идентификации пользователя и возможность обмана средств разграничения доступа путем кражи, имитации или несанкционированной передачи парольного атрибута. С появлением публичных информационных ресурсов различного назначения, социальных сетей и Интернет-ресурсов личностного информирования данная проблема приобрела наиболее острый характер. Согласно мировой статистике, в настоящее время наблюдается лавинообразный рост количества инцидентов, связанных с несанкционированной передачей пользовательских паролей, и проникновением в информационную систему нарушителя под видом легитимного пользователя.

В решении данной проблемы могут помочь программные средства, реализующие методики скрытой идентификации пользователя по косвенным признакам, формирующим его поведенческий образ. Реализуемая методика должна отвечать следующим требованиям:

- отсутствие необходимости применения дополнительных аппаратных средств;
- высокая степень достоверности;
- высокая степень скрытности;
- низкая потребность в вычислительных ресурсах.

В данной статье предлагается методика идентификации пользователя на основе технологии клавиатурного почерка, базирующейся на статистическом анализе времени возникновения и длительности клавиатурных событий при вводе парольной фразы.

### Исследование динамики клавиатурного ввода

Для сбора и обработки статистических данных клавиатурного ввода было разработано приложение, позволяющее в фоновом режиме формировать статистическую выборку при наборе парольной фразы. Приложение представляет собой фильтр-драйвер режима ядра для hid-устройств, осуществляющий сбор данных о событиях клавиатуры и запись их в файл на жесткий диск по окончании итерации ввода. Данная реализация позволила многократно снизить влияние факта переключения контекста потоков и получать данные о времени возникновения событий клавиатуры с минимальными погрешностями.

Для формирования статистической выборки использовались следующие события ввода:

- нажатие клавиши (событие KEY\_DOWN), формирующее временной ряд  $T^d = \{t_i^d\}_{i=1}^M$ , где  $t_i^d$  – временная метка события;
- отпускание клавиши (событие KEY\_UP) формирующее временной ряд  $T^u = \{t_i^u\}_{i=1}^M$ , где  $t_i^u$  – временная метка события.

Пример получаемых статистических данных представлен в таблице.

#### Пример исходных данных для разработки метода

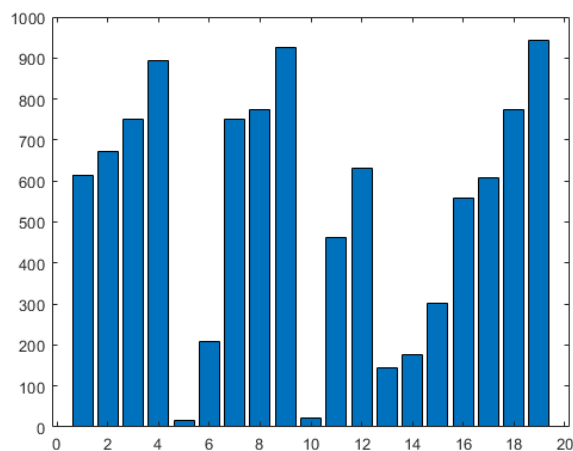
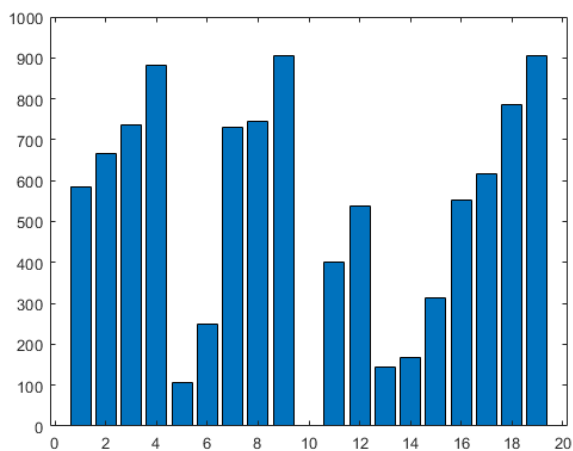
Время регистрации	Scan-код клавиши	Тип события
17:39:51.0417533	13	KEY_UP
17:39:51.6355326	160	KEY_DOWN
17:39:51.7448926	72	KEY_DOWN
17:39:51.7917632	160	KEY_UP
17:39:51.9792995	72	KEY_UP
17:39:51.9792995	82	KEY_DOWN
17:39:52.0574282	82	KEY_UP
17:39:53.4012460	78	KEY_DOWN
17:39:53.4637478	78	KEY_UP
17:39:53.9793742	79	KEY_DOWN
17:39:54.0418798	79	KEY_UP

На основе получаемых от приложения данных формировались следующие временные ряды, отражающие динамику клавиатурного ввода и содержащие относительные временные задержки событий в миллисекундах:

- временная задержка между событиями KEY\_UP  $D^u = \{d_i^u\}_{i=1}^{M-1}$ , где  $d_i^u = t_{i+1}^u - t_i^u$ ;
- временная задержка между событиями отпускания клавиш KEY\_DOWN  $D^d = \{d_i^d\}_{i=1}^{M-1}$ , где  $d_i^d = t_{i+1}^d - t_i^d$ ;
- длительность удержания клавиши в нажатом состоянии  $D^r = \{d_i^r\}_{i=1}^{M-1}$ , где  $d_i^r = t_{i+1}^d - t_i^u$ .

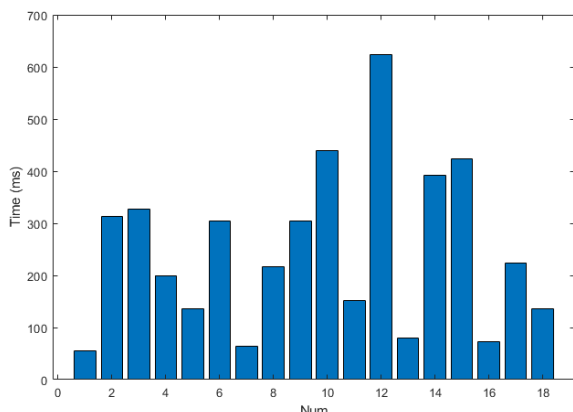
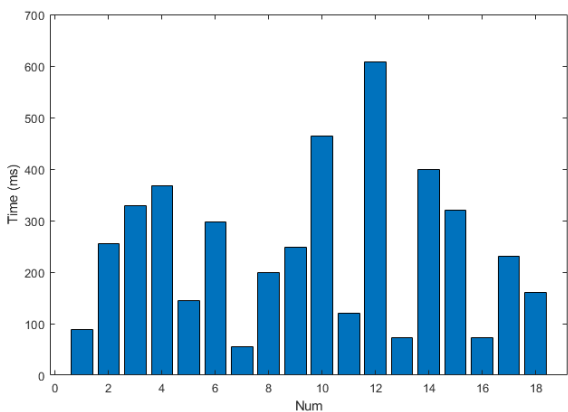
Для сбора статистических данных были привлечены 16 человек, которые делились на две группы по 10 и 6 человек. В ходе эксперимента испытуемые должны были, используя приложение для сбора статистики ввода, в течение нескольких дней вводить парольную фразу, состоящую из  $M=19$  символов. Испытуемые из первой группы получали парольную фразу

зу заранее и в течение нескольких дней перед проведением финального теста тренировались с ее вводом, собирая дополнительную статистику по изменчивости динамики ввода. В ходе эксперимента каждый из испытуемых вводил парольную фразу на одном и том же терминале ввода не менее 40 раз в течение 5 дней, формируя статистическую выборку из  $N=200$  итераций. Испытуемые из второй группы получали парольную фразу непосредственно перед финальным тестом. Целью эксперимента является определение степени изменчивости динамики клавиатурного ввода вследствие появления автоматизма действий и сравнение динамики ввода парольной фразы обычным и натренированным пользователем. В рамках данного эксперимента испытуемый из первой группы имитирует легитимного владельца парольной фразы, неоднократно вводящего ее при аутентификации и имеющего некоторую устоявшуюся манеру ввода. Испытуемый из второй группы имитирует нелегитимного пользователя, получившего парольную фразу и не имеющий устоявшейся манеры ввода.



а)

б)



г)

д)

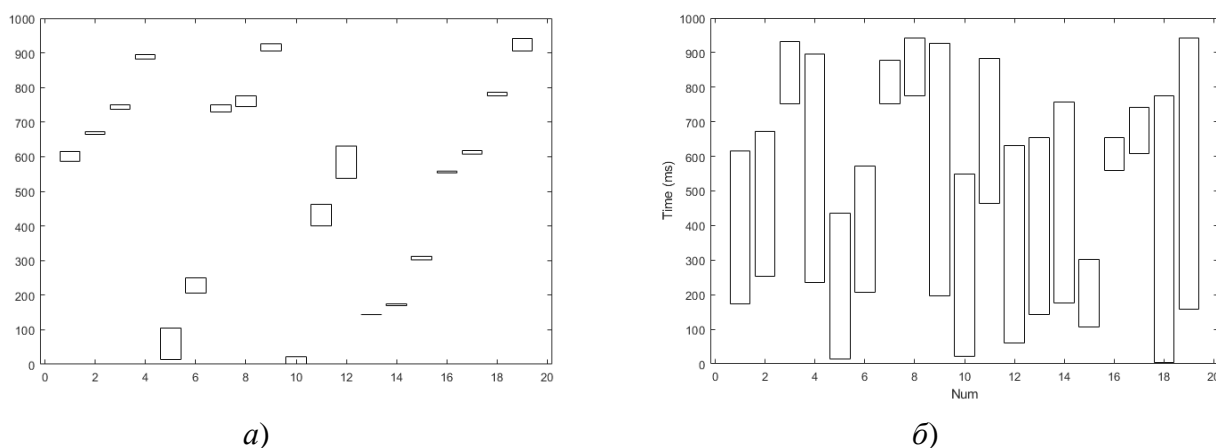
**Рисунок 1. Гистограммы разницы времени между событиями KEY\_UP клавиатуры для двух испытуемых**

В ходе первого этапа эксперимента выбирались пары испытуемых из первой группы после 200 итераций тренировочного ввода. На рис. 1 показана динамика событий KEY\_UP и длительности нажатий для первого (а, б) и второго (в, г) пользователей с интервалом в 24 часа. Каждый столбец гистограммы показывает длительность интервала между смежными событиями при вводе парольной фразы. Из графиков видно, что для обоих пользователей манера

ввода на протяжении суток изменилась незначительно. Данный факт подтверждается всеми испытуемыми из первой группы и может свидетельствовать о том, что каждый испытуемый имеет собственную сохраняющуюся во времени динамику ввода парольной фразы, которую можно использовать в качестве дополнительного поведенческого признака при парольной аутентификации.

На основании полученных данных также можно сказать, что даже для натренированного пользователя временные характеристики динамики ввода изменчивы и являются случайными величинами с нормальным распределением. Таким образом, поведенческий шаблон может быть представлен как совокупность интервалов допустимых значений  $P = \{p_i\}_{i=1}^{M-1}$ , где  $M$  – количество символов в парольной фразе, а  $p_i = \{m_i - \sigma_i, m_i + \sigma_i\}$  – множество допустимых значения характеристики  $d_i$ , являющейся временным интервалом между  $i$ -м и  $i+1$ -м клавиатурными событиями. Графически данный шаблон может быть представлен в форме гистограммы, в которой каждый столбец соответствует допустимому множеству  $p_i$ , а его нижняя и верхняя границы определяют границы допустимых значений (рис. 2). Сформированный для данной группы пользователей поведенческий шаблон для событий KEY\_UP, KEY\_DOWN и длительности клавиатурных нажатий достаточно полно описывает динамику ввода парольной фразы и в 98% случаев позволяет правильно идентифицировать испытуемого.

Вторая часть эксперимента заключалась в сравнении динамики ввода испытуемых из первой и второй группы. Испытуемые из второй группы получали парольную фразу непосредственно перед началом финального теста, имитируя пользователя, получившего парольную последовательность несанкционированно. Обработка статистических данных показала, что испытуемые из второй группы формировали для каждого клавиатурного события статистическую выборку с большей дисперсией и высокой нестабильностью поведенческого шаблона (рис. 2, б). Высокая нестабильность и отсутствие наработанной манеры ввода наблюдались даже у пользователей с высокой скоростью печати, что позволяет выявлять пользователей, которые сравнительно недавно получили парольную последовательность и не использовали ее ранее.

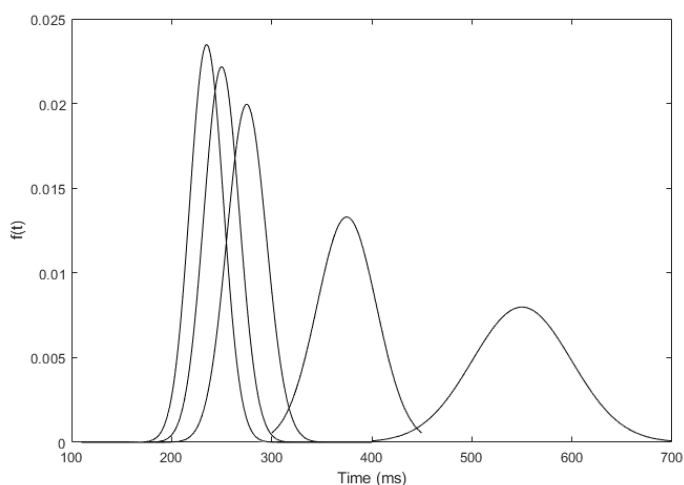


**Рисунок 2. Графическое представление поведенческого шаблона для события KEY\_UP:**  
*a* – натренированный пользователь, *б* – нетренированный пользователь

Также в ходе экспериментов было выявлено, что исследуемые статистические показатели имеют нормальное распределение, параметры которого изменяются в процессе повторения итераций ввода парольной фразы с постепенной стабилизацией, что объясняется постепен-

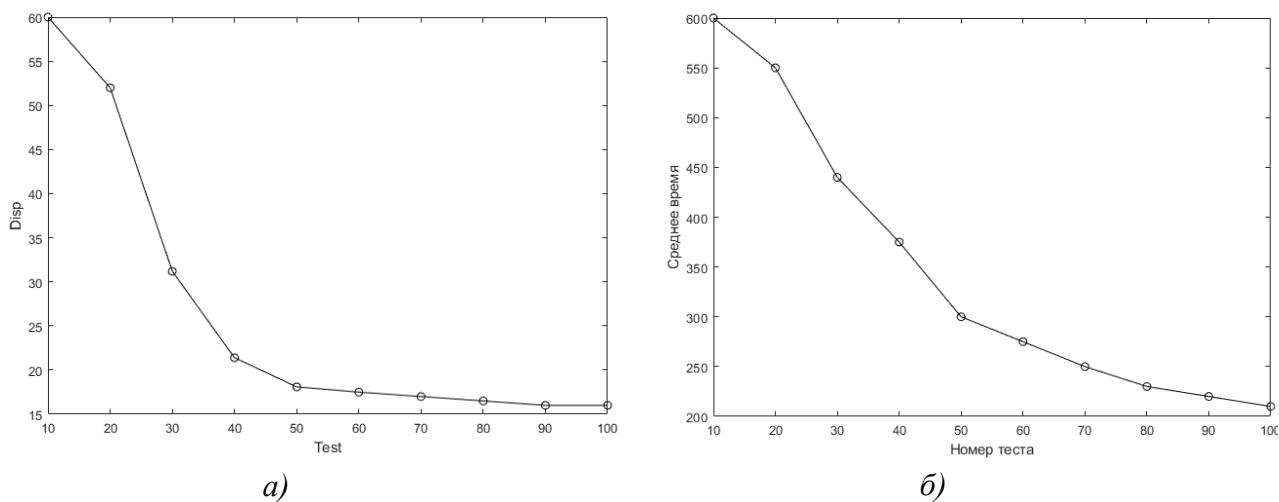


ной выработкой у испытуемого мышечной памяти и автоматизма ввода. На рис. 3 представлена динамика изменения формы кривой плотности вероятности для события KEY\_UP одной символьной пары в процессе тренировки пользователя из первой группы в течение нескольких итераций ввода.



**Рисунок 3. Изменение кривой плотности вероятностей события KEY\_UP для символьной пары в процессе приобретения автоматизма ввода**

В процессе приобретения пользователем опыта ввода парольной фразы статистические характеристики его ввода изменяются непрерывно, и могут быть описаны изменением параметров дисперсии (рис. 4, а) и мат. ожидания (рис. 4, б) плотности распределения вероятности.



**Рисунок 4. Изменение параметров плотности распределения вероятностей для событий KEY\_UP: а – дисперсия, б – математическое ожидание времени ввода**

На основании полученных данных можно сделать вывод, что поведенческий шаблон клавиатурного ввода является изменяемой во времени характеристикой пользователя, зависящей от степени автоматизма пользовательских действий. По истечении некоторого времени при условии постоянного ввода парольной фразы и сохранении условий ввода наступает стабилизация динамики ввода. Таким образом, поведенческой шаблон клавиатурного ввода в

рамках задачи выявления фактов утечки пароля не может рассматриваться как статическая характеристика и должен подвергаться постоянно актуализации и корректировке.

Корректировку диапазонов допустимых значений, составляющих поведенческий шаблон клавиатурного ввода, предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

1. Из  $N$  последних процедур ввода формируются временные ряды  $T^n$ , каждый из которых содержит временные метки клавиатурных событий при вводе парольной фразы.

2. Для каждой  $n$ -й пары смежных клавиатурных событий формируется ряд временных интервалов  $D^n: d_i^n = t_{i+1}^n - t_i^n$ .

3. Для каждого ряда  $D^n$  определяются параметры мат. ожидания  $m_i$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_i$ .

4. Для каждой пары событий  $[t_{i+1}^{N+1}, t_i^{N+1}]$  определяется интервал допустимых значений задержки  $d_i^{N+1} \in [m_i - \sigma_i, m_i + \sigma_i]$ .

При вводе парольной фразы пользователем процедура соответствия поведенческому шаблону сводится к последовательной проверке всех значений  $d_i^{N+1}$  на принадлежность к интервалу  $[m_i - \sigma_i, m_i + \sigma_i]$ . При условии, что все значения  $d_i^{N+1}$  при вводе парольной фразы попали в допустимые диапазоны, выносится решение о соответствии пользователя поведенческому шаблону и осуществляется корректировка последнего согласно п.1-4 приведенного ранее алгоритма.

### Заключение

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при многократном вводе фиксированных символьных последовательностей у пользователя формируется некоторая специфичная для него манера ввода, которая с течением времени стабилизируется и не изменяется при сохранении условий ввода. Сформированный на ее основе поведенческий шаблон может использоваться для идентификации легитимных пользователей информационной системы и выявления незнакомых пользователей. Данная методика может быть использована в средствах скрытой идентификации пользователя в информационных системах с долгосрочными символьными паролями.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1 **Иванов, А.И.** Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений / А.И. Иванов. – П.: ПГУ, 2006. – 312 с.

2 **Шаньгин, В.Ф.** Комплексная защита информации в корпоративных системах: учебник / В.Ф. Шаньгин. – М.; Форум: Инфра-М, 2010. – 592 с.

3 **Шарипов, Р.Р.** Разработка полигауссового алгоритма аутентификации пользователей в телекоммуникационных системах и сетях по клавиатурному почерку: диссертация / Р.Р. Шарипов. – Казань, 2006 – 182 с.

4 **Казарин, М.Н.** Разработка и исследование методов скрытного клавиатурного мониторинга: диссертация / М.Н. Казарин. – Таганрог, 2006 – 211 с.

5 Верификация [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_philosophy/198/%D0%92%D0%95%D0%A0%D0%98%D0%A4%D0%98%D0%9A%D0%90%D0%A6%D0%98%D0%AF](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/198/%D0%92%D0%95%D0%A0%D0%98%D0%A4%D0%98%D0%9A%D0%90%D0%A6%D0%98%D0%AF). Дата обращения: 15.01.2018.

6 **Скутин, Е.Д.** Постановка задачи идентификации [Электронный ресурс] / Е.Д. Скутин. – 2004 – Режим доступа: [https://studopedia.su/11\\_62350\\_postanovka-zadachi-identifikatsii.html](https://studopedia.su/11_62350_postanovka-zadachi-identifikatsii.html). Дата обращения: 15.01.2018.

7 Биометрическая аутентификация: защита систем и конфиденциальность пользователей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2012/10/13033122/>. Дата обращения: 12.03.2018.

8 **Брюхомицкий, Ю.А.** Гистограммный метод распознавания клавиатурного почерка [Электронный ресурс]: научная статья / Ю.А. Казарин. – Таганрог – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/gistogrammnyy-metod-raspoznavaniya-klaviaturnogo-pocherka>. Дата обращения: 05.04.2018.

**V.Y. Karpychev, D.A. Lyakhmanov, A.S. Ohotnikov**

## **IDENTIFICATION OF PASSWORD LEAK FACTS BY KEYBOARD INPUT DYNAMICS ANALYSIS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Goal.** Development of a method for covertly detecting password leak based on an analysis of the dynamics of the user's keyboard input.

**The main simulation results and their scientific novelty.** A statistical analysis of the dynamics of keyboard input in the collection of passphrases of various types is carried out and the fact of the presence of stable behavioral patterns is established, on the basis of which a behavioral pattern can be generated that uniquely identifies the user. A study on the variability of the behavioral pattern is carried out in the process of repeated input of the same symbolic sequence, as a result of the appearance of muscle memory.

**Practical relevance.** The article contains a user identification technique based on the dynamics of keyboard input of short symbol sequences, which can be used in software for identification the facts of unauthorized transfer or leak of long-term symbol passwords.

**Keywords:** hidden identification, password leak, keyboard signature, behavioral pattern.

**В.А. Мали, К.В. Ревнивцев**

## **АРХИТЕКТУРА УЧЕБНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ МЕХАНИЗМОВ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Задача подготовки специалистов по защите информации и компьютерной безопасности, обладающих достаточным уровнем компетенций как по администрированию современных систем безопасности, так и по организационной поддержке принимаемых решений по безопасности на сегодняшний момент является особенно актуальной. Широкое применение беспроводных сетей в информационных системах требует от специалистов дополнительных практических навыков и умений по обеспечению информационной безопасности. В статье описан пример архитектуры учебного стенда для изучения проблем безопасности беспроводных сетей.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, беспроводная сеть, точка доступа, коммутатор, учебный стенд.

### **Введение**

В настоящее время обеспечению безопасности беспроводных сетей уделяется недостаточное внимание. Используемые в беспроводных сетях алгоритмы шифрования и аутентификации часто подвержены различным атакам. Беспроводные сети используются практически везде и поэтому для обеспечения общего уровня информационной безопасности сети необходимо изучать механизмы и способы защиты от действий злоумышленников. Поэтому необходимо создавать учебные стенды для изучения механизмов атак на беспроводные сети и способов защиты от них.

### **Актуальность изучения безопасности беспроводных сетей**

Самой часто используемой технологией беспроводной передачи данных является Wi-Fi. Для создания непрерывной и независимой информационной сети данная технология используется повсеместно: общественные места, различные организации и предприятия, учебные заведения и т. д. В последнее время большинство используемых человеком носимых устройств также поддерживают использование Wi-Fi. Использование беспроводных сетей включает новые риски для информационной сети, например автоматическое подключение к открытым Wi-Fi сетям на мобильных телефонах и других устройств поддерживающих использование Wi-Fi, что может привести к утечке конфиденциальной информации. В связи с этим изучение безопасности беспроводных сетей очень актуально. Малозащищенные беспроводные сети дают злоумышленнику возможность для проведения своих атак.

## **Угрозы и механизмы нарушения безопасности беспроводных сетей, пригодные для изучения**

В настоящее время наиболее актуальными сценариями атак на беспроводные сети являются:

- избыточное покрытие сети;
- использование словарных ключей безопасности;
- использование механизма WPS. [2]

Избыточное покрытие сети может привести к тому, что радиус действия беспроводной точки доступа будет больше размеров контролируемой зоны организации. Злоумышленник, используя мощные Wi-Fi-адаптеры для работы в различных частотных диапазонах, всенаправленные антенны, микрокомпьютеры для создания поддельной точки доступа, оборудование для скрытного анализа беспроводных сетей и всевозможное ПО, позволяющее проводить активный анализ безопасности Wi-Fi-сетей сможет реализовать большой спектр несанкционированных воздействий на беспроводную сеть, целями которых могут быть получение информации об используемых алгоритмах шифрования и механизмах аутентификации. Вся полученная информация в дальнейшем может быть использована непосредственно для проведения атак на инфраструктуру организации. Например, атака вида «отказ в обслуживании» DoS Wi-Fi. Реализация данной атаки происходит за счёт постоянной отправки пакетов деаутентификации, что приводит к тому, что клиенты не могут подключиться к беспроводной сети и взаимодействовать с сетью в штатном режиме. Данная атака не приводит к утечке конфиденциальной информации.

Взлом WPA/WPA2 словарного пароля методом грубой силы является универсальной атакой на беспроводные сети. К её плюсам можно отнести то, что данная атака применима ко всем точкам доступа, которые используют программу сертификации устройств беспроводной сети WPA/WPA2. Минусами данной угрозы является то, что для реализации атаки необходимо, чтобы к точке доступа беспроводной сети были подключены клиенты. Так же стоит учесть, что расшифровка пароля ведётся методом грубой силы (метод перебора), что значит, что при достаточно сложном пароле обойти защиту Wi-Fi точки доступа за приемлемое время не получится.

Взлом WPS пин-кода является менее универсальной атакой, так как количество точек доступа к беспроводной сети очень мало, но является отличным примером для изучения в образовательных целях. WPS - стандарт и одноимённый протокол полуавтоматического создания беспроводной сети Wi-Fi. Если в точке доступа активирован WPS с PIN, то подобрать PIN-код для подключения возможно за приемлемое время. PIN-код состоит из восьми цифр — следовательно, существует  $10^8$  (100 000 000) вариантов PIN-кода для подбора. Однако количество вариантов можно существенно сократить. Последняя цифра PIN-кода представляет собой контрольную сумму, которая можно вычислить на основании первых семи цифр. Таким образом, количество вариантов сокращается до  $10^7$  (10 000 000). Недостаток протокола позволяет разделить PIN-код на две части, 4 начальные цифры и 3 последующие и затем необходимо проверять каждую часть на корректность. Если PIN-код разбить на две части: следовательно, получается  $10^4$  (10 000) вариантов для первой половины и  $10^3$  (1000) для второй. В итоге это составляет всего лишь 11 000 вариантов для полного перебора, что в более 9000 раз меньше исходного числа вариантов  $10^8$ [3].

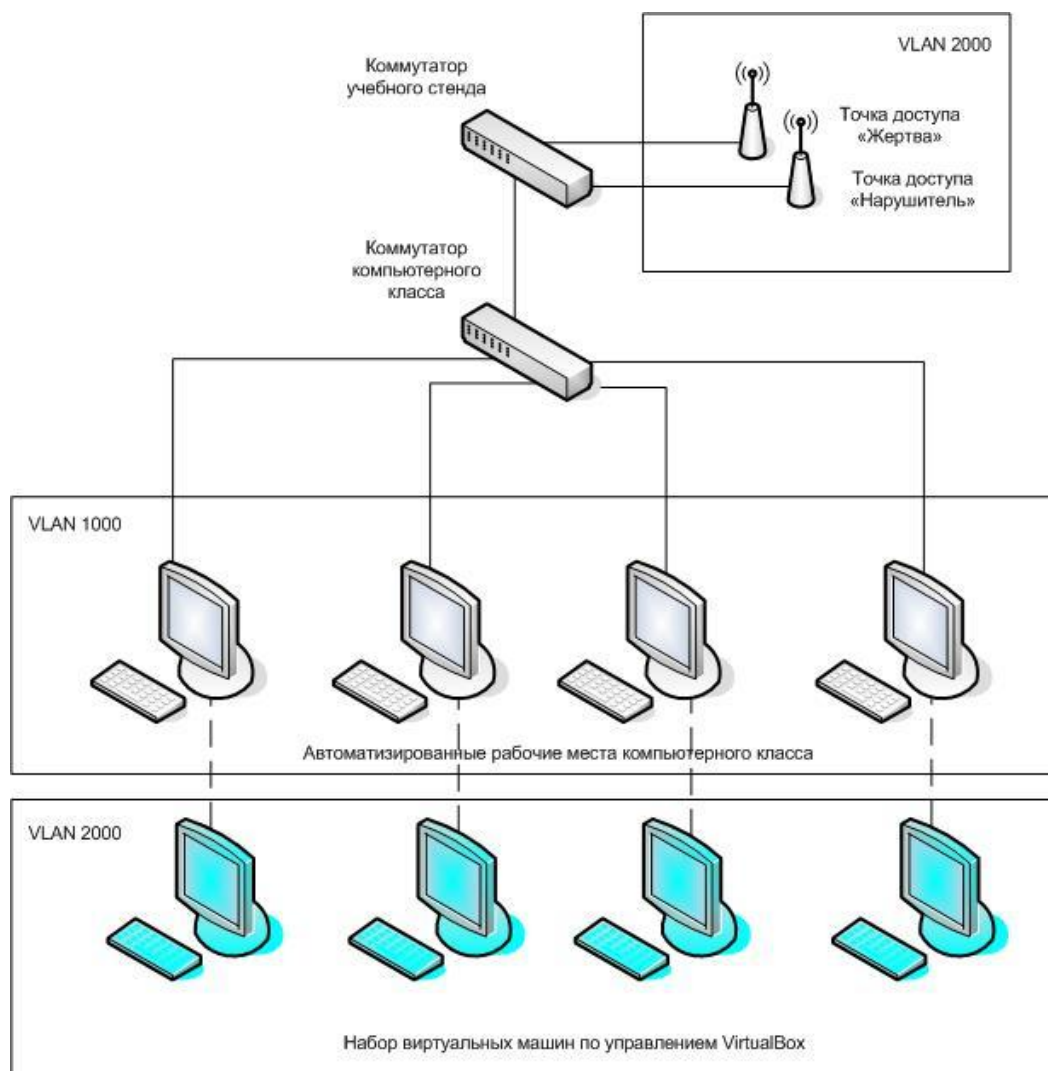
## Модель архитектуры учебного стенда по исследованию безопасности беспроводной сети с отдельного рабочего места с доступом из проводной сети

Для создания учебного стенда по исследованию механизмов безопасности беспроводных сетей необходимо, чтобы каждое автоматизированное рабочее место компьютерного класса было оснащено следующим комплектом оборудования и программного обеспечения: сетевой адаптер с поддержкой технологии Wi-Fi, программное обеспечение по исследованию механизмов безопасности беспроводных сетей, точка доступа Wi-Fi в качестве объекта исследования.

Реализация учебного стенда в таком составе имеет ряд недостатков:

- 1) избыточность использованного оборудования;
- 2) сложность централизованного управления;
- 3) сложность организации работы нескольких рабочих мест одновременно при реализации модели «нарушитель-защищаемый».

Предлагаемая модель архитектуры учебного стенда (представлена на рисунке) предусматривает возможность его реализации в рамках компьютерного класса с проводными автоматизированными рабочими местами, объединенными в локальную сеть с помощью коммутатора.



Модель архитектуры учебного стенда по исследованию механизмов безопасности беспроводных сетей

Учебный стенд содержит общую аппаратную часть в виде коммутатора учебного стенда с поддержкой стандарта 802.1Q и двух точек доступа. Точки доступа реализованы на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi. На каждой из них установлено специализированное программное обеспечение, которое позволяет подключаться к ним удаленно с помощью протокола SSH и производить необходимые административные действия. Точка доступа «Жертва» выступает в роли уязвимой точки доступа беспроводной сети, на которой возможны реализации различных сценариев обеспечения информационной безопасности беспроводной сети, в том числе с ошибками администрирования, уязвимостями. Точка доступа «Нарушитель» содержит программное обеспечение по исследованию механизмов безопасности беспроводных сетей, с помощью которого можно проводить воздействия на точку доступа «Жертва».

На автоматизированные рабочие места компьютерного класса установлено программное обеспечение виртуализации для операционных систем Oracle Virtual Box. С помощью данного программного обеспечения создается набор виртуальных машин с установленным клиентским программным обеспечением для удаленного подключения к точкам доступа. Особенностью программного средства виртуализации Virtual Box является то, что в режиме настройки сетевого интерфейса возможно подключение к виртуальным локальным сетям (VLAN) компьютерного класса. Для организации доступа на коммутаторе компьютерного класса и коммутаторе учебного стенда создаются две VLAN: VLAN 1000 для работы проводных клиентов и VLAN 2000 для доступа к компонентам учебного стенда. Такая архитектура исключает доступ к точкам доступа с автоматизированных рабочих мест компьютерного класса.

### **Заключение**

Разработанная архитектура учебного стенда обладает следующими преимуществами: изолированная сетевая среда с контролируемым доступом виртуальных рабочих мест, минимальное количество беспроводного оборудования, возможность реализации любых сценариев взаимодействия между нарушителем и жертвой, возможность исследования эффективности мер по обеспечению безопасности беспроводных сетей. Использование учебного стенда позволит учащимся получить достаточный уровень практических навыков по обеспечению информационной безопасности беспроводных сетей.

### **Библиографический список**

1. Wi-Fi // Википедия. [2020—2020]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
2. Атаки на корпоративный Wi-Fi. - URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Wi-Fi-Corporate-Attacks-rus.pdf>
3. Атака на Wi-Fi с WPS, используя Reaver // Hackware. [2020 — 2020] — URL: <https://hackware.ru/?p=4213>

**V.A. Mali, K.V. Revnivitsev**

**THE ARCHITECTURE OF THE EDUCATIONAL STAND  
ON THE STUDY OF WIRELESS SECURITY MECHANISMS**

Penza State University

The task of training information security and computer security specialists with a sufficient level of competence both in the administration of modern security systems and in the organizational support of security decisions made is currently especially relevant. The widespread use of wireless networks in information systems requires additional practical skills from the specialists to ensure information security. The article describes an example of the architecture of the training stand for studying the security problems of wireless networks.

**Key words:** information security, wireless network, access point, switch, training stand.



## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ТЕРРОРИЗМ И ЭКСТРЕМИЗМ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ РАЗЛИЧИЙ

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>Академия Федеральной службы исполнения наказаний России, г. Рязань

**Цель.** Создание аналитических моделей территориальных различий распространения негативной информации в социальных сетях связано с усиливающимися факторами воздействия терроризма и экстремизма на население через социальные сети.

**Методика сбора данных.** Реализована специальная процедура формирования выборочных статистических данных в социальной сети «ВКонтакте».

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Осуществлена типологизация поселений с помощью кластерного анализа. Выделено семь однородных кластеров российских поселений, значимо различающихся скоростями распространения информации в социальных сетях. Впервые построена аналитическая модель зависимости скорости распространения информационного воздействия от среднестатистических размеров круга «друзей» пользователей в различных кластерах поселений Российской Федерации.

**Практическая значимость.** Коэффициент объясняемости модели – 98%, что позволяет строить достаточно достоверные прогнозы. Результаты моделирования необходимы для обоснования мероприятий по противодействию информационному терроризму и экстремизму в социальных сетях.

**Ключевые слова:** информационное воздействие, терроризм, экстремизм, моделирование, распространение информации, территориальные различия.

### Введение

Переход современной цивилизации к информационному измерению способствовал масштабному и стремительному развитию технологий обмена информацией, что явилось несомненным благом для человечества, его социальных, экономических и гуманитарных институтов. Социальные сети превратили мир в глобальную систему постоянного общения и совершенствования.

Темной же стороной информационного общества стало с каждым днем усиливающееся проникновение в человеческие отношения онлайн-информационных бурь. Особенно опасны указанные явления для детской, подростковой и молодежной среды. Об этом говорится в Доктрине информационной безопасности Российской Федерации [1].

Самой отвратительной стороной современных коммуникаций сегодня выступают информационный терроризм и экстремизм. Для организации эффективного противодействия указанным крайне негативным факторам актуальна задача исследования с помощью современных математических моделей территориальных различий распространения информации.

## Аналитическая модель распространения информации в социальной сети

Для анализа территориальных различий распространения информации в социальной сети «ВКонтакте», которую наиболее часто использует население Российской Федерации [2], в том числе – различные молодежные группы, включая учащуюся молодежь. В настоящей работе с помощью имитационной модели применена следующая методика сбора статистических данных:

1. Для каждого из федеральных округов России, по данным сети «ВКонтакте», сформирована случайная выборка из восьми населенных пунктов с количеством жителей не более двадцати тысяч человек.
2. По каждому из населенных пунктов произведена выгрузка данных о тысяче пользователей социальной сети, у которых выяснены все списки «друзей», зарегистрированных в ней.
3. Для каждого поселения по множеству «друзей» рассчитаны среднее значение, среднеквадратичное отклонение (СКО), медиана и мода.

Для исследования территориальных различий распространения информации использована модель, построенная на принципах, изложенных в работах [3–7]. С нею проведены имитационные эксперименты на программной платформе «AnyLogic» [8] и изучено время достижения в популяции максимума индивидов, «зараженных» негативной идеей ( $T_k$ ), а также время исхода 95% индивидов из множества «уязвимых» к негативной идее ( $T_r$ ).

Анализ показал, что характеристикой, наиболее влияющей на скорость распространения информации в популяции, выступает медиана, отражающая среднее количество «друзей» в группах пользователей, а именно: чем больше «друзей», тем выше скорость информационного воздействия, тем быстрее достигается максимум «зараженных». В частности – «зараженных» негативной идеей террористической и экстремистской направленности.

Графики зависимостей характеристик  $T_r$  и  $T_k$  от медианы представлены на рис. 1, 2.

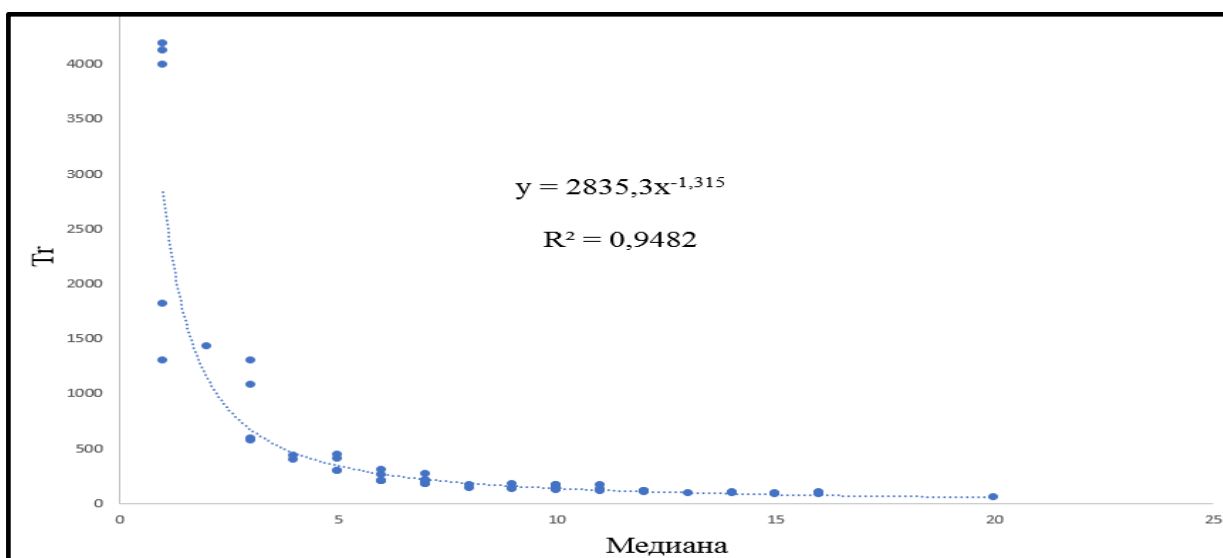
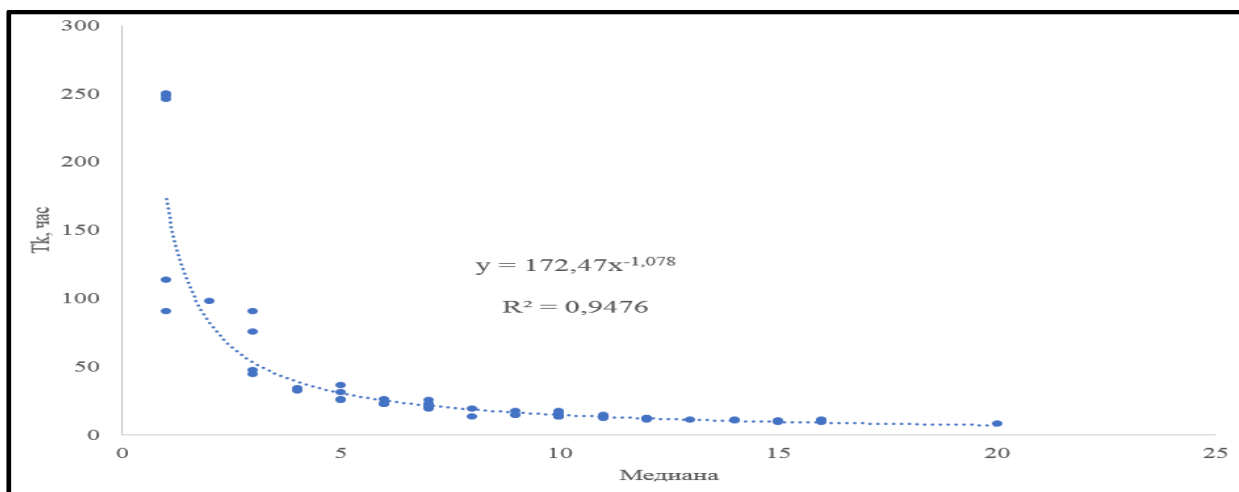


Рисунок 1. Зависимость характеристики  $T_r$  от медианы (кружками обозначены эмпирические данные)



**Рисунок 2. Зависимость характеристики  $T_k$  от медианы (кружками обозначены эмпирические данные)**

Из рисунков видно, что зависимости характеристик  $T_r$  и  $T_k$  от медианы хорошо описываются обратными степенными функциями с высокими коэффициентами объясняемости –  $R^2 \cdot 100\%$ , равными 95 %, то есть близкими к функциональным.

Выявленные зависимости могут быть эффективно использованы в аналитической деятельности органов власти, силовых и заинтересованных структур из образовательной сферы для расчетов характерных динамических параметров распространения информации, включая информацию негативного характера (имеющую террористическую, экстремистскую и иную опасную направленность), в социальных сетях поселений России.

### **Типологизация российских поселений по характеристикам распространения информации в социальных сетях**

Проведенный в работе [9] анализ выявил, что определенные группы поселений Российской Федерации имеют схожие статистические характеристики построения социальных сетей, а также похожие показатели активности их пользователей, что, в свою очередь, сказывается на параметрах распространения информации в сетях, в том числе – террористического и экстремистского характера.

Для выявления таких однородных групп поселений авторами проведен кластерный анализ, использующий известную программу «SPSS». Как следует из его результатов, выборочная совокупность исследованных поселений России подразделяется на семь достаточно однородных групп – кластеров. Результаты имитационного моделирования, представленные в таблице, показали, что время  $T_r$  – исхода 95 % индивидов из множества «уязвимые» применительно к негативной информационной идее – и время  $T_k$  – достижения максимума «зараженных» негативной идеей – существенно различаются в различных кластерах поселений Российской Федерации.

Это обстоятельство необходимо учитывать в аналитической деятельности местных органов власти, силовых структур, а также руководителей образовательных подразделений при организации разъяснительной работы в учебных учреждениях различных регионов, включая противодействие влиянию факторов террористической и экстремистской направленности в социальных сетях.

### Характерные времена $T_r$ и $T_k$ в различных кластерах, часы

Кластер	$T_r$	$T_k$
А	1126	808
Б	501	346
В	423	320
Г	203	54
Д	239	79
Е	263	85
Ж	340	149

Отметим, что применительно к кластерам зависимости характерных времен  $T_r$  и  $T_k$  от медианы имеют еще более выраженную зависимость с очень высокими коэффициентами объясняемости, близкими к 100%. Например, для  $T_r$  он равен 98% (рис. 3).

Таким образом, анализ территориальных различий распространения информации в социальных сетях показывает, что при организации мероприятий противодействия факторам террористического и экстремистского характера со стороны местных органов власти, силовых структур, руководства образовательной сферы российских поселений необходимо учитывать такие характеристики последних, как среднее количество «друзей» у пользователей, среднеквадратическое отклонение от этого среднего, медиану и моду, различающиеся в зависимости от населенных пунктов и существенно сказывающиеся на скорости информационных воздействий.

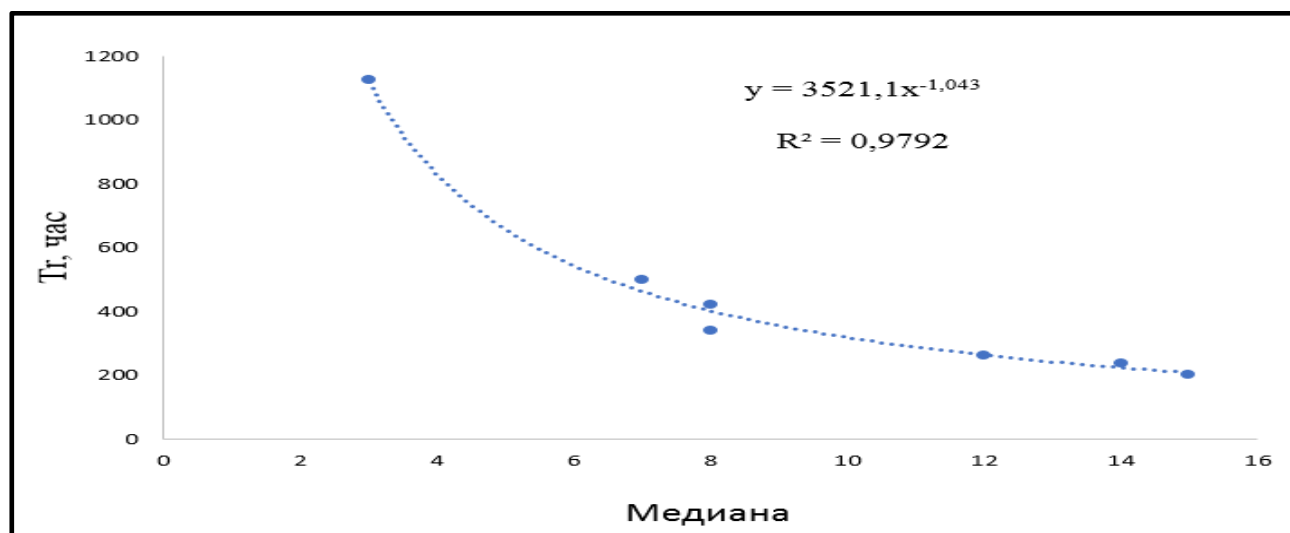


Рисунок 3. Зависимость времени  $T_r$  от медианы в кластерах поселений Российской Федерации

### Выводы

1. Сочетание методов имитационного моделирования и кластерного анализа дает весьма ценную информацию о взаимодействии пользователей в социальных сетях на различных территориях России. В частности, выявлено, что схожие по скорости распространения ин-

формационных воздействий группы населенных пунктов Российской Федерации (табл.1) расположены достаточно определенно и относительно компактно в географическом смысле.

2. Поселения, входящие в кластер А, характеризующиеся наибольшими показателями времени достижения максимума информационного «заражения» и исхода из состояния «уязвимые», концентрируются преимущественно в приграничных зонах Северо-Кавказского округа, Юго-Западной Сибири и Приморья. Поселения кластера Б с вдвое-втрое меньшими значениями характерных времен, характеризующих кластер А, в примыкающих к нему территориальных административных образованиях в глубине России. Поселения кластера Г в Поволжье и на Южном Урале характеризуются еще меньшими рассматриваемыми характерными временами. Наконец, поселения кластеров Д и Е со схожими с кластером Г, но несколько большими характеристиками распространения информации, находятся в Северо-Западном и Центральном федеральных округах Российской Федерации.

3. Весьма востребованными для органов власти, силовых и образовательных структур поселений в плане понимания динамики распространения информационных воздействий в социальных сетях являются аналитические зависимости характерных времен достижения максимума информационного «заражения» и исхода 95% индивидов из состояния «уязвимые», построенные для поселений Российской Федерации и для их однородных групп – кластеров. Они дают возможность с высокими коэффициентами объясняемости (более 95%) рассчитывать динамические особенности информационного воздействия негативных факторов социальных сетей и противодействия им в различных населенных пунктах страны.

4. Следующий шаг в исследованиях типологических различий в Российской Федерации, по нашему мнению, должен быть связан с более глубоким и широким изучением:

- особенностей технологического и технического обеспечения распространения информации в различных территориальных образованиях страны;
- устоявшихся и формирующихся традиций в использовании социальных сетей населением и его различными группами, особенно – молодежными;
- перспектив развития и обеспечения информационной безопасности региональных информационных сетей и систем.

Именно такой подход позволит наилучшим способом обеспечить информационно-аналитическую и организационно-методическую работу местных органов власти, силовых структур, учреждений образовательной сферы по реализации мероприятий противодействия информационному терроризму и экстремизму в Российской Федерации [10,11].

### Библиографический список

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: Утв. Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646. URL: <http://base.garant.ru/71556224>.

2. **Селезнев, Р.С.** Социальные сети как феномен информационного общества и специфика социальных связей в их среде / Р.С. Селезнев, Е.И. Скрипак // Вестник КемГУ. 2013. № 2 (54). Т. 3. – С. 125–131.

3. **Губанов, Д. А.** Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили / Под ред. чл.-корр. РАНД А. Новикова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.– 228с.

4. **Минаев, В.А.** Как управлять массовым сознанием: современные модели / В.А. Минаев [и др.] - М.: РосНОУ, 2013.– 200с.

5. **Минаев, В.А.** Моделирование динамики информационно-психологических воздейст-

вий на массовое сознание / В.А. Минаев, А.С. Дворянкин // Вопросы кибербезопасности. 2016. № 5 (18).– С. 56–64. DOI:<https://doi.org/10.21681/2311-3456-2016-5-56-64>.

6. **Минаев, В.А.** Обоснование и описание модели динамики информационно-психологических воздействий деструктивного характера в социальных сетях / В.А. Минаев, А.С. Дворянкин // Безопасность информационных технологий. 2016. Т.23. № 3. – С.40–52. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/16/26>.

7. **Минаев, В.А.** Моделирование угроз информационной безопасности с использованием принципов системной динамики / В.А. Минаев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. – С. 75–82.

8. **Маликов, Р.Ф.** Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учебное пособие / Р.Ф. Маликов. - Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296 с.

9. **Минаев, В.А.** Системно-динамическое моделирование сетевых информационных операций / В.А. Минаев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 1.– С. 20–39. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.020-039>.

10. **Расторгуев, С.П.** Информационные операции в сети Интернет / С.П. Расторгуев, М.В. Литвиненко / Под общ. ред. А. Б. Михайловского. М.: АНО ЦСОиП, 2014.– 128с.

11. **Минаев, В.А.** Мониторинг вузов: работа над ошибками / В.А. Минаев, Г.А. Шабанов // Высшее образование сегодня. 2013. № 1. – С. 5–10.

V. A. Minaev<sup>1</sup>, A. O. Faddeev<sup>2</sup>

## INFORMATION TERRORISM AND EXTREMISM: MODELING OF TERRITORIAL DIFFERENCES

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow

<sup>2</sup>Academy of the Federal penitentiary service of Russia, Ryazan

**Goal.** The creation of territorial differences analytical models in propagation of negative information in social networks is associated with increasing factors of the influences of terrorism and extremism on the population.

**The method of data collection.** A special procedure for forming sample statistical data in the Vkontakte social network has been implemented.

**The main results of modeling and their scientific novelty.** The method of data collection. A special procedure for generating a sample of statistical data from the Vkontakte social network has been implemented.

**The main results of modeling and their scientific novelty.** Typology of Russian settlements was carried out using cluster analysis. Seven homogeneous clusters of settlements with significantly different rates of information propagation in social networks were identified. For the first time, an analytical model of the speed dependence of the information influences propagation on the average size of the circle of users “friends” in various clusters of settlements in the Russian Federation is constructed.

**Practical significance.** The model's explainability coefficient is 98 %, which allows us to make quite reliable forecasts. The results of the modeling are necessary for developing activity to counteract information terrorism and extremism in social networks.

**Keywords:** information influences, terrorism, extremism, modeling, propagation of information, territorial differences.

В.А. Минаев<sup>1</sup>, А.О. Фаддеев<sup>2</sup>, Р.О. Степанов<sup>1</sup>, Д.С. Грачев<sup>3</sup>

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО РИСКА: ОБЩИЕ РЕШЕНИЯ

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>Академия Федеральной службы исполнения наказаний России, г. Рязань

<sup>3</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва

**Цель.** Построение динамической модели оценки природно-техногенного риска.

**Результаты исследования и их научная новизна.** Рассмотрен общий вид модели оценки рисков в природно-техногенной системе (ПТС), основанной на учёте воздействия на нее природных и техногенных факторов. Найдено общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих модель. Рассмотрен пример применения модели для оценки природно-техногенного риска в случае, когда на ПТС оказываются функционально подобные внешние природное и техногенное воздействия, под которыми понимается такой их вид, при котором влияния описываются одинаковыми функциональными зависимостями. В частности, рассмотрено воздействие линейного вида, которое описывает изменения, возникающие в геологической среде и приводящие к возникновению катастрофических сейсмических событий, наблюдаемых на территориях районного, локального и “точечного” масштабного уровней. Такие виды воздействий характеризуются внезапными аварийными ситуациями на объектах техносферы: взрывами оборудования, обрушениями зданий, сооружений, конструкций.

**Практическая значимость.** Модель позволяет исследовать различные варианты воздействия природных и техногенных воздействий на ПТС. Результаты моделирования необходимы для обоснования мероприятий по предупреждению природно-техногенных угроз на территориях различного масштабного уровня.

**Ключевые слова:** моделирование, дифференциальные уравнения, оценка, природно-техногенный риск, катастрофические сейсмические события.

### Введение

В настоящее время процедуры оценки и предупреждения рисков основываются на комплексе взаимосвязанных нормативно-правовых, организационно-административных, экономических, инженерно-технических и других мероприятий и механизмов, направленных на уменьшение потенциальных или реальных потерь населения, финансового и материального ущерба для объектов хозяйства и природной среды от природных, техногенных и антропогенных (ПТА) опасностей.

Основными принципами защиты населения и территорий от ПТА опасностей выступают: заблаговременность подготовки и осуществления защитных мероприятий; дифференцированный подход к определению характера, объема и сроков проведения этих мероприятий, их достаточности и комплексности.

В России считается общепризнанным и целесообразным для обеспечения безопасности населения и территорий от проявления опасных природных и природно-техногенных про-

цессов опираться на три стратегии[1], предложенные в рамках Государственной научно-технической программы «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф»:

- 1) предотвращение причин возникновения природно-техногенных аварий и катастроф и обеспечение нормального, регламентного функционирования опасных в техногенном отношении объектов;
- 2) локализация аварий (катастроф) и предотвращение формирования опасной обстановки, когда причину возникновения той или иной аварии (катастрофы) по технологическим, экономическим, социальным или иным соображениям устранить невозможно, и начинается цепная реакция событий, ведущих к аварии или катастрофе;
- 3) максимально возможное недопущение или ослабление воздействий опасных природно-техногенных факторов на людей и окружающую среду и ликвидация в кратчайшие сроки последствий аварии, катастрофы.

Для экстремальных событий необходим учет опасных природных явлений, реализация которых маловероятна, но последствия – велики (землетрясения, сильные наводнения и др.) [2]. С точки зрения статистики эти события представляют собой «хвостовые» значения генеральной совокупности и, как правило, недооцениваются исследователями.

В этой связи задача оценки риска считается решенной, если условия жизнедеятельности с точки зрения безопасности формализованы, то есть дано их количественное математическое описание. Одним из важнейших методов оценки природных и техногенных рисков в природно-технических системах (ПТС) является метод математического моделирования [3].

### Описание модели рисков

Рассмотрим общий вид модели оценки рисков в ПТС, основанной на учёте воздействия на эту систему природных и техногенных факторов. Предположим, что риск представляет собой двумерную вектор-функцию:

$$R(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \end{pmatrix},$$

где  $r_1(t)$  – функция изменения природного риска,  $r_2(t)$  – функция изменения техногенного риска.

Представим эти функции в виде следующей системы дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{cases} r_1'(t) = a_1 r_1(t) + b_1 r_2(t) + L_1(t), \\ r_2'(t) = a_2 r_1(t) + b_2 r_2(t) + L_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2$  – некоторые постоянные коэффициенты, отражающие реакцию природно-техногенной системы на воздействия опасных природных и техногенных факторов;  $L_1(t), L_2(t)$  – функции, описывающие интенсивность воздействия на ПТС некоторых внешних природных и техногенных факторов, соответственно.

Найдём общее решение системы (1) при нулевых функциях  $L_1(t), L_2(t)$ :

$$\begin{cases} r_1'(t) = a_1 r_1(t) + b_1 r_2(t), \\ r_2'(t) = a_2 r_1(t) + b_2 r_2(t). \end{cases} \quad (2)$$



Выразим из первого уравнения системы (2) функцию  $r_2(t)$ , а также продифференцируем по времени первое уравнение этой же системы (аргументы функций  $r_1$  и  $r_2$  для упрощения выкладок будем опускать):

$$r_2 = \frac{1}{b_1} r_1' - \frac{a_1}{b_1} r_1, \quad (3)$$

$$r_1'' = a_1 r_1' + b_1 r_2'. \quad (4)$$

Дифференцируя (3) по времени и подставляя выражение для  $r_2'$  в соотношение (4), получим:

$$r_1'' = (a_1 + b_2) r_1' + (a_2 b_1 - a_1 b_2) r_1, \quad (5)$$

представляющее собой дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции изменения природного риска для ПТС с постоянными коэффициентами, а именно [5]:

$$r_1'' + K_1 r_1' + K_0 r_1 = 0, \quad (6)$$

где  $K_1 = -(a_1 + b_2)$ ;  $K_0 = a_1 b_2 - a_2 b_1$ .

Рассмотрим характеристическое уравнение для дифференциального уравнения (6):

$$\lambda^2 + K_1 \lambda + K_0 = 0. \quad (7)$$

Вычислим дискриминант  $D_0$  уравнения (7).

$$D_0 = (a_1 - b_2)^2 + 4a_2 b_1. \quad (8)$$

Можно легко найти решения для всех трех случаев, связанных со знаком дискриминанта уравнения (7) [6]. Однако, учитывая, что дискриминант характеристического уравнения (7) всегда положителен,  $D_0 > 0$ , будем далее оперировать общим решением вида:

$$r_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (9)$$

где  $C_1, C_2$  – некоторые коэффициенты, определяемые из начальных условий; корни характеристического уравнения (7) вещественны  $-\lambda_1, \lambda_2 \in \mathfrak{R}$ .

На самом деле, из (8) следует, что  $(a_1 - b_2)^2 \geq 0$  всегда, и поскольку коэффициенты  $a_1, a_2, b_1, b_2$  физически отражают прямую реакцию ПТС на воздействия опасных природных и техногенных факторов, то они по определению положительны.

Найдем выражение для функции изменения техногенного риска  $r_2(t)$ . Для этого вычислим производную от функции изменения природного риска  $r_1(t)$ :

$$r_1'(t) = C_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (10)$$

Подставив полученное соотношение в выражение (3):

$$r_2(t) = \frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} C_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (11)$$

запишем общее решение однородной системы (2) для случая положительного дискриминанта характеристического уравнения (7):

$$\begin{cases} r_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \\ r_2(t) = \frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} C_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} C_2 e^{\lambda_2 t}. \end{cases} \quad (12)$$

## Применение модели оценки рисков

Рассмотрим пример применения модели(12) для оценки природно-техногенного риска в случае, когда на ПТС оказываются функционально подобные внешние природное и техногенное воздействия. Под функционально подобным внешним воздействием понимается такой его вид, при котором влияния как со стороны природных, так и со стороны техногенных факторов описываются одинаковыми функциональными зависимостями.

В частности, используем функциональные зависимости линейного вида:

$$\begin{cases} L_1^{(0)}(t) = \xi_1 - \eta_1 t, \\ L_2^{(0)}(t) = \xi_2 - \eta_2 t, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2$  – некоторые постоянные коэффициенты.

Для начала выясним общий вид частного решения для неоднородной системы уравнений вида (1). Представим систему (12) в следующем виде [7]:

$$\begin{cases} r_1(t) = C_1 F_{11}(t) + C_2 F_{12}(t), \\ r_2(t) = C_1 F_{21}(t) + C_2 F_{22}(t), \end{cases} \quad (14)$$

полагая при этом

$$\begin{cases} F_{11}(t) = e^{\lambda_1 t}; & F_{12}(t) = e^{\lambda_2 t}; \\ F_{21}(t) = \frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_1 t}; & F_{22}(t) = \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_2 t}. \end{cases} \quad (15)$$

Запишем (14) в матричной форме [4]:

$$\begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11}(t) & F_{12}(t) \\ F_{21}(t) & F_{22}(t) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

или более компактно:  $R_0(t) = F(t)C_0$ , где  $R_0(t)$  – матрица функций изменения компонент природно-техногенного риска без учёта внешних воздействий системы (14);  $F(t)$  – матрица системы (15);  $C_0$  – матрица коэффициентов системы (14).

В таком случае частное решение системы (1), соответствующее нахождению матрицы  $\tilde{R}(t)$  функций изменения природно-техногенного риска вследствие влияния на ПТС внешних воздействий со стороны природной среды и техносферы, будем искать на основании следующего соотношения [8]:

$$\tilde{R}(t) = F(t) \int F^{-1}(t) L(t) dt, \quad (17)$$

где  $F^{-1}(t)$  – матрица, обратная матрице  $F(t)$ ;  $L(t)$  – матрица изменений внешних природно-техногенных воздействий на природно-техническую систему.

Построим матрицу  $F^{-1}(t)$ , для этого найдём определитель матрицы  $F(t)$ :

$$\Delta = \begin{vmatrix} F_{11}(t) & F_{12}(t) \\ F_{21}(t) & F_{22}(t) \end{vmatrix} = F_{11}(t)F_{22}(t) - F_{21}(t)F_{12}(t) = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{b_1} \cdot e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (18)$$

Матрица алгебраических дополнений  $\bar{F}(t)$  для матрицы  $F(t)$  будет иметь следующий вид:

$$\bar{F}(t) = \begin{pmatrix} \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_2 t} & -\frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_1 t} \\ -e^{\lambda_2 t} & e^{\lambda_1 t} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Тогда матрица, транспонированная по отношению к матрице (19) записывается как:

$$F^T(t) = \begin{pmatrix} \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_2 t} & -e^{\lambda_2 t} \\ -\frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_1 t} & e^{\lambda_1 t} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Определим с учётом (20) подынтегральную функциональную матрицу  $U(t)$ :

$$U(t) = F^{-1}(t) \times L(t) = \frac{1}{\Delta} \times \begin{pmatrix} \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_2 t} & -e^{\lambda_2 t} \\ -\frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_1 t} & e^{\lambda_1 t} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} L_1(t) \\ L_2(t) \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Рассмотрим функционально подобное воздействие на ПТС вида (13).

Подобные виды воздействий описывают проявления подвижек, возникающих в геологической среде и приводящих к возникновению катастрофических сейсмических событий, наблюдаемых на территориях районного, локального и “точечного” масштабного уровней [9]. Такие виды воздействий характеризуются внезапными аварийными ситуациями на объектах техносферы, например, взрывами оборудования, обрушениями зданий, сооружений, конструкций различного вида [10].

В этом случае матрица изменений внешних природно-техногенных воздействий на ПТС имеет вид:

$$L(t) = \left( L^{(0)}(t) \right)' = \begin{pmatrix} L_1^{(0)}(t) \\ L_2^{(0)}(t) \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} \xi_1 - \eta_1 t \\ \xi_2 - \eta_2 t \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} -\eta_1 \\ -\eta_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Определим компоненты матрицы  $U(t)$ :

$$u_1(t) = \frac{b_1}{(\lambda_2 - \lambda_1) e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t}} \times \left[ \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} e^{\lambda_2 t} L_1(t) - e^{\lambda_2 t} L_2(t) \right] = \frac{[(\lambda_2 - a_1)L_1(t) - b_1 L_2(t)] e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (23)$$

По аналогии получим выражение для  $u_2(t)$ :

$$u_2(t) = \frac{[b_1 L_2(t) - (\lambda_1 - a_1)L_1(t)] e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (24)$$

Проинтегрировав выражения (23) и (24), получим следующие функции:

$$\begin{cases} \chi_1(t) = \int u_1(t) dt = \frac{[-b_1 \eta_2 + (\lambda_2 - a_1) \eta_1] e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_1)} + \tilde{C}_1, \\ \chi_2(t) = \int u_2(t) dt = \frac{[-(\lambda_1 - a_1) \eta_1 + b_1 \eta_2] e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} + \tilde{C}_2, \end{cases} \quad (25)$$

где  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$  – постоянные коэффициенты, учитывающие изменения природных и техногенных воздействий на ПТС в начальный момент времени.

Учитывая (25), раскроем соотношение (17):

$$\tilde{R}(t) = F(t) \times \chi(t) = \begin{pmatrix} F_{11}(t) & F_{12}(t) \\ F_{21}(t) & F_{22}(t) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \chi_1(t) \\ \chi_2(t) \end{pmatrix}. \quad (26)$$

В итоге, после ряда преобразований получим выражения для функций изменения природного и техногенного риска в ПТС:

$$\begin{cases} \bar{r}_1(t) = D_1 e^{\lambda_1 t} + D_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} [(\lambda_1 + \lambda_2 - a_1)\eta_1 - b_1 \eta_2], \\ \bar{r}_2(t) = \frac{(\lambda_1 - a_1)}{b_1} D_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{(\lambda_2 - a_1)}{b_1} D_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{1}{b_1 \lambda_1 \lambda_2} [a_1 b_1 \eta_2 + (\lambda_1 - a_1)(\lambda_2 - a_1)\eta_1], \end{cases} \quad (27)$$

где  $D_1 = C_1 + \tilde{C}_1$ ;  $D_2 = C_2 + \tilde{C}_2$ .

## Результаты

Таким образом, в статье обоснована и реализована новая математическая модель оценки природно-техногенного риска, возникающего в природно-технических системах под влиянием функционально подобных воздействий (воздействий, влияние которых на ПТС со стороны природных и техногенных факторов описываются функциональными зависимостями одного вида). Представленная модель характеризуется линейным видом воздействий, отражающих внезапно возникающие угрозы. Приведено решение системы дифференциальных уравнений, описывающих эту модель. Необходимо отметить, что модель легко адаптируема к учету воздействий иного вида, в частности, медленно надвигающиеся земные катастрофы.

## Библиографический список

1. **Минаев, В.А.** Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев. – М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. – 370 с.
2. **Шойгу, С.К.** Катастрофы и государство / С.К. Шойгу, Ю.Л. Воробьев, В.А. Владимиров. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 160 с.
3. **Абрамова, А.В.** Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях: монография / А.В. Абрамова [и др.]; под ред. К.М. Бондаря, В.А. Минаева, А.О. Фаддеева; Дальневосточный юридический институт МВД России. – Хабаровск: ДВЮИ МВД России, 2014. – 124 с.
4. **Арнольд, В.И.** Обыкновенные дифференциальные уравнения / В.И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2012. – 344 с.
5. **Агафонов, С.А.** Обыкновенные дифференциальные уравнения / С.А. Агафонов, Т.В. Муратова. – М.: Academia, 2018. – 352 с.
6. **Демидович, Б.П.** Дифференциальные уравнения / Б.П. Демидович, В.П. Моденов. – СПб.: Лань, 2006. – 288 с.

7. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 576 с.
8. Минаев, В.А. Моделирование и оценка геодинамических рисков / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Н.А. Кузьменко. – М.: «РТСофт» – «Космоскоп», 2017. – 256 с.
9. Минаев, В.А. Геодинамические риски и строительство. Математические модели / В.А. Минаев [и др.] – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 208 с.
10. Минаев, В.А. Методика оценки геоэкологического риска и геоэкологической безопасности ландшафтно-территориальных комплексов / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев // Материалы семнадцатой научно-технической конференции “Системы безопасности - 2008”. 30 октября 2008. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 96-102.

V. A. Minaev<sup>1</sup>, A. O. Faddeev<sup>2</sup>, R. O. Stepanov<sup>1</sup>, D. S. Grachev<sup>3</sup>

### DYNAMIC MODEL OF ASSESSMENT NATURAL AND TECHNOGENIC RISK: GENERAL SOLUTIONS

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow

<sup>2</sup>Academy of the Federal Penitentiary Service of Russia, Ryazan

<sup>3</sup>Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Moscow

**Goal.** Creation of dynamic model for assessing natural and technogenic risk.

**Main results. Scientific novelty.** The general view of the risk assessment model in the natural and technogenic system (NTS) based on the account of the natural and technogenic factors influences on it is considered. A general system solution of differential equations describing the model is found. An example of using the model to assess natural and technogenic risk is considered in the case when NTS are functionally similar external natural and technogenic influences, which are understood as their type, in which the effects are described by the same functional dependencies. In particular, we consider the influences of a linear type, which describes changes that occur in the geological environment and lead to the occurrence of catastrophic seismic events observed in the territories of the region, local and “point” scale levels. These types of influences are characterized by sudden emergencies at technosphere objects: explosions of equipment, collapses of buildings, structures, and structures.

**Practical significance.** The model allows us to study various options for the influences of natural and man-made impacts on PTS. The simulation results are necessary to justify measures to prevent natural and technogenic threats on territories of various scale levels.

**Keywords:** modeling, differential equations, estimation, natural and technogenic risk, catastrophic seismic events.

В.А. Минаев<sup>1</sup>, К.М. Бондарь<sup>2</sup>, Е.В. Вайц<sup>1</sup>, Ю.В. Грачева<sup>1</sup>

## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕТЕВОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЕРРОРИЗМУ И ЭКСТРЕМИЗМУ СИЛОВЫМИ СТРУКТУРАМИ

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>Дальневосточный юридический институт МВД России, г. Хабаровск

**Цель.** Создание аналитических инструментов на базе системы имитационных моделей для всестороннего обеспечения информационно-аналитической деятельности силовых структур в сетевом противодействии терроризму и экстремизму.

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Предлагаемые модели комплексно описывают процессы проведения операций по информационному воздействию в социальных сетях и противодействия им, адаптируемы к более глубокой детализации исследуемых процессов, позволяют наглядно их изучать, обосновывать варианты управленческих решений, проводить в имитационном режиме обучение персонала силовых структур, осуществляющих борьбу с терроризмом и экстремизмом.

**Практическая значимость.** Коэффициент объясняемости разработанных моделей превышает 90 %. Результаты моделирования необходимы для обоснования мероприятий по противодействию информационному терроризму и экстремизму в социальных сетях.

**Ключевые слова:** информационное воздействие, терроризм, экстремизм, моделирование, информационно-аналитическое обеспечение силовых структур.

### Введение

При обеспечении национальной безопасности исключительно важна организация мероприятий, противостоящих информационно-техническим и информационно-психологическим воздействиям в социальных сетях, отнесенных в Доктрине информационной безопасности Российской Федерации [1] к числу основных угроз. Это в полной мере относится к информационным воздействиям на индивидуальное, групповое и общественное сознание террористической и экстремистской направленности.

По мнению экспертов, определяющее значение в процессе эффективного противодействия опасным деструктивным сетевым влияниям на общество наибольший потенциал имеет государство. В первую очередь, оно реализуется посредством специальной деятельности таких силовых структур, как ФСБ России, МВД России, Прокуратура России.

При этом необходимо качественное совершенствование информационно-аналитического обеспечения силовых структур, направленного на создание принципиально новых инструментов, позволяющих осуществлять наглядное происходящих сложных сетевых процессов, обосновывать варианты принимаемых решений, в имитационном режиме обучать персонал подразделений, осуществляющих борьбу с терроризмом и экстремизмом [2-4].

Актуальность совершенствования информационно-аналитического обеспечения силовых структур в их деятельности по борьбе с информационным терроризмом и экстремизмом определяется:

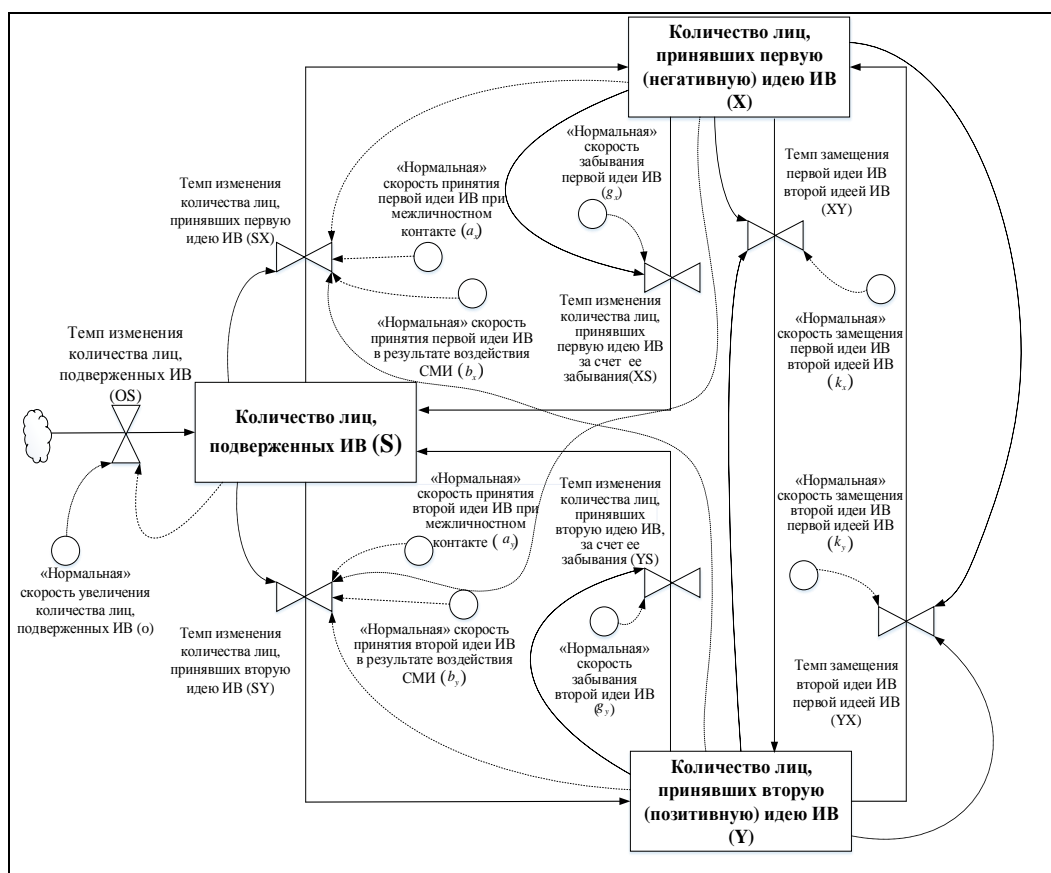
– тенденцией расширения сферы информационного воздействия со стороны террористических и экстремистских групп на различные социальные слои. Указанные

группы способны не только распространять экстремистские материалы, но проводить целенаправленную и достаточно массовую вербовку новых членов организаций, организовывать обезличенные и немалые финансовые потоки, массовые рассылки с помощью специальных приложений и т.д. В числе довольно значимых по объемам и разнообразию источников деструктивной информации выступают, например, специализированные медиа-агентства, центры, сайты: «Аль-Фуркан», «Итисаам», «Айнад», «Аль-Хайят», «Халифат. Исламское государство. Информационный сайт». МВД России отслеживает более двух тысяч подобных сайтов [10];

– развитием антагонистического противоборства деструктивных информационных источников, поддерживающих терроризм и экстремизм и государственных структур. Это приводит к необходимости разработки новых моделей, методов, аппаратного обеспечения для осуществления сетевого мониторинга разнообразных информационных ресурсов. Основными целями такого мониторинга выступают: выявление материалов террористической и экстремистской направленности, лидеров террористических и экстремистских группировок, ключевых узлов для реализации развала сетевых структур и т.д.

### Системное моделирование информационных операций

Методологической базой для указанных направлений совершенствования информационно-аналитического обеспечения противодействия терроризму и экстремизму в социальных сетях избрано системно-динамическое моделирование (СДМ), достаточно хорошо апробированное [5-9]. Системная потоковая диаграмма комплексной системно-динамической модели информационного воздействия и противодействия в социальных сетях представлена на рисунке.



Системная потоковая диаграмма комплексной системно-динамической модели информационного воздействия и противодействия в социальных сетях

Для практической реализации системно-динамических моделей информационных воздействий и противодействий были собраны статистические данные о распространении различных информационных влияний в социальных сетях, а также данные различных опросов в социальных группах. Собственно имитационное моделирование осуществлялось на основе перспективной системы AnyLogic. Основные возможности комплекса моделей и имитационной платформы:

- «проигрывание» любого количества противоборствующих идей;
- наглядное визуальное наблюдение динамики исследуемых переменных, отражающих основные характеристики процессов информационного воздействия и противодействия в социальных сетях;
- обеспечение значительной вариабельности параметров во время моделирования для определения степени их влияния на изучаемые переменные.

Отметим, что СДМ позволяет гибко развивать базовые модели, например, учитывая факторы забывания информации, существования латентного периода, изменения размеров социальных групп, топологии взаимодействия в обществе, замещения идеи информационного воздействия на идею противоборствующей стороны, психологических характеристик членов оцениваемого социума, а также иных факторов, например, связанных с деятельностью силовых структур.

### Результаты и выводы

1. Системно-динамический подход к моделированию дает возможность комплексного учета информационных воздействий и противодействий в социальных сетях. Системно-динамические модели позволяют «проигрывать» любое количество противоборствующих идей, визуализировать динамические изменения исследуемых переменных, обеспечивать различные виды имитационных экспериментов.

2. Базовая системно-динамическая модель гибка для развития с целью учета факторов забывания информации, существование латентных периодов, изменения размеров исследуемых социальных групп, топологии взаимодействия в группе, замещение идеи информационного воздействия на идею противоборствующей стороны, психологических характеристик членов оцениваемого социума и т.д.

3. Развитие информационных источников, поддерживающих терроризм и экстремизм, приводит к необходимости разработки новых моделей, методов, аппаратного обеспечения для осуществления мониторинга социальных сетей. Основными целями такого мониторинга выступают: выявление материалов террористической и экстремистской направленности, лидеров террористических и экстремистских группировок, ключевых узлов для реализации развала сетевых структур и т.д.

### Библиографический список

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: Утв. Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646. URL: <http://base.garant.ru/71556224>.

2. Деятельность правоохранительных органов по противодействию экстремизму и терроризму: материалы всероссийского круглого стола (г. Казань, 30 ноября 2017 г.) / Под ред. С.Н. Миронова. Казань: Казанский юридический институт МВД России, 2017. – 160 с.

3. **Богданов, А.В.** Особенности противодействия киберпреступности подразделениями уголовного розыска: учебно-методическое пособие / А.В. Богданов, И.А. Завьялов, И.И.



Ильинский; под ред. Б.П. Михайлова, Е.Н. Хазова.- М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2016. -152 с.

4. **Голубых, Н.В.** Деятельность органов внутренних дел по противодействию экстремизму и терроризму: научно-практическое пособие / Н.В. Голубых, П.Е. Суслонов, В.А. Чашников, Д.Л. Кокорин. - Екатеринбург: Изд-во Уральского юридического института МВД России, 2008. – 52 с.

5. **Минаев, В.А.** Как управлять массовым сознанием: современные модели: монография / В.А. Минаев, А.С. Овчинский, С.В. Скрыль, С.Н. Тростянский. - М.: Изд-во РосНОУ, 2013. – 200 с.

6. **Минаев, В.А.** Моделирование информационных воздействий в сфере борьбы с терроризмом и экстремизмом в социальных сетях / В.А. Минаев [и др.] // Материалы XXVI Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017». М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 36–38.

7. **Минаев, В.А.** Моделирование противодействия терроризму и экстремизму в информационной сфере / В.А. Минаев, М.И. Купцов, Е.В. Вайц, А.Э. Киракосян // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2017. № 4. – С. 107–122.

8. **Минаев, В.А.** Социальные сети: моделирование динамики распространения манипулятивных воздействий / В.А. Минаев, Е.В. Вайц, А.Э. Киракосян, В.В. Умеренков // Информация и безопасность. 2018. Т. 21. № 4. – С. 594–599.

9. **Бондарь, К.М.** Системно-динамическое моделирование сетевых информационных операций / К.М. Бондарь, Е.В. Вайц, В.А. Минаев, М.П. Сычев // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. – С. 20–39. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.020-039>.

10. МВД отслеживает более двух тысяч сайтов на предмет экстремизма. URL: <https://ria.ru/society/20160530/1440611782.html#ixzz4A7jkiHjK> (Дата обращения: 15.02.2020).

**V.A. Minaev<sup>1</sup>, K.M. Bondar<sup>2</sup>, E.V. Vaitz<sup>1</sup>, Yu. V. Gracheva<sup>1</sup>**

## **INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT FOR NETWORK COUNTERACTION TO TERRORISM AND EXTREMISM BY LAW ENFORCEMENT AGENCIES**

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow

<sup>2</sup> Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Khabarovsk

**Goal.** Creation of analytical tools based on a system of simulation models to provide information and analytical activities of law enforcement agencies in the network counteraction to terrorism and extremism.

**The main results of modeling and their scientific novelty.** The proposed models describe the processes of conducting operations on information influence in social networks and counteracting them, are adapted to a deeper detail of the studied processes, allow them to be studied visually, justify options for management decisions, and conduct training in a simulated mode of personnel of law enforcement agencies engaged in the fight against terrorism and extremism.

**Practical significance.** The coefficient of explainability of the created models exceeds 90 %. The results of the simulation are necessary to justify measures to counteract information terrorism and extremism in social networks.

**Key words:** informational influences, terrorism, extremism, modeling, informational and analytical support of law enforcement agencies.

В.А. Минаев, Е.В. Вайц, Е.А. Погорелко, А.М. Кузнецов

## УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Рассмотрен проект учебно-лабораторного комплекса и цикла лабораторных работ для решения задач современного образовательного процесса в области технической защиты информации. Отсутствие у студентов практики в перехвате информации по техническим каналам утечки не позволяет получить достаточное представление о возможностях аппаратуры разведки, принципах формирования технических каналов утечки информации, важности работы по технической защите информации ограниченного доступа. Учебно-лабораторный комплекс предусматривает отработку практических навыков по защите и оценке защищенности речевой информации от утечки за счет недостаточной звуко- и виброизоляции помещений, акустоэлектрических преобразований в технических средствах, а также телекоммуникационной информации от утечки по каналу побочных электромагнитных излучений и наводок.

**Ключевые слова:** техническая защита информации, утечки информации, технический канал, учебно-лабораторный комплекс, побочные электромагнитные излучения, акустоэлектрические преобразования.

### Введение

На сегодняшний день одной из актуальнейших проблем образовательного процесса в области технической защиты информации (ТЗИ) является недостаточное практическое знакомство студентов с возможностями аппаратуры разведки, отсутствие навыков перехвата информации. Это, в свою очередь, обуславливает непонимание важности защиты информации от утечки по техническим каналам (ТКУИ), отсутствие знаний физических принципов формирования ТКУИ. Поэтому выпускники высших учебных заведений, как правило, способны, используя методические пособия, решать только стандартные задачи защиты информации. В целях выработки у студентов практических навыков и опыта необходимо создание современного учебно-лабораторного комплекса, позволяющего продемонстрировать как возможности перехвата информации по исследуемым ТКУИ, так и методы ее защиты от утечки по этим каналам.

Именно эта задача определила цель создания специального учебно-лабораторного комплекса (УЛК) для демонстрации обучающимся процесс формирования каналов утечки информации, возможностей аппаратуры разведки, проведения оценки защищенности объектов, а также осуществления исследований по направлению технической защиты информации.

### Технические каналы утечки информации

Под **техническим каналом утечки информации (ТКУИ)** понимают комплекс, состоящий из источника информации, линии связи (физической среды), по которой распространя-

ется информационный сигнал, генераторов шумов, препятствующих передаче сигнала по линии связи, и технических средств перехвата информации.

Источниками информации могут быть непосредственно голосовой аппарат человека, излучатели систем звукоусиления, печатный текст, радиопередающие устройства и т.п.

В зависимости от физической природы возникновения информационных сигналов, а также среды их распространения и способов перехвата, технические каналы утечки информации подразделяются на *электромагнитные, электрические, параметрические, акустические, вибрационные, акустоэлектрические, оптико-электронные* [1].

**Объект информатизации** – общее наименование защищаемого от утечки информации объекта [2].

**Специальное исследование (СИ)** - общее наименование комплекса мероприятий по оценке защищённости «объекта информатизации». Мероприятия включают выявление имеющихся ТКУИ, измерение физических величин (сигналов) и расчёт значений показателей защищённости по методикам, установленным соответствующими нормативными документами [2]. Наибольший интерес с точки зрения наглядности демонстрации в рамках лабораторных работ представляют ТКУИ, представленные в табл. 1.

**Таблица 1**

**Технические каналы утечки информации**

№ п/п	Наименование	Группа	Принцип формирования
1.	Побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ)	Электромагнитные	Параметры электрического тока (амплитуда, частота либо фаза) изменяются по закону изменения информационного сигнала. При прохождении электрического тока вокруг токоведущих элементов возникают электрическое и магнитное поля, модулированные информационным сигналом
2.	Наводки электромагнитных излучений	Электрические	При излучении элементами технических средств информационные сигналы могут наводиться в слаботочных соединительных линиях (сети пожарной и охранной сигнализации, телефонные кабели), линиях электропитания
3.	Высокочастотное облучение (ВЧО)	Параметрические	Переотраженная часть высокочастотного электромагнитного поля может на некоторых технических средствах модулироваться акустическим сигналом
4.	Высокочастотное навязывание (ВЧН)	Параметрические	На техническое средство по кабельным линиям воздействуют высокочастотным сигналом, который на некоторых технических средствах может быть промодулирован акустическим сигналом и излучен в виде электромагнитного поля
5.	Акустический речевой	Акустические	Средой распространения речевых сигналов является воздух, и для их перехвата используются высокочувствительные направленные микрофоны
6.	Виброакустический	Вибрационные	Средой распространения речевых сигналов являются ограждающие строительные конструкции помещений (стены, потолки, полы) и инженерные коммуникации (трубы водоснабжения, отопления, вентиляции и т.п.), колебания которых модулируются в соответствии с изменениями воздействующего на них акустического поля

7.	Низкочастотный акустоэлектрический преобразователь (НЧ АЭП)	Акусто-электрические	Некоторые элементы технических средств обладают свойством изменять свои параметры под действием акустического поля, что приводит к модуляции токов, протекающих по этим элементам в соответствии с изменениями воздействующего акустического поля
8.	Оптико-электронный (лазерный)	Оптико-электронные	Образуется при облучении лазерным лучом вибрирующих под действием акустического речевого сигнала отражающих поверхностей помещений. Отраженное лазерное излучение модулируется по амплитуде и фазе акустическим сигналом

### Лабораторные работы

Важнейшей частью УЛК являются лабораторные работы, представленные в табл. 2. При разработке курса лабораторных работ применен следующий подход: сначала студент знакомится с принципом формирования ТКУИ в рамках работы по перехвату информации по исследуемому каналу [3], затем анализирует методы нейтрализации обнаруженного канала утечки в рамках работы по оценке защищенности объекта информатизации или проведения специального исследования технического средства. Таким образом, студент изучает взаимодействие с физическими средами, коммуникациями и их характеристиками для формирования каналов утечки информации. Это позволяет обучающимся понять принципы оценки защищенности каналов, методы построения систем защиты информации.

Таблица 2

#### Перечень лабораторных работ

№ п/п	Название лабораторной работы	Исследуемый ТКУИ	Содержание лабораторной работы	Используемые стенды
1.	Перехват речевой информации по оптико-электронному каналу	Оптико-электронный (лазерный)	Перехват акустического сигнала с помощью средств анализа модулированного колебаниями стекла лазерного луча по прямому и диффузному отражению	«Окно»
2.	Оценка защищенности оптико-электронного канала		Оценка разборчивости речи при прямом и диффузном отражении, а также эффективности активных средств защиты	«Окно»
3.	Перехват информации по каналу ВЧО	ВЧО	Знакомство с устройством эндовибратора, демодуляция переизлученного электромагнитного поля	«Предмет интерьера»
4.	Перехват информации по каналу ВЧН	ВЧН	Перехват акустического сигнала с помощью средств анализа модулированного электромагнитного поля	«Телефонная сеть»
5.	Оценка защищенности параметрических каналов	ВЧО и ВЧН	Оценка глубины модуляции электромагнитного поля, анализ получаемой разборчивости речи	«Предмет интерьера», «Телефонная сеть»

6.	Обнаружение эффекта АЭП, демодуляция речевого сигнала	НЧ АЭП	Знакомство с микрофонным эффектом, исследования эффекта АЭП в телефонных аппаратах, извещателях пожарной сигнализации, перехват информации при контактном и бесконтактном подключении к слаботочным коммуникациям	«Телефонная сеть», «Система пожарной охраны»
7.	Оценка защищенности канала НЧ АЭП		Оценка разборчивости речи, полученной при демодуляции токов с различных технических средств, исследование эффективности активных и пассивных методов защиты	
8.	Перехват речевой информации по акустическому речевому и виброакустическому каналам	Акустический речевой	Прослушивание речевой информации, перехваченной с помощью направленных микрофонов, акселерометров	«Дверь», «Окно», «Воздуховод системы вентиляции»
9.	Оценка защищенности акустического речевого и виброакустического каналов	Акустический речевой и виброакустический	Исследование звуко- и виброизоляции различных преград (дверь, окно, стена и т.д.), оценка защищенности речевой информации при использовании пассивных и активных средств защиты	«Перегородка», «Дверь», «Окно», «Воздуховод системы вентиляции»
10.	Перехват изображения по излучению видеоинтерфейса VGA	ПЭМИ	Наглядная демонстрация возможности перехвата изображения по средствам SDR приемника	«Средство вычислительной техники»
11.	Проведение СИ технического средства на наличие ПЭМИ		Обнаружение эффекта ПЭМИ, расчет размеров зоны, в пределах которой возможен перехват информативного сигнала	
12.	Оценка защищенности по каналу ПЭМИ		Измерение затухания электромагнитных волн в пространстве, при прохождении через различные преграды, анализ эффективности экранирования, генераторов шума	
13.	Измерение затухания в кабельных линиях	Наводки электромагнитных излучений	Оценка защищенности технических средств от утечки информации в результате наводок информативного электромагнитного сигнала на цепи электропитания и слаботочные коммуникации, исследование эффективности активных методов защиты	«Система электропитания «Телефонная сеть»

## Практическая часть

Для проведения указанных в табл. 2 лабораторных работ разработаны стенды, подробно описанные в табл. 3. Созданные стенды обеспечивают возможность имитации перехвата информации, доступность коммуникаций и наличие мест установки измерительного оборудования для проведения оценки защищенности информации, средств активной защиты. Все стенды размещаются в одном помещении.

*Таблица 3*

**Описание стендов**

№ п/п	Название стенда	Описание стенда
1.	«Перегородка»	Общая звукоизоляция перегородки не менее 44 дБ в диапазоне частот 100 Гц – 10 кГц. В конструкции перегородки предусматриваются две зоны, в которых звукоизоляция снижена до значений, не превышающих 25-30 дБ, что обеспечивает образование потенциального виброакустического канала утечки
2.	«Дверь»	Материалы и конструкция двери выбраны таким образом, чтобы одно дверное полотно в закрытом состоянии обеспечивало звукоизоляцию в диапазоне частот 100 Гц – 10 кГц не менее 30 дБ. Таким образом, при одном открытом дверном полотне потенциальный канал утечки образуется, при обоих закрытых – канал утечки нейтрализуется пассивными средствами [4]. Для демонстрации возможности противодействия каналу утечки активным методом над дверным проёмом устанавливается акустический излучатель (колонка)
3.	«Окно»	Для предотвращения утечки речевой информации по акустическому каналу остекление выполнено двойным. Разнос остеклений 100 мм. При этом коробка окна виброизолирована от перегородки, стеклопакеты закреплены в створках через виброизолирующие прокладки, что обеспечивает затухание воздушного шума не ниже 55 дБ [5]. Открытие одной створки обеспечивает утечку информации по акустическому речевому каналу. На плоскостях остекления устанавливаются вибровозбудители различных систем активной защиты (САЗ) типов А и Б, которые используются для обеспечения нейтрализации потенциального канала утечки
4.	«Воздуховод системы вентиляции»	Система выполнена с учётом безусловного образования акустического канала утечки [1] и удобства измерения в вентиляционном канале на всем его протяжении. Кроме того, конструкция воздуховода не нарушает звукоизоляцию перегородки, для этого стенки воздуховода обеспечивают звукоизоляцию не ниже 40÷50 дБ, один из торцов закрывается съёмной заглушкой с акустическим затуханием не менее той же величины, в просвете воздуховода смонтирован акустический излучатель (колонка) системы активной защиты (САЗ)
5.	«Предмет интерьера»	Стенд представляет из себя картину в раме. В подрамнике установлен эндовибратор с переизлучателем, что позволяет симитировать существование утечки информации по каналу ВЧО, осуществлять перехват речевой информации, обрабатываемой в помещении, где установлен стенд
6.	«Телефонная сеть»	В состав стенда входят: телефонный аппарат, находящийся в защищаемом помещении, телефонный аппарат за пределами контрольной зоны (КЗ), оборудование, имитирующее прослушивающие закладные устройства. Сеть выполнена с учётом образования каналов утечки информации за счет наводок от основных технических средств, возможности блокирования образующегося канала утечки активными и пассивными методами

7.	«Система пожарной охраны»	Стенд состоит из датчика дыма, пожарного извещателя и отходящих коммуникаций. Система выполнена с учётом безусловного образования акустоэлектрического канала утечки информации [6], возможности нейтрализации образующегося канала утечки активными средствами защиты
8.	«Средство вычислительной техники»	Система является имитатором реального объекта вычислительной техники, созданного с учетом необходимости исследования различных интерфейсов передачи информации, образующих канал утечки за счет ПЭМИ [7]. Стенд состоит из монитора, набора сменных интерфейсов передачи информации об изображении, системного блока в независимом от монитора корпусе
9.	«Система электропитания»	Стенд выполнен с учётом образования канала утечки информации за счет наводок от технических средств, удобства измерения на коммуникациях, блокирования образующегося канала утечки активными и пассивными методами

### Выводы

Проектные решения, реализованные в статье, позволяют создать прототип реального объекта информатизации, процессы хранения, обработки и передачи акустической и телекоммуникационной информации на котором подлежит защите. Разработанный проект УЛК дает возможность системно подойти к процессу подготовки специалистов по направлению технической защиты информации, учитывая существенно расширившиеся возможности демонстрации процесса и условий формирования ТКУИ, характеристик аппаратуры разведки, способов перехвата информации, оценки защищенности объектов информатизации, эффективности активных и пассивных мер защиты информации от утечки по техническим каналам.

### Библиографический список

1. **Бузов, Г.А.** Защита от утечки информации по техническим каналам: учеб. пособие / Г.А. Бузов, С.В. Калинин, А.В. Кондратьев. - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 416 с.
2. **Кондратьев, А.В.** Техническая защита информации. Практика работ по оценке основных каналов утечки / А.В. Кондратьев. - М.: Горячая линия-Телеком, 2016. – 304 с.
3. **Меньшаков, Ю.К.** Теоретические основы технических разведок / Ю.К. Меньшаков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 536 с.
4. **Сапожков, М.А.** Электроакустика: учебник для вузов / М.А. Сапожков. - М.: Связь, 1978. – 272 с.
5. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
6. **Хорев, А.А.** Способы и средства защиты информации / А.А. Хорев. - М.: МО РФ, 1998. – 316 с.
7. **Ярочкин, В.А.** Технические каналы утечки информации / В.А. Ярочкин. - М.: Ось-89, 1994. – 105 с.

V.A. Minaev, E.V. Vaitz, E.A.Pogorelko, A.M. Kuznetsov

**EDUCATIONAL AND LABORATORY COMPLEX FOR TRAINING  
SPECIALISTS IN TECHNICAL PROTECTION OF INFORMATION**

Bauman Moscow State Technical University

The project of an educational and laboratory complex and a cycle of laboratory works for solving the problems of the modern educational process in the field of technical protection of information is considered. The students' lack of practice in intercepting information through technical channels of leakage does not allow them to get a sufficient idea of the capabilities of the intelligence equipment, the principles of forming technical channels of information leakage, and the importance of working on technical protection of restricted access information. The training and laboratory complex provides for the development of practical skills to protect and assess the security of speech information from leakage due to insufficient sound and vibration isolation of devices, acoustoelectric transformations in vehicles, as well as telecommunications information from leakage through the channel of side electromagnetic radiation and interference.

**Keywords:** technical protection of information, information leaks, technical channel, educational and laboratory complex, side electromagnetic radiation, acoustoelectric transformations.



## НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань

Для создания аналитических моделей распространения информации, в том числе экстремистской направленности, в социальных сетях реализована специальная методика формирования выборочных статистических данных в сети «ВКонтакте». Исследованы статистические особенности изменения количества подписчиков социальных групп в зависимости от количества просмотров сайтов. Предложена классификация групп пользователей социальных сетей, определены их отличия и общие закономерности взаимопереходов. Сделан вывод о перспективности применения моделирования для дальнейшего развития исследования и научного обоснования мероприятий по противодействию распространения информации экстремистской направленности в социальных сетях.

**Ключевые слова:** социальная сеть, распространение информации, экстремизм, моделирование, статистическая особенность.

### Введение

Развитие информационных технологий, ресурсов, сетей привело к масштабным изменениям во всех сферах деятельности человека, привело к зарождению или исчезновению целых отраслей экономики, техники, культуры, направлений науки. Можно по-разному оценивать эти изменения, но, как правило, они являются полезными и улучшают жизнь человека. С другой стороны, имеется и негативный аспект указанного процесса. Это, в частности, относится к появлению компьютерной преступности, увеличению масштабов информационных войн, глобальному манипулированию массовым сознанием и другим отрицательным явлениям.

Технологии манипулирования массовым сознанием и ведения информационных войн в чём-то сродни рекламе: и там, и там формируется новая система приоритетов, видоизменяются цели, информация интерпретируется и предоставляется с выгодной стороны. Указанные технологии позволяют изменять оценку происходящего населением, создавать общественное мнение путём распространения специально подобранной и систематизированной информации, которая содержит, в том числе и искажение фактов. Противодействие негативным последствиям развития информационных технологий является важной функцией правоохранительных органов, а умение самостоятельно анализировать происходящие процессы и явления, не поддаваясь навязываемым целям и оценкам, - необходимая способность каждого человека, которую необходимо развивать [1].

Поэтому анализ, моделирование и прогнозирование распространения информации в социальных сетях, изучение статистических закономерностей этого процесса стали в наше время весьма актуальной задачей.

В работах [2-7] изучалась скорость распространения информации на достаточно коротком временном отрезке (как правило, в течение суток). Такой выбор характерного времени обу-

словлен его максимальной эффективностью для ускоренного «информационного охвата» пользователей социальных сетей в связи с очевидными сложностями в организации противодействия этому процессу.

В то же время, скорость распространения информации существенно зависит от того количества пользователей социальных сетей, которым она доступна, иначе говоря – от целевой аудитории. Поэтому отбор, формирование и расширение своей целевой аудитории – одна из главных предпосылок создания условий к быстрому распространению информации и, в частности, информации экстремистской и террористической направленности.

Формирование целевой аудитории, пропаганда тех или иных взглядов – процесс достаточно продолжительный во времени. Именно в ходе этого процесса появляются активные сторонники тех или иных идей, которые становятся не только носителями, но и пропагандистами своих взглядов. Преимущественно из этой среды появляются те, которые готовы нести свою «правду» и вне социальных сетей, переводя виртуальную дискуссию и рассуждения в практическую, подчас очень опасную деятельность на улицы городов и поселков.

Таким образом, изучение социальных сетей на продолжительных промежутках времени позволяет лучше понять глубинные закономерности распространения информации в них, позволяя обеспечить раннее реагирование на негативные тенденции в обществе.

Результаты настоящей статьи продолжают и развивают работы [2, 6, 7] в части изучения статистических закономерностей и особенностей распространения информации в социальных сетях в течение достаточно длительных промежутков времени (несколько суток и более).

### **Изучение информационных обменов в социальных сетях**

Для анализа статистических особенностей распространения информации в социальной сети «ВКонтакте» (VK), которую наиболее часто использует население России [8], все сообщества этой сети были разделены на четыре группы с условными названиями: маркетинговые, политические, блогерские и индивидуальные. Под индивидуальными сообществами, в первую очередь, понималось то множество личных аккаунтов, которые не имеют главной целью распространение той или иной информации, а являются средством личного общения и представления себя посредством социальных сетей.

Остальные три типа сообществ занимаются увеличением количества просмотров и подписчиков не столько для удовлетворения своих потребностей в общении и представлении себя в социальных сетях, сколько для получения экономической (маркетинговые и блогерские) или, например, электоральной (политические) выгоды. К маркетинговым группам нами отнесены те сообщества, которые продают в VK реальные товары и услуги, а к блогерским – те, которые занимаются увеличением просмотров своего контента для получения доходов от размещения в нем рекламы.

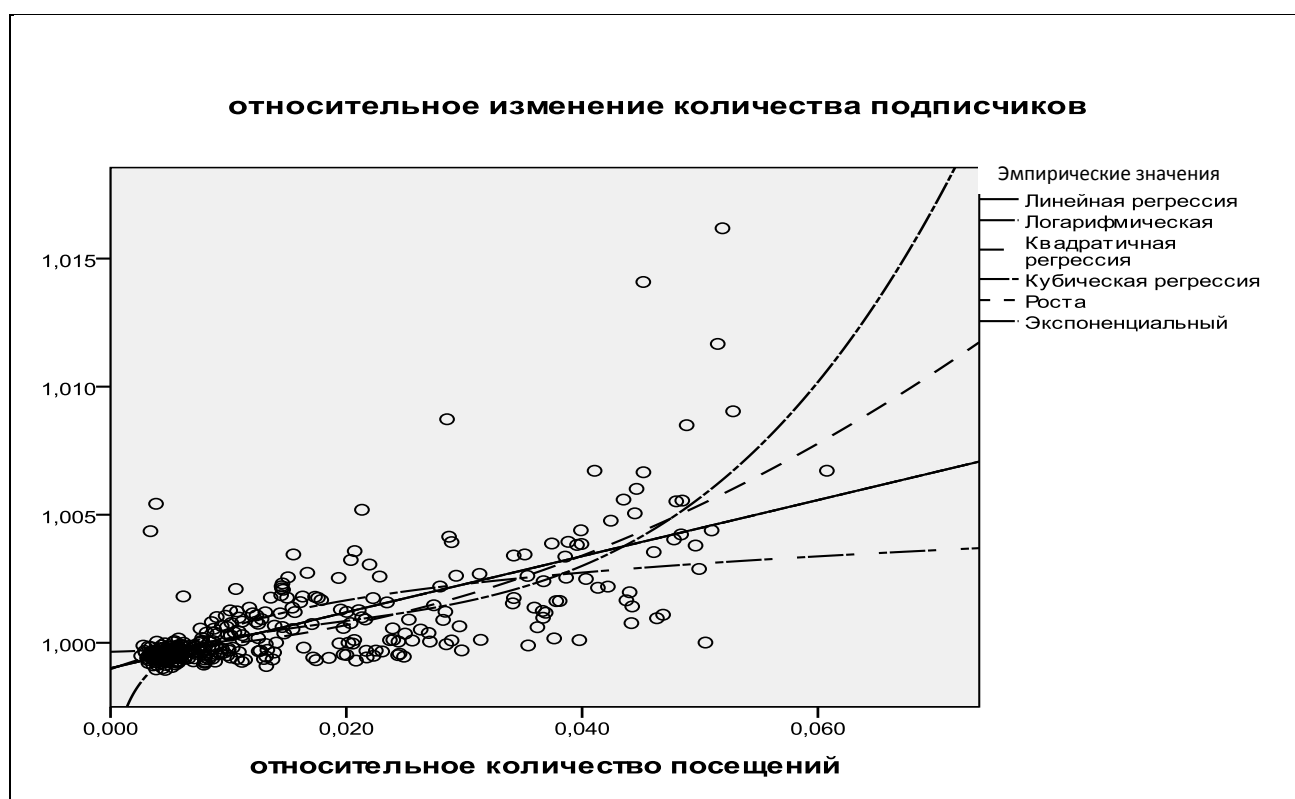
По отношению к сообществам VK каждого их участника можно отнести к одной из трёх групп: «посетитель», «подписчик», «активный сторонник». К «посетителям» отнесем тех пользователей, которые время от времени заходят на страницу сообщества, не являются подписчиками и не готовы предпринимать какие-либо активные действия в интересах сообщества вне социальной сети (например, не делать покупки, к которым призывает маркетинговое сообщество или не участвовать ни в каких реальных (не виртуальных) акциях в интересах политического сообщества), но в то же время поддерживающие идеи администраторов сообщества. «Подписчики» – по определению подписаны на страницу данного сообщества, а «активный сторонник» является покупателем продукции маркетингового сообщества, или

применительно к политическому сообществу участвует в реальных акциях, связанных с его идеями и идеологией.

Наиболее сложно и в то же время важно определение и прогнозирование количества «активных сторонников» той или иной идеи политического сообщества, поскольку именно они являются наиболее социально опасными и легко мобилизуемыми в случае, когда являются носителями экстремистских и террористических идей.

Авторами изучены по 30 сообществ, относящихся к каждой из трёх групп: маркетинговые, политические, блогерские. Индивидуальные сообщества по указанным соображениям не изучались. Была сформирована случайная выборка и организована выгрузка статистических данных по указанным группам.

Далее с помощью статистических пакетов “SPSS Statistics” и “Microsoft Excel” проведён анализ ежедневного изменения количества подписчиков в зависимости от ежедневного количества посещений сайтов сообществ (рис. 1).



**Рисунок 1. Зависимости между относительным изменением количества подписчиков и относительным количеством посещений**

В целом наблюдается тенденция – чем больше посещений, тем больше подписчиков. Но это – тривиальный вывод, ничего не дающий для качественных аналитических расчетов.

Изучение же статистической связи в виде значимых регрессионных уравнений (от линейных до экспоненциальных и логистических) между относительным изменением количества подписчиков и относительным количеством посещений позволяет констатировать, что на временных промежутках от 300 до 400 дней наблюдаются зависимости с коэффициентами детерминации до 0,6. В то время как на более коротких временных промежутках (50 – 100 дней) исследованные уравнения регрессий оказались статистически малозначимыми.

На наш взгляд, такая разница между устойчивостью статистических зависимостей на длинных и коротких временных отрезках связана с эффектом «привыкания» посетителей к

содержанию и стилю работы сайта, иными словами, нужно время для возникновения у посетителя сайта доверительного отношения к доставляющим контент. Об этом также может свидетельствовать следующий факт – обнаружено, что увеличение количества подписчиков при длинном временном промежутке связано с количеством просмотров без временного лага.

Из сказанного можно сделать следующий вывод – для более качественного и точного описания зависимости между относительным изменением количества подписчиков и относительным количеством посещений необходимо к ней подходить дифференцированно применительно к маркетинговым, политическим и блогерским сообществам.

Дальнейший анализ показал, что относительные изменения количества посещений в день на временных промежутках от 50 до 100 дней описываются преимущественно распределением, близким к нормальному (см., например, в таблице переменные  $V_8-V_{12}$ ). Отметим, что в табл. 1 переменные  $V_1-V_6$  - относительное количество подписчиков для различных сообществ, а переменные  $V_7-V_{12}$  - относительное количество посещений для этих же сообществ.

В то же время, на промежутках от 100 дней и более не удалось доказать соответствие эмпирических распределений нормальному, равномерному или экспоненциальному распределениям. Более того, эмпирические распределения относительного изменения количества посещений в день существенно отличаются от равномерного и экспоненциального распределений и в случае более коротких временных периодов (до 100 дней).

### Сравнение эмпирических распределений с нормальным распределением

Переменная		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$
Объём выборки		51	51	51	51	51	63	51	51	51	51	51	63
Параметры норм. распр.	Сред.	,99 98	,99 99	1,0 001	1,0 008	1,0 014	1,0 027	,00 67	,00 49	,00 84	,01 35	,02 29	,03 91
	$\sigma$	,00 083	,00 063	,00 086	,00 179	,00 308	,00 258	,00 273	,00 128	,00 268	,00 424	,00 774	,00 860
Статистика Z													
Колмогорова - Смирнова		2,3 58	1,3 50	1,6 31	1,2 40	1,8 28	,91 3	1,4 77	,69 4	,94 0	,66 9	,90 8	,49 6
Асимпт. знач. (двухсторонняя)		0,0 00	0,0 52	0,0 10	0,0 92	0,0 03	0,3 76	0,0 26	0,7 21	0,3 40	0,7 63	0,3 82	0,9 66

Для относительного количества подписчиков не удалось установить соответствия эмпирических распределений нормальному, равномерному или экспоненциальному (см., например, табл. 1, переменные  $V_1, V_3, V_5$ ). В качестве исключения отметим кратковременный период соответствия нормальному распределению переменной  $V_6$  в табл. 1.

### Выводы

Предложенная классификация сообществ в социальной сети «ВКонтакте» с выделением характерных особенностей каждой из выделенных групп позволяет охарактеризовать раз-

личные уровни и факторы, а также статистические закономерности вовлеченности интернет-пользователей в эти сообщества.

Выявление статистически обоснованных регрессионных уравнений связей между относительным изменением количества подписчиков и относительным количеством посещений и нормальность распределения последних дает возможность создания имитационных моделей распространения информации в социальных сетях на основе «проигрывания» различного сочетания параметров – математического ожидания и дисперсии.

Следующий шаг в исследованиях связан с более глубоким изучением факторов, влияющих на распространение информации в социальных сетях. К ним, в первую очередь, относятся:

- дифференциация статистических исследований применительно к маркетинговым, политическим и блогерским сообществам;
- более детальное изучение устойчивости статистических зависимостей на длинных и коротких временных отрезках;
- сочетание статистического анализа структуры выделенных сообществ с имитационным моделированием динамики переходов между их группами с учетом латентных (ненаблюдаемых) состояний.

#### Библиографический список

1. Информатика и информационные технологии в профессиональной деятельности / Под ред. В. П. Корячко, М. И. Купцова. Рязань: Академия ФСИН России, 2016. – 355 с.
2. **Минаев, В.А.** Моделирование противодействия терроризму и экстремизму в информационной сфере / В.А. Минаев, М.И. Купцов, Е.В. Вайц, А.Э. Киракосян // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2017. № 4. – С. 107–122.
3. **Минаев, В.А.** Моделирование динамики информационно-психологических воздействий на массовое сознание / В.А. Минаев, С.В. Дворянкин // Вопросы кибербезопасности. 2016. № 5 (18). – С. 56–64.
4. **Минаев, В.А.** Обоснование и описание модели динамики информационно-психологических воздействий деструктивного характера в социальных сетях / В.А. Минаев, С.В. Дворянкин // Безопасность информационных технологий. 2016. Т. 23. № 3. – С. 40–52.
5. **Минаев, В.А.** Моделирование угроз информационной безопасности с использованием принципов системной динамики / В.А. Минаев, М.П. Сычев, Е.В. Вайц, Ю.В. Грачева // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. – С. 75–82.
6. **Minaev, V., Vaiz E., Kuptsov M., Yablochnikov S., Vidov S.** Modeling of information impacts on elements of onboard system // Conference Proceedings: 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (Russia, Moscow, 14-15 March 2018) – IEEE, 2018. – С. 1–5. DOI: 10.1109/SOSG.2018.8350621.
7. Yablochnikov S., Yablochnikova I., Minaev V., Kuptsov M., Vidov S., Shved V. System-dynamic modeling of information influences and co-operations // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2104, 2018. – С. 222–232.
8. **Селезнев, Р.С.** Социальные сети как феномен информационного общества и специфика социальных связей в их среде / Р.С. Селезнев, Е.И. Скрипак // Вестник КемГУ. 2013. № 2 (54). Т. 3. – С. 125–131.

**V. A. Minaev<sup>1</sup>, M. I. Kuptsov<sup>2</sup>**

**SOME STATISTICAL FEATURES  
OF INFORMATION EXCHANGE IN SOCIAL NETWORKS**

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow

<sup>2</sup>Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan

To create analytical models of information propagation, including extremist content, in social networks, a special method for forming sample statistical data in the “Vkontakte” network has been implemented. Statistical features of changes in the number of social groups subscribers depending on the number of site views are studied. The classification of social networks user’s groups is proposed, their differences and mutual transitions are determined. It is concluded that modeling is promising for further development of research and scientific justification of measures to counteract the propagation of extremist information in social networks.

**Keywords:** social network, propagation of information, extremism, modeling, statistical feature.

В.В. Меньших, Г.И. Зверев

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж

Эргатические системы нашли своё применение тех областях, где вмешательство оператора в работу является необходимым условием обеспечения их успешного функционирования. В таких системах значительная роль отводится взаимодействию человека и техники, поскольку такое взаимодействие может носить различный характер и сказываться на успешности обеспечения функциональных возможностей для решения поставленных перед системой задач.

Для эффективной работы систем и возможности оперативного решения возникающих нестандартных ситуаций в сложившихся условиях необходимо выбрать оптимальный вариант реструктуризации системы в условиях деструктивных воздействий для дальнейшего ее функционирования. Особенность указанной проблемы заключается в том, что эргатические системы управления в своей структуре могут содержать связи высокого порядка, то есть связи между двумя и более элементами.

В качестве структурно-параметрических моделей указанных систем в работе предлагается использовать взвешенные гиперграфы.

**Ключевые слова:** эргатические системы, взвешенные гиперграфы, схема ветвей и границ.

### Введение

Как известно, широкий класс задач решается только при участии человека в работе систем управления. Такие системы, функционирование которых невозможно без вмешательства человека-оператора, принято называть эргатическими [1].

Эргатические системы описанного вида включают в свою структуру элементы, обладающие набором альтернативных функций [2]. В каждом случае выполнение функций предполагает осуществление взаимосвязи между элементами (подмножествами элементов) системы. При этом важно отметить, что в некоторых системах могут возникать взаимосвязи не только двух, но и большего числа элементов [3].

Существуют различные причины снижения эффективности функционирования эргатических систем. Примером такого снижения может выступить внутреннее или внешнее деструктивное воздействие [4, 5], вызванное последствиями различного рода обстоятельств.

### Описание структурно-параметрических моделей и функциональных возможностей эргатических систем

Функционирование рассматриваемых эргатических систем определяется выбором одного из наборов альтернативных функций  $F$  элементов системы. При этом предполагается, что каждая функция элемента определяет, в том числе и совокупность его связей с другими элементами. Таким образом, наборы альтернативных функций должны быть согласованы: вы-

бор функции для одного элемента ограничивает возможности выбора функций для других элементов так, чтобы сохранялись их связи с данным элементом.

В этом случае в качестве структурно-параметрических моделей указанных систем целесообразно использовать взвешенные гиперграфы следующего вида [6]:

$$G(F) = (S, E(F), P, K(F)), \quad (1)$$

Эффективность функционирования системы характеризуется важностью (вкладом в общую эффективность системы) конкретных элементов системы  $s_i$  в зависимости от выбранной функции  $f_{it_i}$ .

Функциональные возможности системы в целом в таком случае можно оценить выражением [6]:

$$H(G(F), F, A(F)), \quad (2)$$

Данная функция монотонно возрастает по каждому ее аргументу.

### Постановка задачи выбора вариантов реструктуризации систем управления с многофункциональными элементами в условиях деструктивных воздействий

В процессе функционирования системы функциональные возможности отдельных элементов и/или взаимодействия между ними могут изменяться вследствие внешних или внутренних деструктивных воздействий [4], которые вызывают деформацию графовой модели системы. В этой связи возникает задача выбора вариантов реструктуризации систем управления с многофункциональными элементами в условиях деструктивных воздействий. Как описано авторами в [4], выделяется несколько типов деструктивных воздействий:

1. Выведение из строя или снижение функциональных возможностей одного или нескольких элементов системы;
2. Полное или частичное нарушение взаимосвязей между некоторыми элементами;
3. Комбинированное деструктивное воздействие.

Исходя из типа деструктивного воздействия выбирается тот вариант реструктуризации системы, в котором оценка эффективности работы будет максимальной.

### Оценка эффективности работы системы и ее последующая реструктуризация

Пусть имеется эргатическая система, структурно-параметрическая модель которой содержит два гиперребра и выглядит следующим образом, представленным на рис. 1.

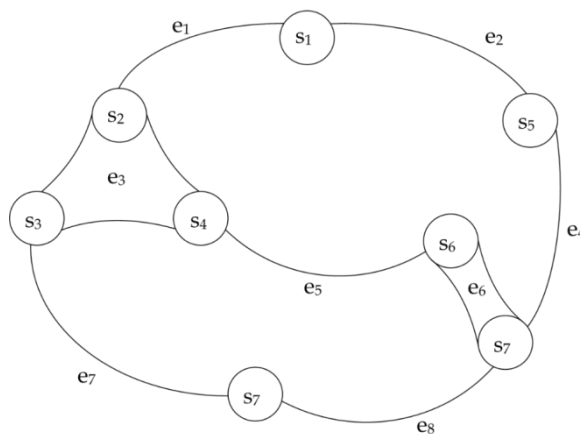


Рисунок 1. Структурно-параметрическая модель условной эргатической системы



Для каждого элемента системы задана таблица альтернативных функций. Также заданы веса элементов и связей, а также важности каждой из альтернативных функций. Обозначенные ранее данные представлены в табл. 1 – 3.

Таблица 1

Альтернативные функции элементов системы

$S_1$	$f_{11}$	$f_{12}$	$S_5$	$f_{51}$	$f_{52}$
$e_1$	0	1	$e_2$	1	1
$e_2$	1	0	$e_4$	1	0
$S_2$	$f_{21}$	$f_{22}$	$S_6$	$f_{61}$	$f_{62}$
$e_1$	1	0	$e_5$	0	1
$e_3$	1	1	$e_6$	1	1
$S_3$	$f_{31}$	$f_{32}$	$S_7$	$f_{71}$	$f_{72}$
$e_3$	1	1	$e_4$	1	0
$e_7$	1	0	$e_6$	1	1
$S_4$	$f_{41}$	$f_{42}$	$e_8$	0	1
$e_3$	1	1	$S_8$	$f_{81}$	$f_{82}$
$e_5$	1	0	$e_7$	1	0
			$e_8$	0	1

Таблица 2

Веса вершин и связей системы

$S_1$	4	$e_1$	2
$S_2$	4	$e_2$	1
$S_3$	1	$e_3$	6
$S_4$	2	$e_4$	3
$S_5$	4	$e_5$	2
$S_6$	2	$e_6$	5
$S_7$	3	$e_7$	3
$S_8$	6	$e_8$	2

Таблица 3

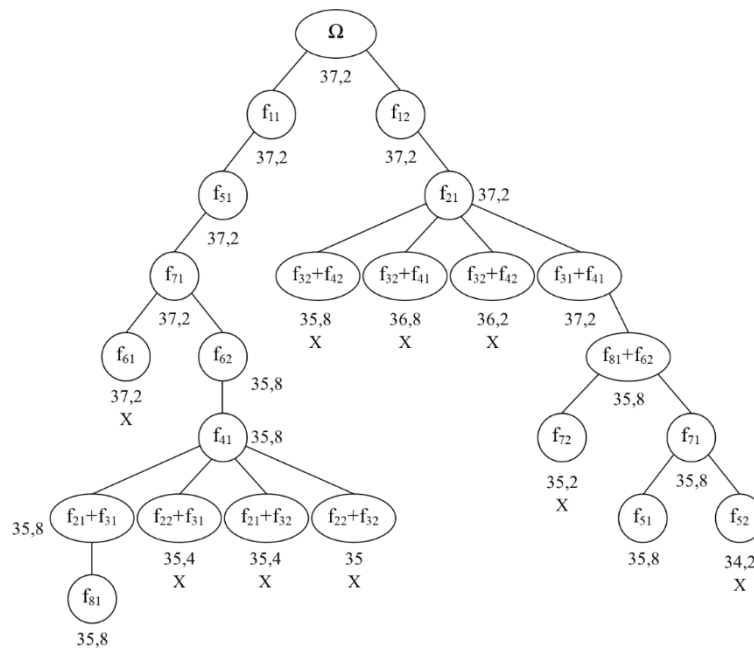
Важности альтернативных функций элементов системы

$f_{11}$	0,5	$f_{52}$	0,3
$f_{12}$	0,5	$f_{61}$	0,8
$f_{21}$	0,3	$f_{62}$	0,1
$f_{22}$	0,2	$f_{71}$	0,4
$f_{31}$	0,6	$f_{72}$	0,2
$f_{32}$	0,2	$f_{81}$	0,3
$f_{41}$	0,8	$f_{82}$	0,2
$f_{42}$	0,3	$f_{52}$	0,3
$f_{51}$	0,7	$f_{61}$	0,8

Оценка эффективности работы системы происходит по методу, описанному авторами в [7]. Для построения дерева решений необходимо найти значение вершины  $\Omega$ . Так,  $\alpha_{i_{\max}}(f_{i_i})$  находится из таблиц альтернативных функций и соответствует максимальному по важности

$f_{i_i}$  для каждого элемента системы. Как можно заметить из значений, представленных в табл. 2, для указанного примера значение  $\Omega = 37,2$ .

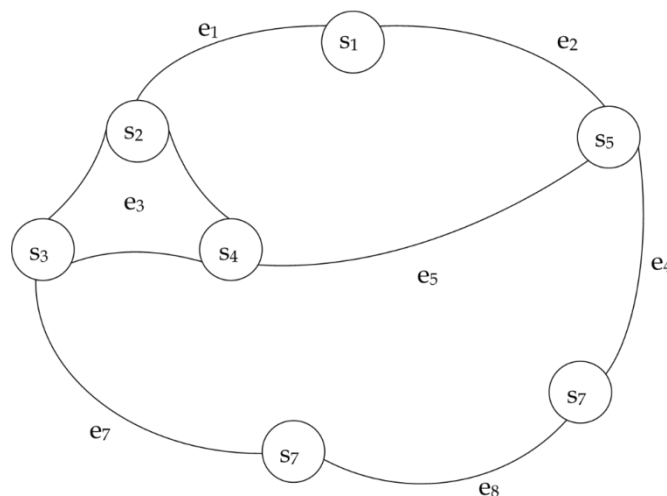
Нахождение оценки эффективности представлено на рис. 2.



**Рисунок 2. Нахождение оценки эффективности**

Из описанного метода делаем вывод, что для указанной системы выбран оптимальный набор функций элементов и эффективность системы равна 35,8.

Опишем ситуацию, при которой на систему производится деструктивное воздействие комбинированного вида. Пусть производится атака на элемент  $S_6$  и связь  $e_6$ . Далее необходимо по описанному ранее алгоритму рассмотреть все варианты реструктуризации системы и выбрать тот, в котором конечное значение эффективности будет максимальным. В данном случае после выбора оптимального варианта реструктурированная модель будет выглядеть следующим образом, представленным на рис. 2.



**Рисунок 3. Структурно-параметрическая модель условной эргатической системы после реструктуризации**

Для выбранной реструктурированной системы  $\Omega = 32,6$ , а эффективность с оптимальным набором функций элементов равна 31,1.

### Заключение

Дальнейшим развитием идей, изложенных в указанной статье, будет являться разработка методов оценки живучести эргатических систем рассмотренного вида при различных видах деструктивных воздействий на них.

### Библиографический список

1. **Малафеев, С. И.** Надежность технических систем. Примеры и задачи / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. – Москва : Горная книга, 2012. – 299 с.
2. **Меньших, В.В.** Моделирование коллективных действий сотрудников органов внутренних дел: монография / В.В. Меньших, А.Ф. Самороковский, Е.Н.Середа, В.В. Горлов.– Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2017. – 236 с.
3. **Menshikh, V. V.** Structural Parametric Modelling of an Information Analytical System / V. V. Menshikh, O. V. Pyankov. – Bulletin of the South Ural State University. Series «Mathematical modeling, Programming & Computer Software», 2016. – Vol. 9. – No. 1. – P. 105-113.
4. **Зверев, Г.И.** Об одном подходе к оценке живучести эргатических систем / Г.И. Зверев, В.В. Меньших // Информатика: проблемы, методология, технологии. Сборник материалов XIX международной научно-методической конференции (Воронеж, 14-15 февраля 2019 г.). – Воронеж, 2019. – С. 1138-1140.
5. **Зверев, Г.И.** Оценка эффективности функционирования эргатической системы при деструктивном воздействии // Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем» : сборник материалов. (Воронеж, 6 июня 2019 г.). – Воронеж, 2019. – С. 142-143.
6. **V. Menshikh and G. Zverev.** "Simulating the Evaluation of Survivability of Ergatic Systems Based on the Use of Weighted Hypergraphs," 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019, pp. 541-544.
7. **Зверев, Г.И.** Оптимизация выбора комбинации альтернативных функций многофункциональных элементов эргатических систем / Г.И. Зверев, В. В. Меньших // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. (Воронеж, 11-13 ноября 2019 г.). – Воронеж, 2019. – С. 807-809.

**V.V. Menshikh, G.I. Zverev**

### OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF OPTIONS OF RESTRUCTURING MANAGEMENT SYSTEMS WITH MULTIFUNCTIONAL ELEMENTS UNDER CONDITIONS OF DESTRUCTIVE INFLUENCES

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia

Ergatic systems have found their application in areas where operator intervention in the work is a prerequisite for ensuring their successful functioning. In such systems, a significant role is given to

the interaction of man and technology, since such interaction can be of a different nature and affect the success of providing functional capabilities for solving the tasks set for the system.

For the effective operation of the systems and the ability to quickly resolve emerging emergencies in the current conditions, it is necessary to choose the best option for the restructuring of the system under the conditions of destructive impacts for its further functioning. The peculiarity of this problem lies in the fact that ergatic control systems in their structure can contain high-order communications, that is, communications between two or more elements.

It is proposed to use weighted hypergraphs as structural-parametric models of these systems.

To evaluate the efficiency of the system, a selection algorithm was developed based on the use of the branch and bound scheme, and a numerical example is given to illustrate the operation of the presented method.

**Key words:** ergatic systems, weighted hypergraphs, branch and bound.

В.В. Меньших, Н.Е. Спиридонова

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ НАРУШИТЕЛЯ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ**

Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Воронеж

В статье приведено описание имитационной модели действий нарушителя безопасности, разработанной с помощью пакета моделирования CPNTools. Данная модель включает в себя подмодель генерирования типа нарушителя, а также подмодель реализации возможных атак на имеющуюся информационную систему (ИС). При генерировании типа нарушителя учитываются его возможности (потенциал), а также права доступа к ИС. Структура ИС представлена в виде уровней, на которые чаще всего совершаются атаки. Полученная модель может быть использована при построении модели угроз для конкретного объекта, а также для оценки эффективности его системы защиты информации. Применение данной модели является особенно актуальным для сложных ИС, имеющих в своем составе множество разнородных взаимосвязанных элементов, так как незначительные уязвимости одного объекта могут нанести существенный ущерб безопасности для системы в целом.

**Ключевые слова:** гетерогенная система, угрозы безопасности, модель нарушителя, имитационное моделирование.

**Введение**

В современных условиях все большую популярность приобретают сложные информационные системы, построенные на основе IoT-технологий. Характерным примером является концепция «Умный город», предполагающая интеграцию нескольких гетерогенных инфокоммуникационных технологий в единую систему, с целью повышения качества жизни и обеспечения безопасности городского населения. На сегодняшний день не представляется возможным дать точное определение «умному городу» в связи с постоянным появлением новых технологий, оказывающих непосредственное влияние на изменение и/или дополнение сущности данного понятия. Вместе с тем, «умным городам» присущ определенный набор основных свойств [1]:

- применение в повседневной жизни большого набора электронных и цифровых технологий,
- использование инфокоммуникационных технологий для трансформации жизни и рабочей среды в пределах региона,
- внедрение высоких технологий в государственные системы,
- практика территориализации, объединяющая инфокоммуникационные технологии и людей с целью повышения уровня знаний, а также создания инновационных технологий.

Стратегии «умного города» используются во многих странах мира, в том числе и в России. Широкое распространение в нашей стране получили аппаратно-программные комплексы «Безопасный город», благодаря использованию которых существенно снизился уровень преступности в общественных местах, на улицах, парках и скверах [2]. Гетерогенный характер рассматриваемых систем способствует возникновению различного рода синергетических

эффектов, которые в значительной степени и повышают привлекательность их использования. Особенностью таких систем является наличие большого числа взаимосвязанных разнородных объектов, поэтому уязвимости одного объекта оказывает существенное влияние на снижение защищенности системы в целом [3]. В связи с этим для качественной защиты городских информационных систем необходим комплексный подход, включающий в себя обеспечение как физической, так и информационной безопасности. При этом важно учитывать, что с усилением мер по защите объектов в равной степени увеличиваются и возможности злоумышленников. В связи с этим необходимо построить модель нарушителя безопасности, позволяющую предусмотреть способы реализации атак на разнородные объекты различными типами злоумышленников, в зависимости от их целей и уровня подготовленности. Модель нарушителя является составной частью модели угроз для защищаемого объекта, и может быть в дальнейшем применена для оценки защищенности системы защиты информации.

### **Вербальная модель действий нарушителя информационной безопасности**

По данным исследований на территории Российской Федерации за прошедший 2019 год совершено более двухсот тысяч преступлений с использованием информационно-телекоммуникационных технологий [4]. Эксперты отмечают, что главным трендом в области кибер-инцидентов является преобладание целенаправленных атак над массовыми. Наибольший интерес для злоумышленников представляют государственные учреждения, промышленные компании, финансовый сектор, а также сфера науки и образования [5]. В отличие от массовых атак, в которых при одновременном поражении большого числа целей, жертвами становятся наименее защищенные пользователи, целенаправленные атаки обычно хорошо спланированы и включают в себя несколько этапов – от разведки и внедрения до уничтожения следов присутствия.

При анализе нарушений защиты необходимо уделять внимание субъекту (личности) нарушителя. Устранение причин или мотивов, побудивших к нарушению, в дальнейшем может помочь избежать повторения подобного случая. Для этого построим имитационную модель нарушителя информационной безопасности. На основе анализа прав доступа к данным информационной системы или ее компонентам, различают два вида нарушителей: внешних и внутренних. Возможность осуществления злоумышленником несанкционированного доступа (НСД) к объекту зависит от меры его затраченных усилий и возможностей (потенциала). Различают нарушителей с высоким, средним и низким потенциалом.

Предполагается, что существует некая сложная ИС, в которой взаимосвязано множество разнородных объектов. Злоумышленник, планируя свою атаку, выбирает объект, и, соответственно, один из уровней ИС (сетевой, общесистемный, прикладной, аппаратный) к которому будет осуществляться НСД. Следующим шагом, после проникновения в систему, является воздействие злоумышленника на защищаемую информацию. Атака считается завершенной, если в результате НСД нарушено одно из свойств информации: целостность, конфиденциальность или доступность, однако злоумышленник может преследовать цель нарушения сразу нескольких свойств защищаемой информации. Атака считается не завершенной, если в виду каких-либо обстоятельств нарушитель прекратил неправомерные действия, не дойдя до конечной цели. Злоумышленник, осуществляя атаку, может оказаться замеченным на каждом уровне ИС, или вовсе остаться не обнаруженным, при этом его конечная цель (осуществление НСД и получение необходимой информации) может быть выполненной или не выполненной.

## Имитационная модель действий нарушителя информационной безопасности

Имитационная модель схемы несанкционированных действий нарушителя построена с помощью пакета имитационного моделирования CPN Tools и представляет собой иерархическую сеть Петри, включающую две модели второго уровня (подсети). Динамические элементы, представленные фишками, расположены в состояниях и перемещаются по модели в результате срабатывания переходов.

На рис. 1 представлен блок генерирования типа нарушителя. Тип нарушителя моделируется сложным переходом «Gen», вырабатывающим случайным образом последовательность маркеров  $(tp, p, t)$ , представляющих кортеж, где:

$tp$  – вид нарушителя,

$p$  – вероятность его появления,

$t$  – время, которое используется для анализа работы модели.

Позиция «A», содержащая метку на начальном этапе моделирования, необходима для осуществления контроля за нахождением в модели только одной фишки. Данная позиция является общей и связана с позицией, находящейся в подмодели второго уровня «Obr».

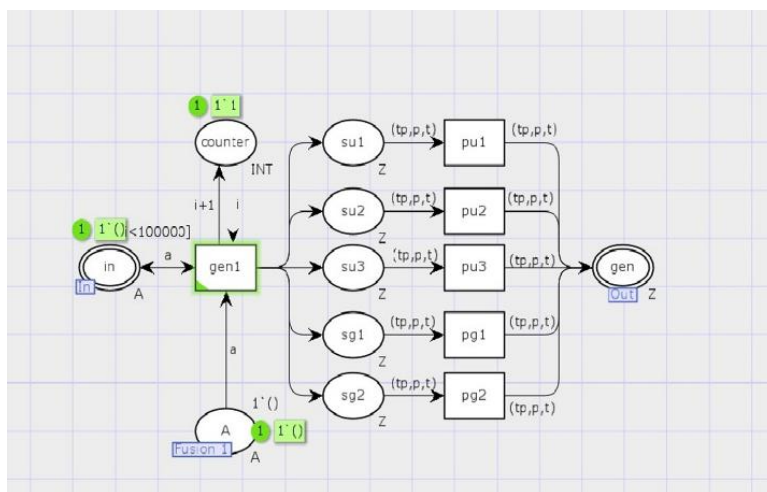


Рисунок 1. Блок генерирования типа нарушителя безопасности

В подмодели второго уровня «Obr» (рис. 2) происходит генерирование возможных путей злоумышленника, при осуществлении им НСД к ИС. На входной позиции «obrin» находится нарушитель заданного типа с последовательностью маркеров  $(tp, p, t)$ . При срабатывании перехода фишка может попасть в одну из четырех позиций, каждая из которых является уровнем ИС. В этом случае последовательность маркеров имеет следующий вид:  $(tp, p, p_1, p_2, t)$ . Далее фишка попадает в позиции нарушения свойства информации (целостности, конфиденциальности или доступности). Итогом реализованной атаки являются следующие позиции:

- нарушитель получил информацию, обнаружен;
- нарушитель получил информацию, не обнаружен;

- нарушитель не получил информацию, обнаружен;
- нарушитель не получил информацию, не обнаружен.

Пусть  $Q$  заданная достоверность при проведении эксперимента. Тогда количество прогонов модели для достижения данной достоверности (уровня достоверности) определим согласно формуле (1).

$$N = \frac{p \cdot (1-p)}{\varepsilon^2} \cdot \left[ \Phi_0^{-1} \left( \frac{Q}{2} \right) \right]^2, \quad (1)$$

где  $\Phi_0^{-1}(x)$  – функция, обратная функции Лапласа;  $\varepsilon$  – необходимая точность;  $p$  – частота появления фишки в одном из состояний [6].

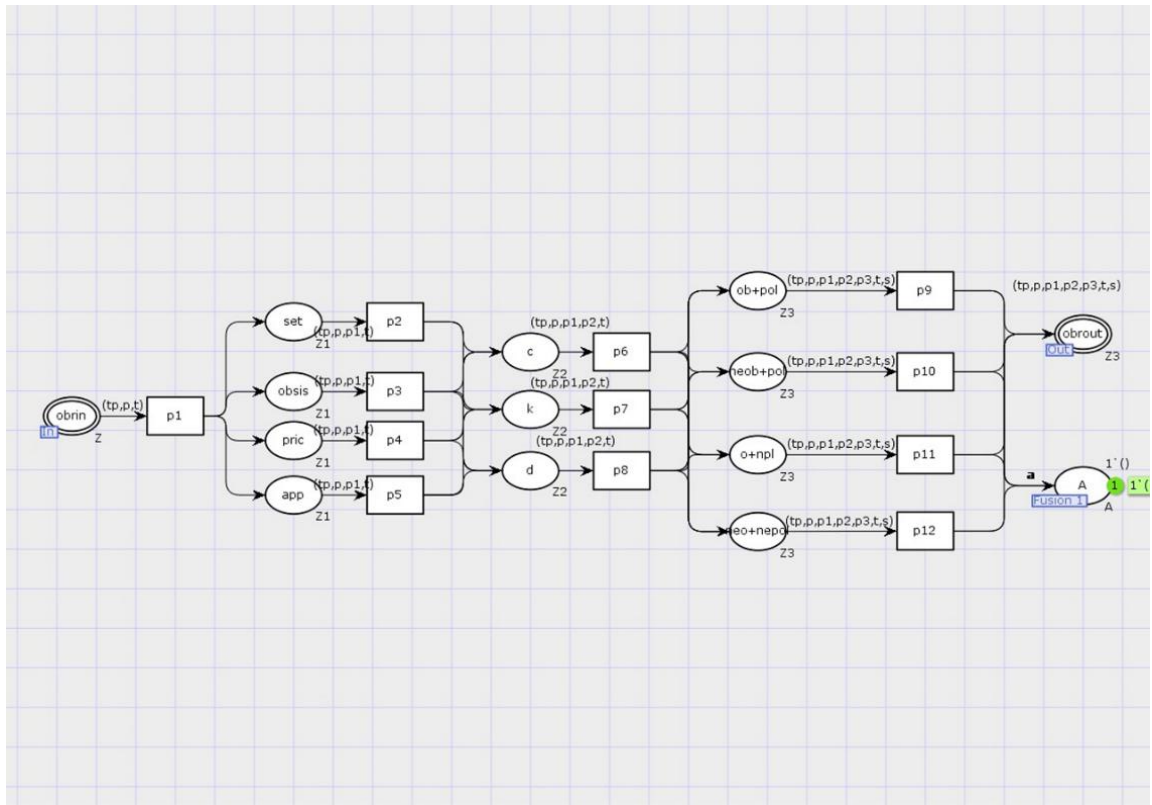


Рисунок 2. Блок генерирования действий нарушителя

### Заключение

Таким образом, разработанная имитационная модель позволяет определить наиболее вероятный тип нарушителя безопасности и его возможные действия по отношению к конкретному объекту. Данная модель может быть использована для построения модели угроз безопасности, а также для разработки рекомендаций по улучшению и модернизации имеющейся



на объекте системы защиты, с целью повышения ее устойчивости к различным типам атак. Применение полученной модели для сложных гетерогенных систем позволит повысить не только уровень защищенности объектов, но и всей системы в целом.

### Библиографический список

1. **Deakin, M.** From Intelligent to Smart Cities // Journal of Intelligent Buildings International: From Intelligent Cities to Smart Cities. –Т. 3, № 3.
2. **Menshikh, V.V., Kalkov D.Iu., Spiridonova N.E.** Model of optimization of arrangement of video surveillance means with regard to ensuring their own security/ V.V. Menshikh, D.Iu. Kalkov, N.E. Spiridonova// 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – 2019. – pp. 4-7.
3. **Menshikh, V.V., Spiridonova N.E.** Structural-parametric modeling of heterogeneous systems for ensuring their safety/ V.V. Menshikh, N.E. Spiridonova//XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – 2019. – pp. 159-162.
4. Сведения о состоянии преступности в Российской Федерации за январь - декабрь 2019 года: [Электронный ресурс] //аналитический отчет ФКУ ГИАЦ МВД России. URL: <https://мвд.рф/reports/item/19412450/>.
5. Advanced Persistent Threat (APT). Таргетированные или целевые кибератаки : [Электронный ресурс] : URL: <http://www.tadviser.ru/>.
6. **Синегубов, С.В.** Моделирование систем и сетей телекоммуникаций: учеб. пособие / С.В. Синегубов. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2016. – 336с.

**V.V. Menshikh, N.E.Spiridonova**

### **SIMULATION OF TACTIC OF INFORMATION SECURITY INTRUDERS IN HETEROGENEOUS SYSTEMS**

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation

The article describes a simulation model of the actions of a security intruder developed using the CPN Tools simulation package. This model includes a submodel for generating an intruder type, as well as a submodel for the implementation of possible attacks on an existing information system (IS). When generating the type of intruder, its capabilities (potential) and the truth of access to IP are taken into account. The structure of IS is presented in the form of levels, which are most often attacked. The resulting model can be used to build a threat model for a specific object, as well as to evaluate the effectiveness of its information protection system. The use of this model is especially relevant for complex ISs, which incorporate many heterogeneous interconnected elements, since minor vulnerabilities of one object can cause significant damage to security for the system as a whole.

**Key words:** heterogeneous system, security threats, intruder model, simulation.

В.В. Меньших, Е.Н. Серeda

## МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МНОГОЦЕЛЕВОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж

Статья посвящена вопросам математического моделирования процесса многоцелевого обучения специалистов. Переподготовка сотрудников предприятий многих отраслей для решения новых задач предполагает формирование или совершенствование специализированных компетенций.

Проведена декомпозиция процесса многоцелевого обучения с точки зрения системного подхода. Построена графовая модель процесса многоцелевого обучения.

Представлена математическая модель, на основе которой возможно формировать мобильные подгруппы для каждого этапа обучения, что приводит к уменьшению времени или стоимости обучения.

**Ключевые слова:** многоцелевое обучение, графовая модель, оптимизация процесса подготовки, модель формирования подгрупп.

### Введение

Современные темпы развития экономики, появление новых направлений профессиональной деятельности и отраслей производства предъявляют особые требования к качеству и срокам подготовки и переподготовки специалистов. Наиболее востребовано краткосрочное обучение, которое тесно связано с особенностями практической работы специалистов, направлено на повышение их квалификации и предполагает формирование или совершенствование специализированных компетенций.

При организации обучения возникает проблема формирования групп обучающихся и выбора оптимальной траектории обучения. При этом необходимо учитывать начальный уровень подготовки специалистов, цели обучения, имеющиеся в образовательной организации ресурсы. Освоение некоторых компетенций целесообразно осуществлять в группе, а в ряде случаев эффективно вести подготовку по индивидуальной траектории обучения, что приводит к возрастанию стоимости обучения [1]. Задача формирования траектории обучения представляет собой достаточно трудоемкий и рутинный процесс, и в настоящее время решается, как правило, эвристически. Эффективным инструментом, позволяющим получить ее оптимальное решение, является математическое моделирование.

### Декомпозиция процесса многоцелевого обучения

Под многоцелевым обучением понимается такая организация учебного процесса, при которой в одной группе готовятся специалисты по нескольким родственным направлениям деятельности, траектории обучения по которым частично пересекаются [2]. Учитывая, с одной стороны, уникальность некоторых направлений профессиональной деятельности и, как следствие, малочисленность соответствующих категорий обучающихся, а с другой стороны, близость траекторий обучения для родственных направлений подготовки, возникает необходимость формирования групп многоцелевого обучения, что обеспечивает экономию ресур-

сов образовательной организации, а в ряде случаев и повышает эффективность обучения. Пересечение траекторий создаёт возможность в процессе обучения динамически перераспределять обучающихся по подгруппам, в которых осваиваются те или иные компетенции [3].

Процесс многоцелевого обучения представляет собой сложную динамическую систему, состоящую из разнотипных элементов с разнотипными связями и заданной целью функционирования. Учитывая сложность и многовариантность процесса многоцелевого обучения, для его моделирования целесообразно использовать системный подход.

Анализ процесса многоцелевого обучения группы специалистов показал, что в нем можно выделить множества следующих типов[4]:

$K = \{k_1, \dots, k_{|K|}\}$  – множество компетенций, которые имеются или требуется сформировать у обучающихся;

$N = \{n_1, \dots, n_{|N|}\}$  – множество направлений деятельности, подготовку по которым осуществляет образовательная организация;

$M = \{m_1, \dots, m_{|M|}\}$  – множество модулей (курсов, программ) обучения, каждый из которых позволяет сформировать одну или несколько компетенций;

$L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$  – множество обучающихся;

$D = \{d_1, \dots, d_{|D|}\}$  – множество действий (шагов) по обучению, каждый из которых реализует обучение одного или группы специалистов в соответствии с одним из модулей;

$\bar{R} = \{\bar{r}_1, \dots, \bar{r}_{|R|}\}$  – множество вариантов ресурсов для выполнения действий по обучению.

Каждая компетенция  $k_i, i = 1, \dots, |K|$  имеет свое название и соответствующий уровень ее сформированности. Для упрощения математической модели описания процесса обучения будем считать каждый уровень самостоятельной компетенцией. Оценка сформированности компетенций определяется по результатам тестирования и может принимать следующие значения: 1 – компетенция сформирована, 0 – не сформирована. Компетенции имеют ограничения на последовательность их формирования.

Каждое направление деятельности  $n_i, i = 1, \dots, |N|$  имеет название и перечень компетенций, которыми должен обладать специалист, чтобы быть на него назначенным.

Под модулем обучения  $m_j, j = 1, \dots, |M|$  будем понимать дисциплину, раздел дисциплины, отдельную тему и др. Модули формируют соответствующие компетенции. Модули выполняются в определенной последовательности, направлены на формирование одной или нескольких взаимосвязанных компетенций.

Множество модулей характеризуется временами выполнения  $T = (t(m_1), \dots, t(m_{|M|}))$ , требует известного заранее набора ресурсов. Каждый модуль может быть реализован с использованием нескольких альтернативных вариантов ресурса образовательной организации

$$\bar{R}(m_j) = \{\bar{r}_1(m_j), \dots, \bar{r}_{|R|}(m_j)\},$$

где  $\bar{r}_s(m_j) = (r_s^1, \dots, r_s^{|R|})$  – набор конкретных ресурсов (преподавательский состав, учебные лаборатории, специальное оборудование и др.).

Каждый обучающийся  $l_j, j = 1, \dots, |L|$  имеет начальный, определяемый по результатам тестирования, промежуточный, получаемый после изучения части модулей и итоговый уровень



групп параметров общей задачи. При этом решение общей задачи оптимизации процесса многоцелевого обучения включает несколько этапов:

- определение оценок возможности формирования у обучающихся компетенций, соответствующих направлениям подготовки;
- выбор оптимального варианта распределения обучающихся по направлениям подготовки;
- формирования подгрупп обучающихся каждому модулю и выбор действий для обучения;
- составление расписания выполнения действий по обучению.

Решение первой и второй задачи рассмотрены в [2]. Рассмотрим задачу формирования подгрупп обучающихся.

### Модель формирования подгрупп обучающихся

Для каждого модуля  $m_k \in M$  может быть найдено множество осваивающих его обучающихся  $L_k$ . Предположим, что одновременно осваивать модуль  $m_k$  могут не более  $n_k$  обучающихся. Тогда для освоения этого модуля должны быть сформированы  $g_k = \left\lceil \frac{|L_k|}{n_k} \right\rceil$  групп ( $\lceil \cdot \rceil$  – округление до ближайшего наибольшего целого числа).

Параметром, определяющим целесообразность включения обучающегося в ту или иную группу, является допустимый интервал времени освоения данного модуля.

Обозначим

$M_j \subseteq M$  – множество модулей, которые необходимо освоить обучающемуся  $l_j$ ;

$M_{jk}^{prev} = M_j \cap M_k^{prev}$  – множество модулей, которые должен обязательно освоить обучающийся  $l_j$  к моменту освоения модуля  $m_k$ ;

$M_{jk}^{subs} = M_j \cap M_k^{subs}$  – множество модулей, освоение которых обучающимся  $l_j$  может быть осуществлено только после освоения  $m_k$ .

Обозначим допустимый интервал времени для освоения модуля  $m_k$  обучающимся  $l_j$  как  $[T_{jk}^b, T_{jk}^e]$ , где  $T_{jk}^b$  – время начала освоения модуля  $m_k$  обучающимся  $l_j$ ,  $T_{jk}^e$  – время окончания освоения модуля  $m_k$  обучающимся  $l_j$ .

Учитывая времена выполнения модулей, входящих в перечисленные множества, находим

$$T_{jk}^b = \sum_{m_k \in M_{jk}^{prev}} t(m_k);$$

$$T_{jk}^e = \sum_{m_k \in M_{jk}} t(m_k) - \sum_{m_k \in M_{jk}^{subs}} t(m_k).$$

В случае многоцелевого обучения распределение осваивающих модуль  $m_k$  по подгруппам целесообразно осуществлять так, чтобы в одной подгруппе оказались обучающиеся, для которых близки середины допустимых интервалов времени

$$\bar{T}_{jk} = \frac{1}{2}(T_{jk}^b + T_{jk}^e).$$

Для разделения обучающихся на подгруппы необходимо использовать алгоритмы кластеризации [5, 6]. Среди алгоритмов кластеризации, осуществляющих разбиение множества на заданное количество кластеров одним из самых эффективных с вычислительной точки зрения является алгоритм  $k$  – средних ( $k$  – means) [7–9].

### Заключение

Рассмотренные модели могут быть использованы при формировании адаптивных траекторий подготовки и переподготовки специалистов, снизить время обучения за счет динамического перераспределения обучающихся по подгруппам с целью освоения требуемого набора компетенций и оптимального использования имеющегося в образовательной организации ресурса.

### Библиографический список

1. Моделирование коллективных действий сотрудников органов внутренних дел : монография / В. В. Меньших, А. Ф. Самороковский, Е. Н. Середина, В. В. Горлов. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2017. – 236 с.
2. **Menshikh, V.V.** Optimization of Training Modules Choice During Multipurpose Training of Specialists/ V. V. Menshikh, E. N. Sereda // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 27–34.
3. **Меньших, В.В.** Модель и алгоритм оптимизации выбора направлений подготовки при многоцелевом обучении / В.В. Меньших, Е.Н. Середина // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 4(19). – URL: <https://moit.vivt.ru/?p=5592&lang=ru> (дата обращения: 10 февраля 2020 г.).
4. **Меньших, В.В.** Декомпозиция задачи оптимизации процесса обучения действиям при возникновении чрезвычайных обстоятельств на основе системного подхода / В.В. Меньших, Е.Н. Середина // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2018. – № 1. – С. 47–54.
5. **Олдендерфер, М.С.** Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / М. С. Олдендерфер, Р. К. Блэшфилд ; пер. с англ.; под. ред. И. С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
6. **Тюрин, А.Г.** Кластерный анализ, методы и алгоритмы кластеризации / А.Г. Тюрин, И.О. Зуев // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 2. – Вып. 3. – С. 86–97.
7. **Мандель, И.Д.** Кластерный анализ. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
8. **Celebi, M.E.** A Comparative Study of Efficient Initialization Methods for the K-Means Clustering Algorithm. Expert Systems with Applications / M. E. Celebi, H. A. Kingravi, P. A. Vela. – 2013.–Режимдоступа: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.021>.
9. **Drake, J.** Accelerated k-means with adaptive distance bounds / J. Drake, G. Hamerly // In 5th NIPS Workshop on Optimization for Machine Learning. – 2012. –P. 42–53. URL [http://opt-ml.org/oldopt/papers/opt2012\\_paper\\_13.pdf](http://opt-ml.org/oldopt/papers/opt2012_paper_13.pdf).

**V.V. Menshikh, E.N. Sereda**

## **MODELS OF MULTI-PURPOSE TRAINING OF SPECIALISTS**

Voronezh institute of Russian Federal Penitentiary Service

The article is devoted to mathematical modeling of the process of multi-purpose training of specialists. Retraining employees of enterprises in many industries to solve new problems involves the formation or improvement of specialized competencies.

The decomposition of the multi-purpose learning process from the point of view of the system approach is carried out. A graph model of the multi-purpose learning process is constructed.

A mathematical model is presented that can be used to form mobile subgroups for each stage of training, which reduces the time or cost of training.

**Key words:** multi-purpose training, graph model, optimization of the training process, subgroup formation model.

Т.В. Меньших, В.И. Новосельцев

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж

В работе исследуются внешнесистемные и внутрисистемные связи эргатических систем принятия решений специального назначения, используемых при возникновении чрезвычайных обстоятельств различного характера и на этой основе обосновывается необходимость осуществления моделирования этих систем на микро-, мезо- и макроуровнях их описания.

**Ключевые слова:** эргатические системы принятия решений специального назначения, внешнесистемные и внутрисистемные связи, микроуровень, мезоуровень, макроуровень.

В настоящее время в Российской Федерации в значительной степени сохраняется высокая опасность возникновения и развития чрезвычайных обстоятельств различного характера, то есть в соответствии с существующей официальной терминологией [1, 2] событий, существенно влияющих на жизнедеятельность людей и общества и требующих принятия специальных мер по защите жизни, здоровья, прав и свобод граждан, материальных и иных ценностей от уничтожения, повреждения и по восстановлению нормальной работы.

Для повышения эффективности управления при возникновении чрезвычайных обстоятельств в системах управления специального назначения (СУ СН) создаются эргатические системы принятия решений специального назначения (ЭСНР СН), которые обеспечивают работу СУ СН в условиях, когда требуется организация распределения процесса выработки управляющих воздействий по нескольким исполнителям, обладающим значительной степенью самостоятельности при распределении временных ресурсов (например, в интересах соблюдения требований обеспечения информационной безопасности или специфичности знаний узких специалистов), а также в условиях возможной неполноты и/или недостоверности исходных данных [3].

Системы с перечисленными особенностями относятся к классу сложных систем и для их математического моделирования в интересах оптимизации процесса функционирования целесообразно использовать системный подход. При использовании данного подхода в интересах решения задач математического моделирования осуществляют рассмотрение, в частности, внешнесистемных и внутрисистемных связей. Рассмотрение внешнесистемных связей позволяет определить параметры, показатели эффективности исследуемой системы и их ограничения, а внутрисистемных связей – определить состав моделей, численных методов и алгоритмов, разработку которых необходимо осуществить в рамках решения задачи математического моделирования изучаемой системы [4, 5].

Первоначально обратимся к рассмотрению внешнесистемных связей ЭСНР СН, то есть свойств системы, вытекающих из особенностей её функционального назначения и условий функционирования, которые были описаны в разделе 1 в процессе постановки задачи исследований.

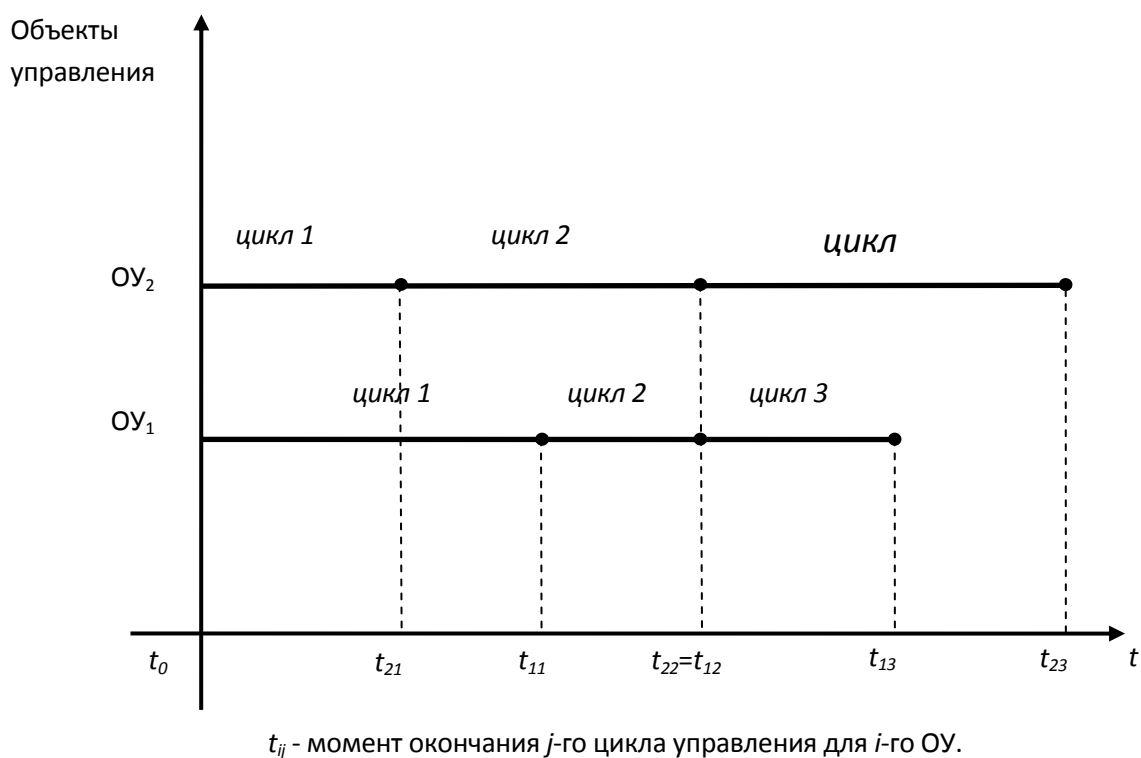
СУ СН, как и любая система управления, включает управляющий орган и объекты управления (ОУ). В процессе своего функционирования указанные СУ СН позволяют осуществлять одновременное управление несколькими разнородными объектами управления (ОУ), которые могут выполнять свои функциональные задачи, как самостоятельно, так и в группе [3].



Управляющий орган формирует управляющие воздействия (УВ) на ОУ (группу ОУ), которые выполняют свои функциональные задачи на основе поступивших к ним УВ и докладывают об эффективности своего функционирования управляющему органу, который осуществляет непрерывный мониторинг функционирования ОУ (групп ОУ).

С течением времени эффективность функционирования каждого ОУ (группы ОУ) становится неудовлетворительной в связи с изменением оперативной обстановки в зоне чрезвычайной ситуации, которое может быть вызвано как внутренними, так и внешними причинами. В этом случае, управляющий орган формирует для ОУ (группы ОУ) новые УВ, и, тем самым, осуществляется переход к следующему циклу функционирования этого ОУ (группы ОУ).

Таким образом, на каждом цикле функционирования ОУ (группы ОУ) осуществляется однократный цикл выработки УВ управляющим органом. Моменты перехода к реализации новых УВ для различных ОУ (групп ОУ) в составе СУ СН могут как совпадать по времени ( $t_{22}=t_{12}$ ), так и не совпадать (рис. 1).



**Рисунок 1. Варианты циклов управления для различных объектов**

Следует отметить, что неэффективное функционирование СУ СН может приводить к серьёзным материальным потерям и/или возникновению социальной напряжённости определённых групп населения (например, в случае побега заключённого из учреждения УИС). В связи с этим особенно актуальным является своевременность и точность выработки УВ управляющим органом.

Анализ процессов функционирования управляющего органа СУ СН и выработки УВ позволяет выделить целый ряд особенностей принятия управленческих решений, наиболее значимыми и, следовательно, влияющими на эффективность функционирования СУ СН, являются следующие:

- необходимость выработки УВ в условиях частичной неполноты (например, в силу невозможности определения некоторых параметров чрезвычайной ситуации) или возможной недостоверности исходных данных (например, в силу преднамеренного или непреднамеренного их искажения объектами внешней среды) [2, 3, 6];
- необходимость учёта мнений отдельных исполнителей о значимости действий по выработке УВ (в силу обладания ими узкоспециальными знаниями и/или конфиденциальной информацией)[2, 3, 7];
- выработка УВ в условиях временных ограничений, в некоторых случаях достаточно жёстких (например, при возникновении особо опасных чрезвычайных ситуаций техногенного или природного характера, развитие которых может повлечь человеческие жертвы или значительный материальный ущерб, привести к социальной напряжённости)[1, 2];
- необходимость осуществлять выработку УВ для различных ОУ или групп ОУ как последовательно, так и параллельно (это следует из возможности совпадения моментов начала реализации УВ для различных ОУ (групп ОУ))[2, 3];
- необходимость адаптации решения задачи оптимизации функционирования ЭСПР СН к различным временным ограничениям в процессе выработки УВ приводит к целесообразности использования альтернативных методов, различающихся как по времени реализации, так и по погрешности получаемых результатов [2, 3];
- в случае параллельной выработки УВ для различных ОУ (групп ОУ) возникает необходимость формирования временных группы исполнителей, которые могут различаться по функциональным возможностям и/или эффективности выполняемым ими действий [2, 3, 7].

Для достижения этой цели в процессе своей работы элементы ЭСПР СН обмениваются полученными результатами, а руководитель управляющего органа направляет и координирует действия исполнителей по выработке УВ и также сам может принимать непосредственное участие в этом процессе. Пример взаимодействия исполнителей  $i_2, i_3$  и руководителя  $i_1$  ЭСПР СН по выполнению действий  $d_1 - d_{11}$  представлен далее на рис. 2.

С целью восполнения недостающих данных могут быть использованы алгоритмы прогнозирования наиболее вероятных значений используемых показателей, обеспечивающие также проверку достоверности и при необходимости коррекции информации, что, как правило, осуществляется на основе применения предметно-ориентированных информационных систем, в том числе с элементами искусственного интеллекта (например, экспертных систем).

Учёт мнений отдельных исполнителей о значимости действий по выработке УВ может приводить к некоторому конфликту интересов, который необходимо разрешить в процессе решения задачи оптимизации функционирования ЭСПР СН. Это делает необходимым комплексное решение этой задачи, при котором рассматриваются одновременно все действия по выработке УВ на каждом цикле управления с учётом индивидуальных оценок их значимости, определяемых каждым исполнителем, а окончательное компромиссное решение принимается руководителем ЭСПР СН.

Таким образом, функционирование управляющих органов СУ СН является достаточно сложным и разнонаправленным процессом, требующим на каждом цикле управления адаптации к временным ограничениям, погрешности и полноте имеющихся данных, ресурсам выделенных для выработки УВ исполнителей.

Учёт перечисленных особенностей невозможен без совершенствования процессов принятия решений, осуществляемых органом управления СУ СН, которое может заключаться в использовании ЭСПР СН, включающей как ЛПР, осуществляющих аналитическую работу, так и информационные (в том числе экспертные) системы (ИС), обеспечивающие повышение обосно-

ванности и своевременности принимаемых решений. Сложность задачи состоит в том, что эффективные решения с позиций одних исполнителей, могут оказываться неэффективными или даже недопустимыми с позиций других исполнителей. В результате УВ всей ЭСПР СН могут оказаться противоречивыми и приводить к низкой эффективности функционирования ОУ. Поэтому УВ должны быть сбалансированы с учётом множества всех факторов, влияющих на эффективность функционирования ОУ. В связи с этим возникает необходимость координации действий отдельных элементов ЭСПР СН.

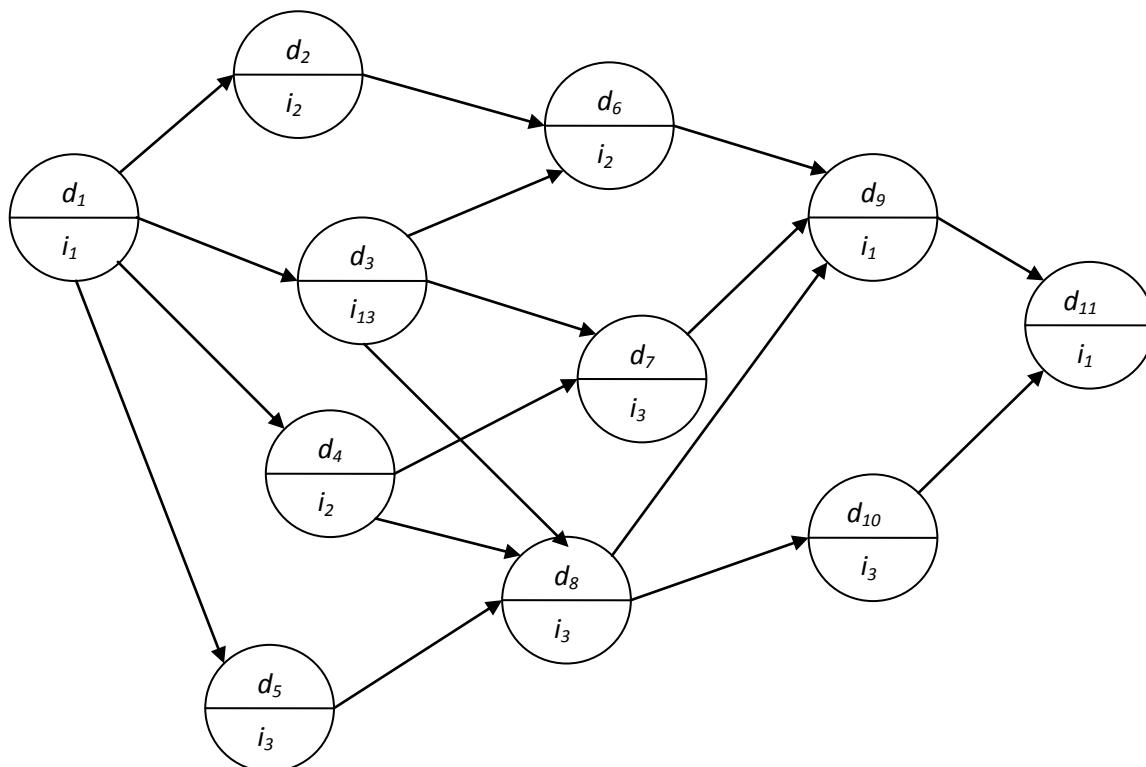


Рисунок 2. Пример взаимосвязей действий по выработке УВ

Таким образом, рассмотрены свойства ЭСПР СН, вытекающие из особенностей их функционирования и внешнесистемных связей и существенные с точки зрения их математического моделирования в интересах оптимизации процессов принятия решений в СУ СН.

Обратимся теперь к рассмотрению подходов к возможности достижения той же цели на основе выявления и изучения внутрисистемных связей ЭСПР СН.

Решение данной задачи целесообразно осуществлять на основе рассмотрения изучаемой системы и её элементов на различных уровнях детализации с последовательным усложнением описания системы. Как правило, рассматривают три уровня [Ошибка! Источник ссылки не найден., 5]:

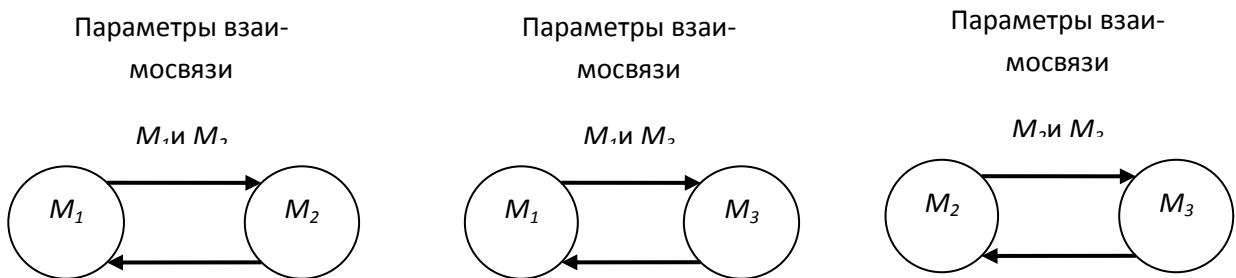
- микроуровень;
- мезоуровень;
- макроуровень.

На микроуровне рассматриваются отдельные элементы системы вне их связи с другими элементами этой системы, то есть в нашем случае это руководитель (в качестве ЛПР), остальные ЛПР и ИС, принимающие частные решения на выработке УВ и руководитель в качестве координатора действий остальных элементов. При этом должны быть выявлены параметры перечисленных элементов, значения которых могут существенно влиять на качество выработки УВ (рис. 3) и разработаны математические модели, численные методы и алгоритмы их количественной или качественной оценки.



**Рисунок 3. Моделирование на микроуровне**

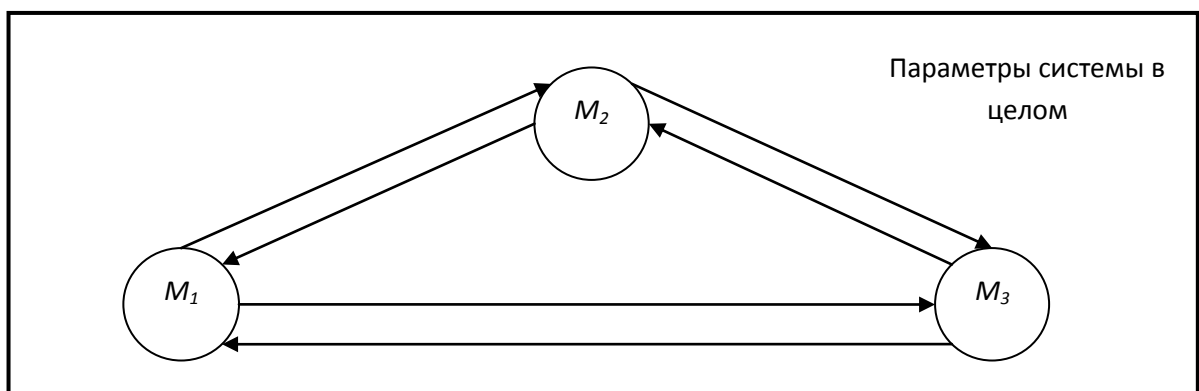
На мезоуровне определяются взаимосвязи между отдельными элементами системы, которые являются значимыми для оценки эффективности функционирования системы (рис. 4) и также разрабатываются математические модели, численные методы и алгоритмы их количественной или качественной оценки.



**Рисунок 4. Моделирование на мезоуровне**

Описание системы на микро- и мезоуровнях позволяет в совокупности получить её структурно-параметрическую модель, которая далее используется для описания системы на макроуровне (рис. 5), где она рассматривается в целом с учётом свойства её эмерджентности [4], то есть новых свойств системы по сравнению со свойствами отдельных элементов.

Указанное обстоятельство позволяет сформулировать задачи оптимизации функционирования системы в целом, то есть в нашем случае повышения эффективности ЭСПР СН по выработке УВ.



**Рисунок 5. Моделирование на макроуровне**

Таким образом, использование системного подхода к изучению ЭСПР СН позволило на основе рассмотрения их внешнесистемных связей определить показатели эффективности и условия, которые необходимо учитывать при их оценке, а на основе рассмотрения внутрисистемных связей определить основные направления математического моделирования ЭСПР СН, заключающиеся в разработке структурно-параметрической модели (результата моделирования на микро- и мезоуровнях) и на этой основе макромоделей ЭСПР СН для её использования в интересах повышения эффективности принятия решений в СУ СН.

### **Библиографический список**

1. **Седнев, В.А.** Организация защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций : учебник / В. А. Седнев [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Акад. ГПС МЧС России, 2014. – 229 с.
2. **Ямалов, И. У.** Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуациях / И. У. Ямалов. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2012. – 288 с.
3. **Меньших, Т.В.** Анализ особенностей процессов принятия решений в системах управления специального назначения при возникновении чрезвычайных обстоятельств // *Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии.* — 2019. — № 5-2. — С. 164-166.
4. **Новосельцев, В.И.** Системный анализ: современные концепции / В.И. Новосельцев. — Воронеж: Издательство «Квартга», 2003. — 360 с.
5. **Новосельцев, В.И.** Системная конфликтология / В.И. Новосельцев — Воронеж: Издательство «Квартга», 2001. — 169 с.
6. **Меньших, Т.В.** Модель и численный метод оценки погрешности вычислений в эргатических информационных системах на основе использования методов нечеткой математики / Меньших Т.В., Новосельцев В.И. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* —2019.— № 5. —С. 47-55.
7. **Меньших, Т.В.** Оценка параметров игр с иерархическим вектором интересов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование».* – 2018. — С. 118-122.

**T. V.Menshikh, V. I. Novoseltsev**

### **SYSTEM APPROACH TO MODELING OF ERGATIC SPECIAL-PURPOSE DECISION-MAKING SYSTEM**

Voronezh institute of Russian Federal Penitentiary Service

This paper investigates external and internal system connections of ergatic special-purpose decision-making systems that are used in emergency situations of different nature and on this basis the necessity of modeling these systems at the micro, meso and macro levels of their description is substantiated.

**Keywords:** ergatic special-purpose decision-making systems, external and internal system connections, microlevel, mesolevel, macrolevel.

И.П. Павлов<sup>1</sup>, А.Б. Сизоненко<sup>1</sup>, Д.Е. Селиверстов<sup>2</sup>

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ «РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕЕСТРОВ» И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

<sup>1</sup>Краснодарское высшее военное училище,

<sup>2</sup>Военная академия РВСН имени Петра Великого

Представлено краткое описание технологии «распределенных реестров». Проведен анализ особенностей и сфер применения распределенных реестров на примере «блокчейна». Приведены различные методы достижения консенсуса в «блокчейне». Информационная безопасность в системах управления документами достигается обеспечением конфиденциальности, доступности и целостности. Создание документов должно включать в себя создание контента и метаданных, которые фиксируют обстоятельства их создания. При изменении регистрационных данных документов в журнале учета, происходит усложнение отслеживания местонахождения документа, а при его уничтожении происходит утрата документа. Для обеспечения целостности регистрационных данных документов предлагается применить возможности технологии «распределенных реестров», а именно, предлагается модель построения блоков документной системы на основе технологии «распределенных реестров».

**Ключевые слова:** распределенные реестры, «блокчейн», консенсус, система управления документами, электронный документооборот.

### Введение

Технология «распределенных реестров» – технология хранения данных, которая распределяет информацию между множеством узлов абонентов или вычислительными устройствами. «Блокчейн» – это один из видов распределенных реестров, который построен на трех составляющих – одноранговые сети, шифрование и базы данных.

Управление документами обеспечивает эффективное и систематическое создание, получение, сохранение, использование, передачу на хранение или уничтожение документов, включая процессы ввода в систему и сохранения доказательств и информации о деловой деятельности и транзакции (обмене информацией) в виде документов.

Документная система – информационная система, обеспечивающая управление документами и доступ к ним в течение определенного времени. Документы, независимо от формы или структуры, должны обладать характеристиками аутентичности достоверности, целостности и пригодности для использования [2].

Сведения о движении документа содержатся в журнале учета. При ликвидации или повреждении журнала учета, пригодный для использования документ невозможно будет найти, извлечь, воспроизвести и интерпретировать в течение времени, установленного заинтересованными сторонами. Документ, пригодный для использования, должен быть связан с деловой деятельностью или операцией, в результате которой он был создан. Необходимо поддерживать связи между документами, которые фиксируют соответствующую деловую операцию.

Исходя из этого, появляется необходимость обеспечить целостность регистрационных данных документов в документных системах. Одним из решений проблемы обеспечения целостности является дублирование информации, а для подтверждения действий используется электронная подпись. Распределенное хранение всей истории транзакций обеспечит невозможность ее удаления или изменения.

### **Анализ возможностей и применение «блокчейн»**

Основными особенностями «блокчейна» являются: децентрализация процессов хранения и обработки информации, доказуемая неизменяемость данных, прозрачность операций, безвозвратность транзакций, возможность анонимизации участников, отсутствие необходимости в доверии, поддержание работы сети самими участниками[4].

Функционирование «блокчейна» невозможно без консенсуса, то есть процесса согласования вносимых изменений. Консенсус в разных «блокчейнах» обеспечивается несколькими методами[3]:

- proof-of-work(PoW) — доказательство работы. Вклад участника в достижение консенсуса определяется выполняемым им объемом вычислений. Метод PoW используется в Bitcoin и «блокчейнах», созданных на его основе (Bitcoin, Ethereum, Litecoin). Принцип его работы – трудно найти решение, но легко проверить результат. Производительность у такого метода низкая. И хотя масштабируемость одноранговых сетей высокая, скорость транзакций остается низкой. Метод proof-of-work считается наиболее надежным, но у него есть один существенный недостаток — высокая ресурсоемкость;
- proof-of-stake(PoS) — доказательство доли. Вклад участника в достижение консенсуса определяется долей токенов «блокчейна», которыми он владеет, от их общего количества. Принцип его работы – сеть доверяет валидатору, который ставит свои собственные ресурсы в залог за возможность создавать блоки: чем больше доля, тем выше вероятность, что сеть разрешит создание блока. Производительность у такого метода высокая. Примеры использования – NXT, Tezos. Техническая особенность PoS — отсутствие сложных и ненужных вычислений. Алгоритм выбирает одного валидатора, основываясь на принадлежащей ему доле;
- delegated proof-of-stake(DPoS) (*Делегированное доказательство доли*). Принцип реализации: участники делегируют производство новых блоков небольшому и фиксированному числу избранных валидаторов. Производительность высокая. Пример использования – EOS, BitShares. Он позволяет создавать блоки на высокой скорости и обрабатывать большее количество транзакций в секунду, по сравнению с другими алгоритмами консенсуса, за счет уменьшения количества валидаторов;
- byzantine fault tolerance(BFT) — условное название нескольких различных методов консенсуса, которые применяются в корпоративных платформах и частично централизованных проектах распределенного реестра — HYPERLEDGER, Ripple, Stellar и т.д. В данном методе не требуется токенов для голосования, как в алгоритме PoW или PoS;
- delegated byzantine fault tolerance (DBFT) (*Делегированный протокол задачи византийских генералов*). Принцип работы – предварительно выбранные «доверенные» участники поддерживают консенсус, даже если 1/3 из них терпят неудачу или являются злонамеренными. Производительность очень высокая. Пример использования – NEO, TON. Таким образом, консенсус протокол BFT кажется спасением от несовершенств PoW

и PoS, но учитывая тысячи валидаторов, он всё равно будет бороться за решение проблемы скорости;

- practical byzantinefault tolerance(PBFT) (*Реализация протокола задачи византийских генералов*). Принцип работы – простая и быстрая реализация алгоритма BFT для частных сетей. Производительность – высокая. Пример использования – Hyperledger, Chain. Протокол PBFT очень похож на DBFT, особенно в отношении его более централизованного характера. Единственное отличие состоит в том, что первый имеет более простую реализацию, и часто работает в частной среде с известными участниками. Консенсус достигается на основе подтверждения, которое будет представлено всеми валидаторами. PBFT эффективен в системах с низкой задержкой, но очень чувствителен к количеству валидаторов и пропускной способности, так как одно сообщение генерирует множество других запросов и проверок;

- federated byzantine agreement (FBA) (*Федеративное византийское соглашение*). Принцип работы – блоки валидированы, если они подписаны конкретным кворумом подписчиков. Производительность высокая. Пример использования – Stellar, Ripple. FBA не требует разрешения или заранее известного набора участников, в отличие от PBFT и других вариаций BFT. FBA позволяет кому-либо присоединиться к сети. Транзакции в этом протоколе валидируются фиксированным количеством участников, которые выбираются из тех, кто в тот момент находится в сети.

Кроме этих фундаментальных методов, существует ряд других способов реализации консенсуса[3, 4]:

- proof-of-capacity, proof-of-weight, proof-of-spacetime. Эти методы основаны на доказательстве выделения узлами «блокчейна» ресурсов для хранения файлов или другой информации;

- proof-of-activity(PoA) (*Доказательство активности*). Принцип его устройства – гибрид PoW и PoS. Производительность у данного метода низкая. Данный метод используется в «Блокчейне» Decred;

- proof-of-location(PoL) (*Доказательство местоположения*). Принцип его устройства – используются маячки, чтобы заметить ноду в синхронизированном состоянии, а затем отметить временным штампом её присутствие. Производительность средняя. Пример его использования – FOAM, Platin.PoL позволяет пользователям закрепить за собой конкретную GPS-локацию и таким образом аутентифицировать себя в сети;

- proof-of-importance(PoI) (*Доказательство важности*). Реализован данный метод, как и PoS, но с дополнительными свойствами, которые влияют на ваш рейтинг. Производительность высокая. Пример использования – «блокчейн» NEM;

- proof-of-elapsed-time(PoET) (*Доказательство прошедшего времени*). Реализуется в виде блоков, которые создаются в доверенной среде с равными периодами. Производительность средняя. Пример использования – IntelLedger. Эта система похожа на Proof-of-Work, но потребляет гораздо меньше электроэнергии;

- proof-of-authority(PoA) — доказательство полномочий. Данный метод предполагается использовать в управляемых «Блокчейнах».

### **Модель построения блоков документной системы на основе технологии «распределенных реестров»**

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 15489-1-2019 документы, независимо от формы или структуры, должны обладать характеристиками аутентичности, достоверности,



целостности и пригодности для использования, которые считаются доказательством подлинности деловых событий или операций и полностью отвечают установленным требованиям по ведению деловых операций. При этом целостность документа складывается из его полноты и неизменности [2].

Документные системы должны обладать такими характеристиками, как надежность, безопасность, соответствие, комплексность и системность. Для предотвращения несанкционированного доступа, изменения, сокрытия или уничтожения документов должны быть реализованы такие меры, как управление доступом, мониторинг, авторизация агента и санкционированное уничтожение. Информация о средствах управления, которые были применены к документу, а также о том, когда они были применены, должна быть отображена в метаданных процессов [2].

Важно отметить, что в случае с электронными документами любые системные сбои, обновления программного обеспечения или регулярная эксплуатация системы управления документами не должны влиять на качество сохранности документов.

Документ должен быть защищен от несанкционированного изменения. Политика и процедуры управления документами должны указывать, какие дополнения или изменения могут быть применены к документу после его создания, при каких обстоятельствах такие дополнения или изменения могут быть разрешены и кто уполномочен сделать это. Должна быть обеспечена возможность выявления и отслеживания любых санкционированных изменений, добавлений или удалений в документе [2].

Исходя из этих требований можно сделать вывод, что применение технологии распределенных реестров повысит доступность к документам, обеспечит целостность регистрационных данных, позволит сохранить и не даст подделать историю операций над документами и сведений об исполнителях. Для обеспечения и контроля целостности регистрационных данных документов, предлагается следующий вариант регистрационной записи в распределенных журналах учета (Registrecord) (рис.1).

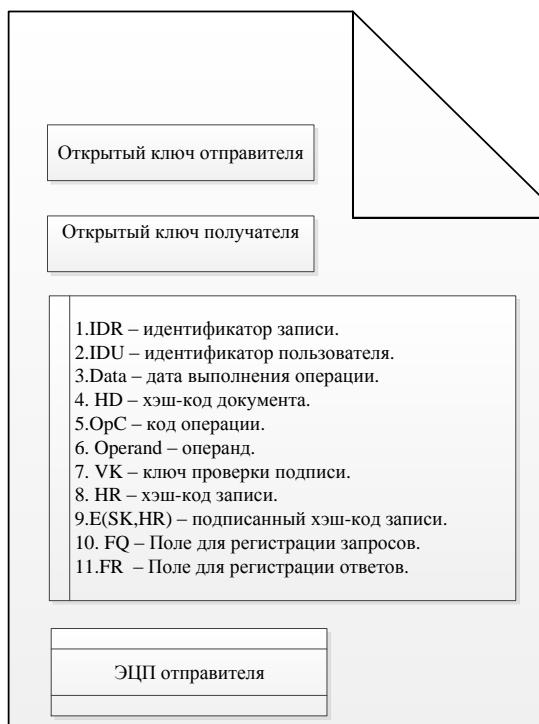
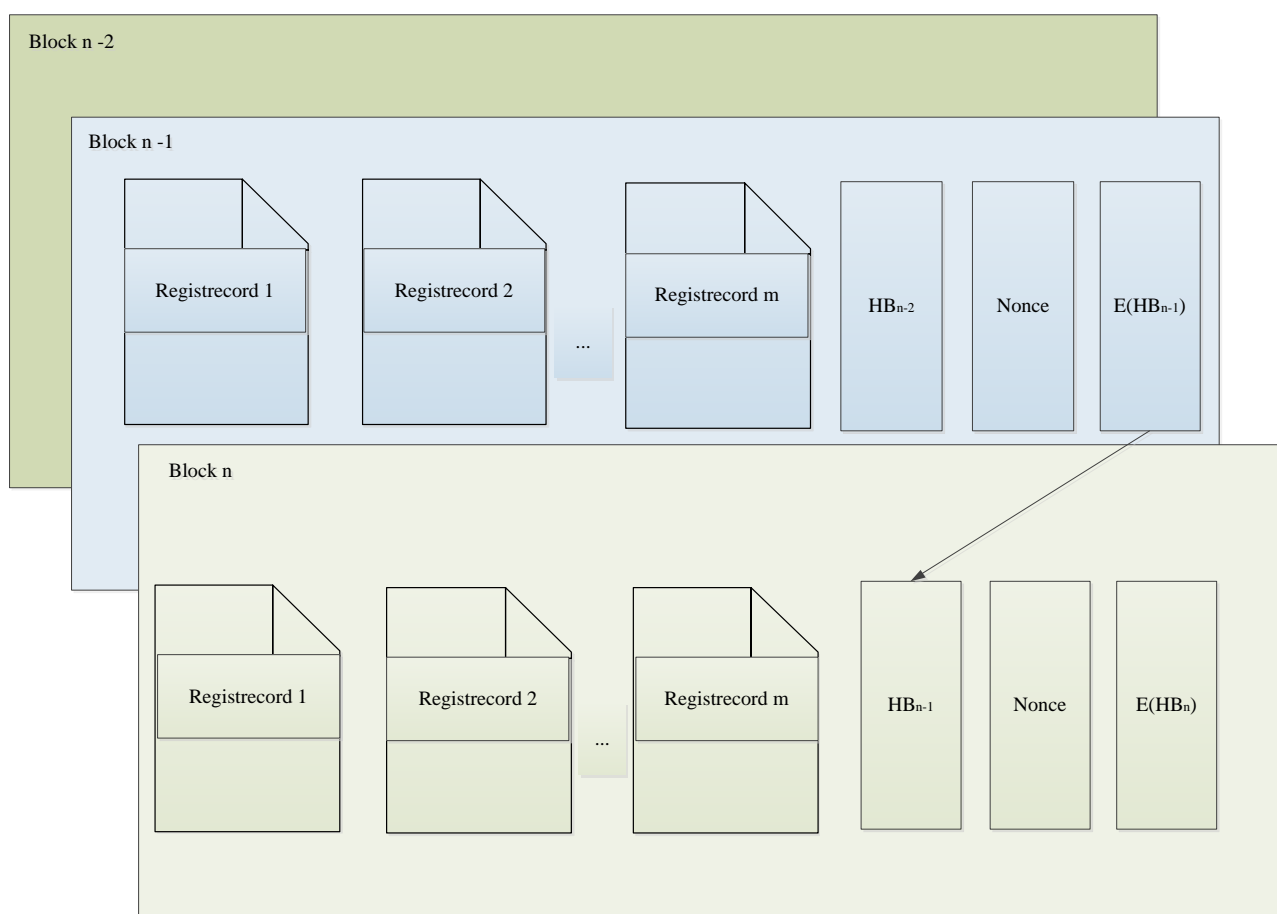


Рисунок 1. Вариант регистрационной записи Registrecord

Используя метод Proof-of-Work для достижения консенсуса опишем предлагаемый упрощенный «блокчейн». После заполнения данными Registrecord (порядок внесения и определение завершения записи определяются правилами, заданными при разработке распределенной подсистемы контроля), формируется блок защищенной подсистемы управления документами (Block). К этому блоку добавляется хэш-код предыдущего блока ( $H_{n-1}$ ) и рассылается всем пользователям. Каждый пользователь генерирует случайное число и записывает его в поле Nonce, после этого формирует хэш-код блока ( $H_n$ ). Тот пользователь, у которого сформированный хэш-код окажется наиболее близким к установленному критерию (например, минимальный, максимальный или входящий в заданный диапазон) подписывает хэш-код блока своей электронной подписью ( $E(H_n)$ ). Данная модель построения блоков документной системы на основе технологии «распределенных реестров» представлена на рис. 2.



**Рисунок 2. Модель построения блоков документной системы на основе технологии «распределенных реестров»**

### **Заключение**

Предложенная модель позволит обеспечить целостность регистрационных данных и доступность документов и невозможность отказа от них. Разработанный протокол может быть использован в комбинированных системах документооборота.

## Библиографический список

1. Сизоненко, А.Б. Вопросы стандартизации форм представления информации ограниченного доступа в системах электронного документооборота / С.Г. Ключев, А.Б. Сизоненко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии [Электронный ресурс]. – 2017. – № 2(18). – Режим доступа: [http://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2017/08/KluevSizonenko\\_2\\_18\\_1.pdf](http://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2017/08/KluevSizonenko_2_18_1.pdf).
2. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Управление документами: ГОСТ Р ИСО 15489–1–2019. – Введ. 26.03.2019– М.: Стандартинформ, 2019. – с. 3–14.
3. Табернакулов, А. Блокчейн на практике / А. Табернакулов, Я. Койфманн – М.: Альпина Паблицер, 2019. с. 28 – 36.
4. Тапскотт, А. Технология блокчейн. То, что движет финансовой революцией сегодня / А. Тапскотт, Д. Тапскотт – [Перевод Е. Ряхина, К. Шашкова]: ООО Издательство «Эксмо», 2017. с. 67– 69.

I.P. Pavlov<sup>1</sup>, A.B. Sizonenko<sup>1</sup>, D.E. Seliverstov<sup>2</sup>

### ANALYSIS OF OPPORTUNITIES TECHNOLOGIES OF “DISTRIBUTED REGISTERS” AND APPLICATION OF THEM TO ENSURE THE INTEGRITY OF THE REGISTRATION DATA OF ELECTRONIC DOCUMENTS

<sup>1</sup>Krasnodar Higher Military School,

<sup>2</sup>Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great

A brief description of the technology of "distributed ledgers" is provided. The analysis of the features and applications of distributed registries on the example of "blockchain". Various methods for reaching consensus in the “blockchain” are presented. Information security in document management systems is achieved by ensuring confidentiality, accessibility and integrity. The creation of documents should include the creation of content and metadata that capture the circumstances of their creation. When changing the registration data of documents in the accounting journal, tracking of the location of the document becomes more complicated, and when it is destroyed, the document is lost. To ensure the integrity of the registration data of documents, it is proposed to use the capabilities of the technology of "distributed registries", namely, a model for building blocks of a document system based on the technology of "distributed registries" is proposed.

**Keywords** : distributed registries, blockchain, consensus, document management system, electronic document management.

А. А. Кочешков, Д. А. Сенькив

## МЕРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУБЛИЧНЫХ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ С ПОМОЩЬЮ БЕСПЛАТНЫХ ИЛИ OPEN-SOURCE РЕШЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Данная работа описывает причины и способы защиты данных и публичных облачных сервисов. Рассматривается каждый возможный случай использования публичного облачного сервиса – в качестве системы для сервисов, ботов, в качестве хранилища статических файлов, в качестве пространства для размещения полноценного веб-приложения, включающего в себя клиентскую и серверную часть. Описывается использование системы мониторинга и способы доставки информации о произошедших инцидентах информационной безопасности и другой, важной для ответственного инженера информации.

Предлагаемые программные решения для обеспечения информационной безопасности публичных облачных сервисов бесплатны для частного и коммерческого использования, часть из них имеет открытый исходный код.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, кибербезопасность, облачные сервисы, опенсорс, информационные угрозы.

### Введение

Тема информационной безопасности публичных облачных сервисов включает в себя меры по конфигурированию конечных сервисов, ОС, сканированию и мониторингу систем.

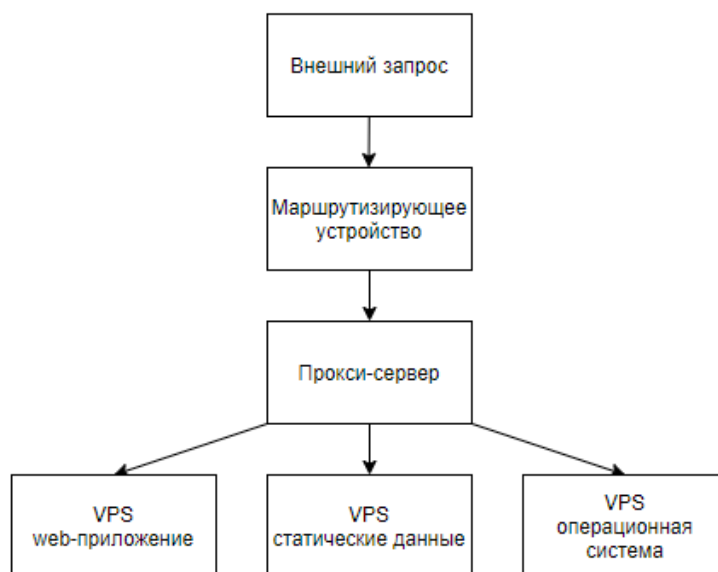


Рисунок 1. Типовая схема публичного облачного сервиса

## Методы защиты публичного облачного сервиса

Каждый из элементов этой схемы следует защищать особым образом. Общие рекомендации для защиты каждого элемента системы:

- сменить стандартные пароли;
- задавать пароли максимально сложными, включающими в себя буквы разного регистра, языка, цифры и специальные символы;
- закрыть неиспользуемые порты;
- своевременно обновлять программное обеспечение.

### Прокси-сервер

Сначала необходимо сделать правильную конфигурацию прокси-сервера, а также установить и настроить WAF(Web Application Firewall). *Web Application Firewall* — защитный экран уровня приложений, предназначенный для выявления и блокирования современных атак на веб-приложения, в том числе и с использованием уязвимостей нулевого дня:

- sql injection — sql инъекции;
- remote code execution (RCE) — удаленное выполнение кода;
- cross site scripting (XSS) — межсайтовый скриптинг;
- cross site request forgery (CSRF) — межсайтовая подделка запросов;
- remote file inclusion (RFI) — удалённое исполнение файла;
- local file inclusion (LFI) — локальное исполнение файла;
- auth bypass — обход авторизации;
- insecure direct object reference — небезопасные прямые ссылки на объекты;
- bruteforce — подбор паролей.

Основное предназначение WAF — защита веб-приложения от несанкционированного доступа даже при наличии критичных уязвимостей.

Будем использовать ModSecurity - WAF с открытым исходным кодом. ModSecurity блокирует атаки на приложения, основываясь на стандартном наборе регулярных выражений (сигнатур) — инструментов для проверки запросов по шаблону — OWASP Core Rule Set (OWASP - Open Web Application Security Project). Его разработка и поддержка ведется с 2002 года. ModSecurity кроссплатформенный и подходит для IIS, Apache, nginx.

Прокси-сервер будет использоваться в качестве реверс-прокси.

*Обратный прокси-сервер* (англ. reverse proxy) — тип прокси-сервера, который ретранслирует запросы клиентов из внешней сети на один или несколько серверов, логически расположенных во внутренней сети. При этом для клиента это выглядит так, будто запрашиваемые ресурсы находятся непосредственно на прокси-сервере. В отличие от классического прокси, который перенаправляет запросы клиентов к любым серверам в интернете и возвращает им результат, обратный прокси непосредственно взаимодействует лишь с ассоциированными с ним серверами и возвращает ответ только от них.

### Web-приложение

Web-приложение, как правило, состоит из двух частей - серверной и клиентской. Клиентская часть может быть реализована на языках PHP, JavaScript. Для ускорения и облегчения процесса разработки используются фреймворки и вспомогательные библиотеки.

*Фреймворк* — программная платформа, определяющая структуру программной системы; программное обеспечение, облегчающее разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта.

Серверная часть может быть реализована на одном из языков программирования, которые обычно используются для серверной разработки - Java, C#, Ruby, Scala, Go. Как и при разработке клиентской части приложения, при разработке серверной части также, для ускорения и облегчения процесса разработки используются фреймворки и вспомогательные библиотеки.

Как правило, вспомогательные компоненты написаны другими компаниями, программистами-энтузиастами и их исходный код можно посмотреть в публичных репозиториях. Иногда качество кода имеет низкое качество и такие библиотеки, несмотря на их популярность, в силу лени или неаккуратности разработчиков, могут содержать уязвимости и увеличивают вероятность взлома web-приложения.

Для защиты от взлома можно использовать Snyk - инструмент для анализа зависимостей в проектах на наличие уязвимостей. На данный момент Snyk поддерживает возможность анализа в таких платформах и средах, как Node.js, Java, .NET, Scala, Python, Ruby, Go, PHP, Docker, npm, jQuery.

Snyk позволяет сканировать исходный код приложений на наличие уязвимостей в зависимых пакетах. Бесплатный тариф включает в себя оповещение по e-mail, возможность интеграции с системами версионирования кода (GitHub, Bitbucket, GitLab и т. д.), возможность использования в системах непрерывной интеграции и непрерывной доставки CI/CD, неограниченное количество сканирований исходного кода, размещенного в открытом доступе и 200 сканирований в месяц для кода, который находится в частных репозиториях или не размещен нигде вовсе.

Для защиты клиентской части сайта необходимо установить SSL-сертификат. *SSL-сертификат* - это цифровая подпись сайта, которая нужна для работы протокола защищенной передачи данных в сети. Она обеспечивает шифрованное соединение между пользователем и сайтом. Информация, которой они обмениваются, защищена от посторонних — провайдера, оператора, администратора беспроводной сети и прочих. Еще с помощью этого сертификата подтверждается подлинность сайта — пользователь может проверить, какой компании на самом деле принадлежит ресурс.

Бесплатный SSL-сертификат предоставляет Let's Encrypt. *Let's Encrypt* — центр сертификации, предоставляющий бесплатные криптографические сертификаты X.509 для TLS-шифрования (HTTPS). Процесс выдачи сертификатов полностью автоматизирован.

Для защиты серверной части нужно учесть следующие рекомендации:

- в ответе на запрос клиентской части возвращать в ответе как можно меньше информации, которая не относится к его запросу, но может позволить идентифицировать какие-либо чувствительные данные вашего сервиса (например, можно вернуть в заголовке ответа информацию о текущем прокси-сервере и злоумышленник, зная версию и вендора ПО, найдет и проэксплуатирует непропатченную уязвимость сервиса)[1];
- при предоставлении публичного API (Application Programming Interface) требовать ключ авторизации (API-ключ) для возможности идентификации пользователей запросов и обнаружении аномальных активностей пользователей.

## Операционная система

Все сервисы, службы и другие компоненты ПО размещаются в системе под управлением ОС. Чаще всего, это Unix-подобная система, поскольку она бесплатная и меньше подвержена вирусам, чем, например, ОС семейства Windows. ОС может использоваться для хранения статических файлов, для работы и управления бот-системами, чат-ботами и т. д.

Файлы, которые хранятся на сервере, могут содержать вредоносный код, являться вирусами. Вредоносные файлы, кроме нанесения вреда системе, могут испортить репутацию того IP-адреса и домена, на котором расположен публичный облачный сервис [2].

При обнаружении вредоносного файла внешними сканерами уязвимостей, IP-адрес и домен сайта могут быть занесены в базу ненадежных и опасных сайтов. Последствия могут быть неблагоприятными для сервиса - он будет понижен в ранжировании результатов поисковых систем, сервисы, работающие на том же сервере или под тем же IP-адресом, получат статус неблагонадежных и это отразится на взаимодействии с ними.

Например, если почтовый сервер расположен на том же IP-адресе, что и хостинг с вредоносными файлами, то при отправке письма с данного почтового сервера крупные сервисы по предоставлению услуг электронной почты (Google, Yandex, Mail.ru, Rambler и другие) с большой вероятностью отправят ваше письмо в спам, а если письмо будет отправлено в компанию с хорошей защитой от инцидентов информационной безопасности, то оно попадет в карантин и у поставщика услуг ИБ сработает инцидент ИБ, в результате которого будет выяснено, что письмо отправлено с того же IP-адреса, с которого распространяется вредоносный файл.

Для сканирования ОС на предмет вредоносных файлов используется ClamAV - антивирус с открытым исходным кодом.

Возможности антивируса:

- запуск сканирования из командной строки;
- регулярные обновления определений вирусов;
- сканирование электронной почты;
- поддержка различных типов файлов, таких как PDF, Office и Zip.

Достоинства антивируса:

- простая установка и настройка
- быстрая работа;
- кросс-совместимость с Windows и MacOS;
- портативная установка;
- отсутствует графический интерфейс.

Также, в качестве базовых практик предотвращения взломов и других вредоносных взаимодействий с ОС рекомендуется:

- по возможности, не хранить пароли в открытом виде;
- пароли хранить в зашифрованном хранилище (например, в приложении KeePass);
- отключить, удалить неиспользуемые службы и сервисы. Меньше служб и сервисов

Чем меньше эксплуатируемых уязвимостей, тем меньше целевых и успешных атак.

### **Дополнительные меры обеспечения информационной безопасности**

К дополнительным мерам обеспечения ИБ можно отнести мониторинг ресурсов ОС[3]:

- мониторинг состояния сервисов на их работоспособность;
- мониторинг сервисов на появление аномально высокой активности и отсеечение ложных срабатываний за счет корректировки настроек и конфигураций;
- информирование о проблемах ответственному за информационную безопасность максимально просто и быстро;
- мониторинг текущего состояния систем на наличие уязвимостей в установленном ПО, установочных пакетах и иных зависимостях.

Для решения первых трех задач используется Zabbix - свободная система мониторинга и отслеживания статусов разнообразных сервисов компьютерной сети, серверов и сетевого оборудования.

Система мониторинга на основе Zabbix состоит из трех компонентов:

- Zabbix-сервер - ядро системы, которое дистанционно контролирует сетевые сервисы и является хранилищем, в котором содержатся все конфигурационные, статистические и оперативные данные. Он является тем субъектом в программном обеспечении Zabbix, который оповещает администраторов о проблемах с контролируемым оборудованием;
- Zabbix-прокси - собирает данные о производительности и доступности от имени Zabbix-сервера. Все собранные данные заносятся в буфер на локальном уровне и передаются Zabbix-серверу, к которому принадлежит прокси-сервер. Он может быть использован для распределения нагрузки одного Zabbix-сервера. В этом случае, прокси только собирает данные, тем самым на сервер ложится меньшая нагрузка на ЦПУ и на устройства ввода/вывода;
- Zabbix-агент - программа контроля локальных ресурсов и приложений (таких, как накопители, оперативная память, статистика процессора и т. д.) на сетевых системах, эти системы должны работать с запущенным Zabbix-агентом.

С помощью Zabbix можно настроить оповещения о высокой нагрузке на ресурсы ОС - процессор, оперативную память, файловую систему. Также можно настроить уведомления о изменении оставшегося дискового пространства для контроля над непредумышленными обновлениями, появлении нового ПО.

Оповещения можно присылать ответственному инженеру по информационной безопасности на e-mail (доступно с минимальными дополнительными конфигурациями), сотовый телефон посредством смс-сообщений, посредством всплывающих (push) уведомлений, а также с помощью бот-систем в мессенджерах Telegram, WhatsApp, Viber, социальных сетях Facebook и ВКонтакте.

Для решения последней задачи можно использовать Vulners - инструмент для сканирования устанавливаемых программных пакетов на уязвимости. Vulners предоставляет плагин для Zabbix для контроля уязвимостей на клиентах, на которых установлен Zabbix агент - zabbix-threat-control. Исходный код данного плагина, как и многих других продуктов компании Vulners, размещен на сайте github.com

Для того, чтобы воспользоваться возможностями Vulners, необходимо пройти бесплатную регистрацию и получить API-ключ, который позволит обращаться в БД (базе данных) уязвимостей Vulners и другим возможностям сервиса. Затем в интерфейсе Zabbix необходимо настроить плагин и установить триггеры (условия срабатывания) на события, которые получает Zabbix-сервер от агентов.

Для тестирования web-приложений на наличие уязвимостей будет использоваться Kali Linux с установленным на нем ПО для тестирования на проникновение.

Kali Linux- это дистрибутив, основанный на Debian, предназначенный для проведения тестов на безопасность. Имеет большое количество предустановленного ПО.

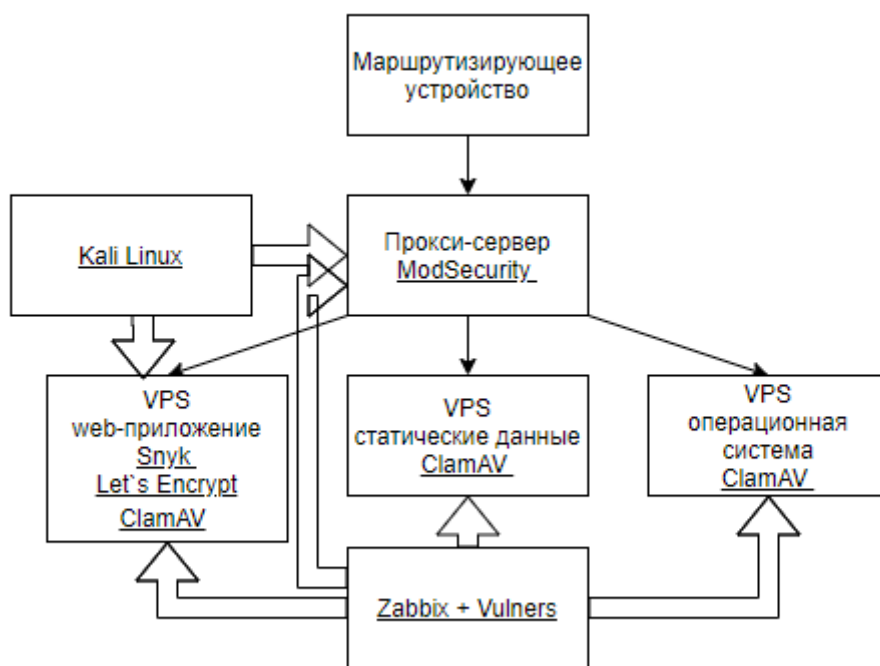
Тестирование будет проводиться как извне сети, то есть проходить через WAF, который способен защитить web-приложение даже при наличии критичных уязвимостей, так и изнутри сети, чтобы тестировать приложение напрямую. Отчет о результатах тестирования можно отправлять ответственному инженеру по ИБ таким же способом, как и отправляет Zabbix, или отправлять отчет в Zabbix, а оттуда отчет будет отправлен таким же образом, как и все остальные события.

Будут настроены тесты на наличие уязвимостей:



1. SQL-инъекции - один из распространённых способов взлома сайтов и программ, работающих с базами данных, основанный на внедрении в запрос произвольного SQL-кода.
2. HTML-инъекции - тип атаки, которая благодаря отсутствию надлежащей обработки пользовательского ввода позволяет злоумышленнику встроить на сайт собственный HTML-код. Делятся на два типа:
  - активные — html/js код сохраняется в базу и выполняется при каждом его выводе из базы (к примеру пост на форуме, данные профиля и т. д.);
  - пассивные — html/js код выполняется непосредственно при обращении к скрипту с заранее сформированными параметрами. Примером может служить форма поиска на ресурсе, когда после заполнения ее html кодом он будет внедрен в результаты поиска.
3. XSS - внедрение произвольного JS кода/скрипта в страницу.
4. CSRF - выполнение произвольных действий в браузере пользователя.
5. Shellshock - серия программных уязвимостей, обнаруженных в программе GNU Bash. Множество интернет-сервисов, в том числе веб-серверы, могут использовать Bash для обработки некоторых запросов, например, при исполнении CGI-скриптов. Уязвимость позволяет атакующему исполнять произвольные команды, получив неправомерный доступ к компьютерным системам
6. HeartBleed - ошибка (buffer over-read) в криптографическом программном обеспечении OpenSSL, позволяющая несанкционированно читать память на сервере или на клиенте, в том числе для извлечения закрытого ключа сервера.

Предложенная схема защиты публичного облачного сервиса представлена на рис. 2.



**Рисунок 2. Схема защиты публичного облачного сервиса**

Тонкими стрелками изображено направление, в котором проходит внешний запрос. Внутри прямоугольников подчеркнутый текст обозначает название ПО, которое используется для обеспечения информационной безопасности. Кроме указанного ПО, к каждому элементу сервиса применены общие рекомендации по защите публичного облачного сервиса. Объем-

ными стрелками обозначены направления защиты компонентов публичного облачного сервиса.

### Заключение

В данной работе рассмотрены способы защиты публичного облачного сервиса на всех уровнях от потенциальных атак злоумышленников. Найденное решение решает большинство задач обеспечения информационной безопасности публичного облачного сервиса. Компоненты защиты бесплатны для частного и коммерческого использования, часть из них имеет открытый исходный код. Данный подход имеет большой потенциал для его дальнейшего развития и модернизации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. **Lee Brotherston**, Amanda Berlin: Defensive Security Handbook: Best Practices for Securing Infrastructure (April 2017).
2. **Corey Schou**, Steven Hernandez.: Information Assurance Handbook: Effective Computer Security and Risk Management Strategies (2014)
3. «Хакер» - Безопасность, разработка, DevOps. [Электронный ресурс]. Режимдоступа: <https://xakep.ru>

**A.A. Kocheshkov, D. A. Senkiv**

### INFORMATION SECURITY TECHNIQUES FOR PUBLIC CLOUD SERVICES USING FREE OR OPEN-SOURCE SOLUTIONS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** The paper describes techniques of protection information against hackers. The relevance of this work arises from the ever-growing number of private public cloud services. Owners of public cloud services often do not have much money for expensive software and complex configuration of all system protection components.

**Design / methodology / approach:** The article will be considered approach to this problem based on the free or open source software.

**Research limitations / implications:** The proposed technique is the starting point in the new techniques for protection information.

**Originality / value:** The value of the proposed method is in the full complex protection against hackers, each element has individual protection.

**Keywords:** information security, cybersecurity, cloud services, open source, information threats

Ю.Ю. Сеницын, А.Б. Сизоненко, А.В. Колованов

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ПРОЦЕСС РАСШИФРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ, ЗАШИФРОВАННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Краснодарское высшее военное училище, г. Краснодар

Рассмотрены различные виды ошибок, возникающие при передаче сообщений по каналам связи, и их влияние на зашифрованное в различных режимах работы блочных шифров сообщение. Предложено использовать адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования при передаче зашифрованных сообщений. Приведена структурная схема устройства, реализующего адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования.

**Ключевые слова:** блочные шифры, режимы работы блочных шифров, помехоустойчивое кодирование, адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования, сверточные коды.

### Введение

Для современных систем обработки информации различного назначения, использующих криптографические методы обработки и защиты информации, одной из наиболее приоритетных задач является обеспечение высоких показателей скорости, надежности и качества передачи информации [1]. Для этого система должна обладать требуемой помехоустойчивостью, которая характеризует способность системы сохранять заданные количественные и качественные показатели несмотря на наличие помех в канале связи [2].

В системах обработки информации между источником информации и приемником информации в сеанс передачи данных возникает символьная синхронизация. При воздействии помех на передаваемое сообщение возможно изменение одного или группы символов, удаление или добавление лишних символов [3].

Изменение символов шифртекста приведет к искажению открытого текста. Для обнаружения и исправления ошибок, вызванных помехами в канале связи, предложен адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования.

Для различных каналов передачи информации и характера помех в канале, предложено в качестве основного кода использовать сверточные коды.

### Анализ влияния помех на зашифрованное в различных режимах сообщение

В настоящее время в отечественной криптографии используются алгоритмы криптографического преобразования информации с длинами блоков 128 бит («Кузнечик») и 64 бит («Магма») и длинами ключей 256 бит ГОСТ Р 34.12-2015 – Блочные шифры [4].

Открытая информация  $P$  делится на блоки по  $n = 128$  бит для алгоритма «Кузнечик» и  $n = 64$  бит для алгоритма «Магма»:  $P_1, P_2, \dots, P_q$ . Каждый блок обрабатывается с помощью специального алгоритма  $e_k$  зависящего от ключа  $K$ , для алгоритма «Кузнечик» основанного на SP-сети (подстановочно-перестановочная сеть), для алгоритма «Магма» основанного на

сети Фейстеля. В результате обработки каждого блока  $P_1, P_2, \dots, P_q$  получаются блоки зашифрованного текста  $C_1, C_2, \dots, C_q$ .

Согласно ГОСТ Р 34.13-2015 вышеназванные блочные шифры имеют шесть режимов работы: режим простой замены; режим гаммирования; режим гаммирования с обратной связью по выходу; режим простой замены с зацеплением; режим гаммирования с обратной связью по шифртексту; режим выработки имитовставки [5]. Данные режимы работы блочных шифров определяют правила криптографического преобразования данных и выработки имитовставки для сообщений произвольного размера, используются в отечественных средствах криптографической защиты информации.

Рассмотрим влияние ошибок инверсии, удаление или добавление лишних бит на зашифрованное сообщение

Ошибка инверсии бит в блоке шифртекста в режиме простой замены при расшифровании приведет к искажению всего блока открытого текста (рис. 1).

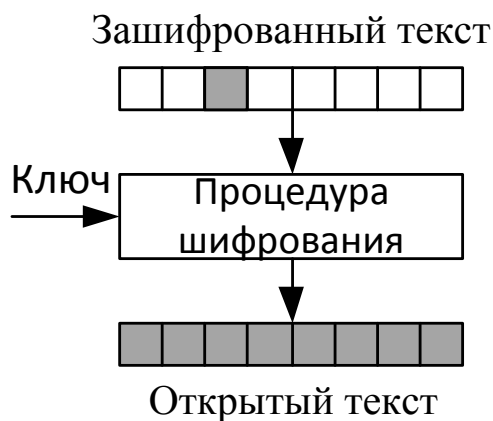


Рисунок 1. Режим простой замены

Ошибка инверсии бит в блоке шифртекста в режиме гаммирования при расшифровании приведет к искажению бита открытого текста (рис. 2).

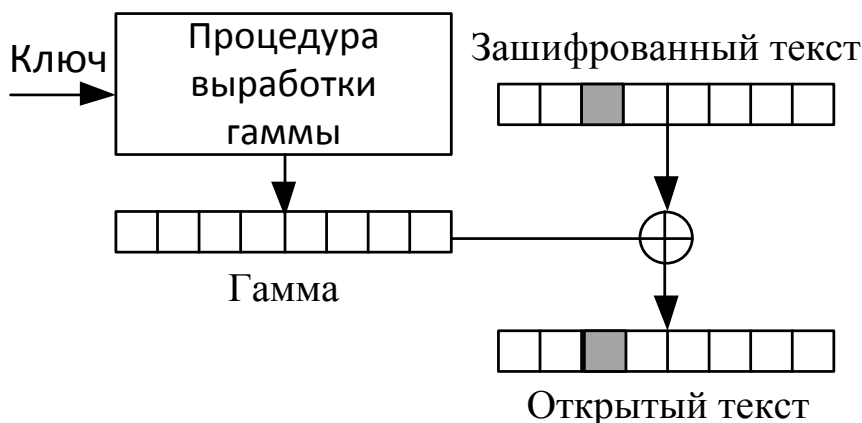
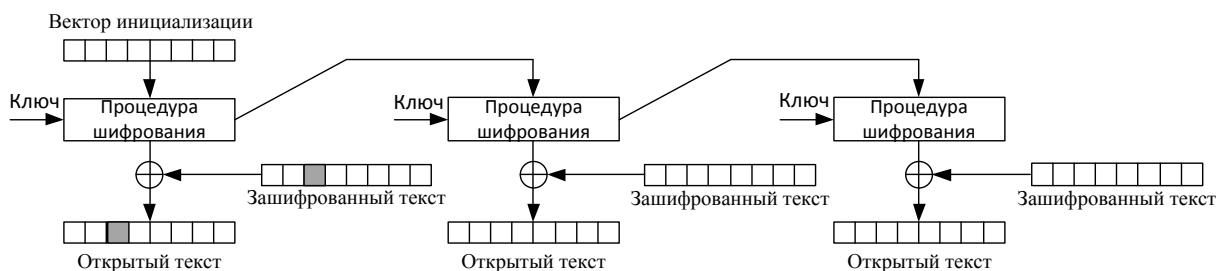


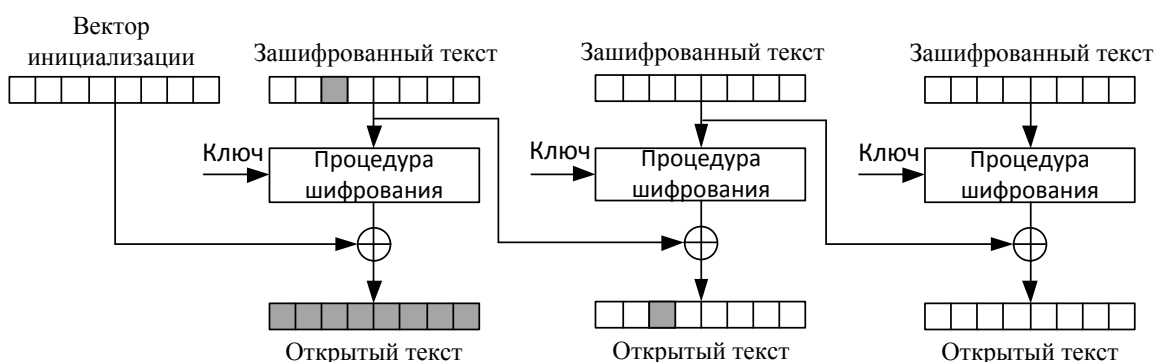
Рисунок 2. Режим гаммирования

Ошибка инверсии бит в блоке шифртекста в режиме гаммирования с обратной связью по выходу при расшифровании приведет к искажению бита открытого текста (рис. 3).



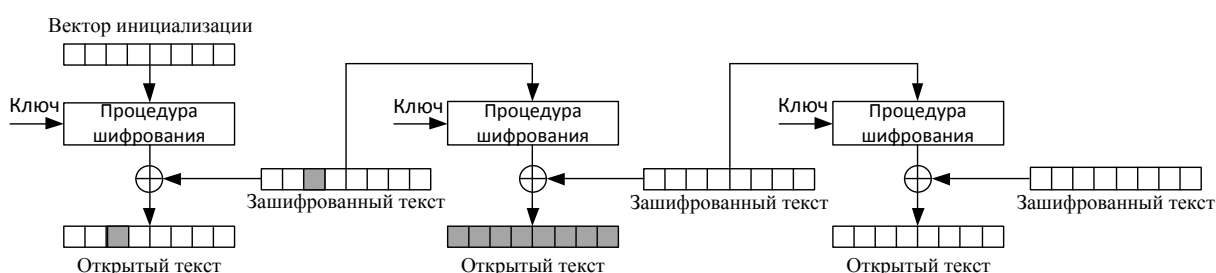
**Рисунок 3. Режим гаммирования с обратной связью по выходу**

Ошибка инверсии бит в блоке шифртекста в режиме простой замены с зацеплением при расшифровании приведет к искажению всего блока открытого текста и одного бита следующего открытого текста (рис. 4).



**Рисунок 4. Режим простой замены с зацеплением**

Ошибка инверсии бит в блоке шифртекста в режиме гаммирования с обратной связью по шифртексту при расшифровании приведет к искажению бита открытого текста и искажению следующего блока открытого текста, последующие блоки открытого текста будут расшифрованы верно (рис. 5).



**Рисунок 5. Режим гаммирования с обратной связью по шифртексту**

Режим выработки имитовставки возможно применять только вместе с одним из вышеуказанных режимов работы блочных шифров. Влияние помех на имитовставку приведет к ложному решению о целостности открытого текста.

Во всех режимах работы блочных шифров ошибка удаления или добавления лишних символов приведет к искажению блока, в котором произошло удаление или добавление лишних символов, а также всех последующих блоков. Блоки открытого текста будут расшифрованы неверно, начиная с блока в котором произошло удаление или добавление символов, до последнего блока.

Данный анализ показывает, что указанные режимы шифрования не защищены от воздействия помех в канале связи, присутствие помех способно привести к полному искажению данных.

### Адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования

Помеховая обстановка в канале связи обусловлена расположением приемного устройства и определяется сочетанием видов используемых сигналов, структурой и особенностями совокупности внешних воздействий, объединяющих внутренние шумы приемной аппаратуры, искажениями сигналов при прохождении по каналу передачи и воздействием помех от внешних источников.

Для устранения искажений данных зашифрованного сообщения применяются методы канального кодирования. Добавление избыточности в код передаваемого сообщения позволяет обнаруживать и исправлять ошибки передаваемого сообщения.

Свойства помехоустойчивого кодирования позволяют не только обнаружить, но и исправить ошибки, возникающие в каналах связи с помехами. Разнообразие помеховой обстановки не позволяет применить универсальный метод подавления помех для последующего успешного декодирования полезного сигнала, а требует использования набора различных методов. В таких случаях необходимо использовать адаптивную систему помехоустойчивого кодирования, для оптимального использования канала связи необходимо в зависимости от состояния канала менять вносимую в сигнал избыточность.

предложено использовать адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования (рис. 6).

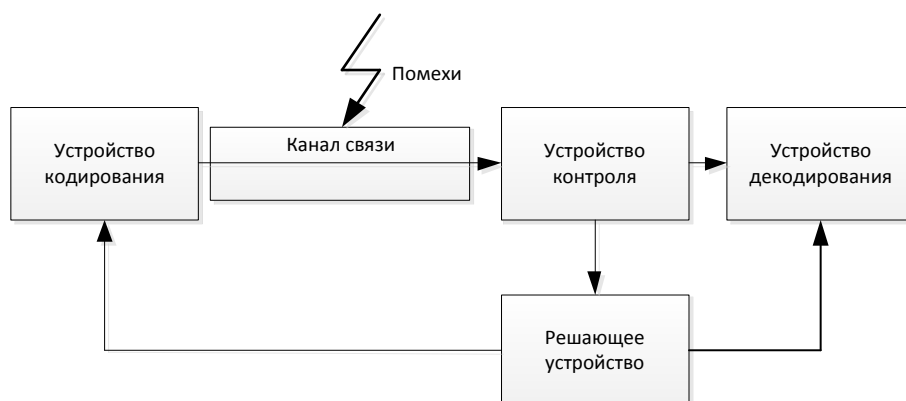


Рисунок 6. Схема адаптивного алгоритма помехоустойчивого кодирования

Предложенный адаптивный алгоритм помехоустойчивого кодирования осуществляет контроль за состоянием канала связи. Устройство кодирования передает по каналу связи известную приемнику тестовую последовательность. Устройство контроля принимает данную последовательность и сравнивает ее с эталонной последовательностью. Информацию о количестве и характере ошибок в данной последовательности устройство контроля передает в решающее устройство. Решающее устройство производит оценку и выбирает оптимальный алгоритм помехоустойчивого кодирования для данного канала связи в текущий момент времени. Сигнал о выбранном алгоритме решающее устройство передает в устройство кодирования и декодирования. Устройство кодирования кодирует зашифрованное сообщение выбранным алгоритмом помехоустойчивого кодирования и передает его по каналу связи с помехами. После этого на приемной стороне устройство декодирования по заданному алгоритму осуществляет декодирование принятой информационной последовательности.

Факторами, влияющими на выбор кода являются: распределение ошибок в канале связи; допустимая вероятность ошибок кодовой последовательности; обеспечение заданной скорости передачи информации; сложность алгоритмов кодирующих и декодирующих устройств; обеспечение заданной надежности.

Наиболее подходящими в данном случае являются сверточные коды:

- свойства сверточных кодов позволяют обнаруживать и исправлять, как одиночные ошибки, так и пакеты ошибок;
- обеспечение заданной скорости передачи информации возможно добиться перфорированными сверточными кодами;
- в соответствии с требованиями качества и сложности в каждой определенной системе, возможно использовать сверточные коды с различными кодовыми ограничениями;
- внутренняя структура алгоритма сверточного кодирования и декодирования позволяет производить его внутреннюю адаптацию при различных внешних условиях;
- требуемой надежности можно достигнуть сверточными кодами с меньшей скоростью и большим кодовым ограничением.

### Заключение

Современные системы передачи информации функционируют в разных условиях, обусловленных разнообразием каналов передачи и видов используемой радиоаппаратуры. Специфика каналов передачи вызывает появление различных видов искажений сигналов, которые могут быть объединены по сходным чертам. Каждому виду искажений можно сопоставить свой механизм адаптации помехоустойчивого кодирования, в качестве основного кода устройства предлагается использовать свойства сверточных кодов.

### Библиографический список

1. **Гаврилов, А.В.** К вопросу об управлении распределенными гетерогенными мультивендорными инфокоммуникационными системами / А.В. Гаврилов, Е.Л. Кон, В.И. Фрейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2011. – № 5. – С. 264–270.
2. **Кон, Е.Л.** Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационноуправляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры: учеб. пособие / Е.Л. Кон, В.И. Фрейман. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.: ил.
3. **Сизоненко, А.Б.** Использование свойств сверточных кодов для устранения рассинхронизации при расшифровании сообщений, зашифрованных синхронными поточными шифрами // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 1. – С. 41–46.
4. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры: ГОСТ Р 34.12-2015. – Введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 25 с.
5. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров. ГОСТ Р 34.13-2015. – Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 10116-93; введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 29 с.

**Y.Y. Sinitsyn, A.B. Sizonenko, A.V. Kolovanov**

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF INTERFERENCE IN THE COMMUNICATION  
CHANNEL ON THE PROCESS OF DECODING MESSAGES ENCRYPTED  
IN VARIOUS MODES**

Krasnodar Higher Military School

Various types of errors that occur during the transmission of messages over communication channels, and their effect on the message encrypted in various modes of operation of block ciphers are considered. It is proposed to use the adaptive error-correcting coding algorithm when transmitting encrypted messages. The block diagram of a device that implements an adaptive error-correcting coding algorithm is presented.

**Keywords:** block ciphers, operation modes of block ciphers, error-correcting coding, adaptive error-correcting coding algorithm, convolutional codes.



А.С. Тороев, А.Б. Сизоненко, С.Ю. Козлов

## АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УДОСТОВЕРЯЮЩИХ ЦЕНТРОВ В УСЛОВИЯХ АКТИВНЫХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА

Краснодарское высшее военное училище, г. Краснодар

Живучесть распределенной системы удостоверяющих центров (УЦ) зависит от живучести сетевых ресурсов и выбранной модели доверия между её узлами. В данной статье проведен анализ базовых моделей доверия, описаны достоинства и недостатки каждой из них, а также их применимость в различных условиях функционирования системы. Более подробно рассматривается одноранговая модель доверия на основе концепции ZeroTrust с целью возможного её внедрения для частных корпоративных сетей. Формализовано даётся оценка возможности делегирования критически важных функций вышедших из строя удостоверяющих центров с целью оценки живучести системы в целом, при этом предлагается проанализировать возможность применения технологии распределенных реестров с целью её повышения.

**Ключевые слова:** распределенная система, удостоверяющий центр, модель доверия, одноранговая сеть, распределенный реестр, ZeroTrust, живучесть.

### Введение

В условиях постоянно растущих атак злоумышленников на различные информационные ресурсы с целью блокирования их работы, получения несанкционированного доступа к ним либо модификации содержащихся в них данных актуальной проблемой является доверие между узлами. Каждому УЦ в рассматриваемой распределённой системе удостоверяющих центров (РСУЦ) для согласованности выполняемых функций по контролю над инфраструктурой электронной подписи необходимо установить соответствующую доверительную модель. Доверительная модель отражает структуру взаимодействия сертификатов между собой и осуществляется следующим образом:

- 1) создание структуры (объединение всех сертификатов, из которых складывается структура их взаимодействия);
- 2) проверка корректности построенной структуры (последовательная проверка всех сертификатов в созданной структуре). [1]

Исходя из практической работы УЦ, подавляющее большинство выбирает из предложенных в [2] моделей три базовые:

- 1) иерархическая модель;
- 2) мостовая модель;
- 3) одноранговая (распределенная) модель.

Рассмотрим данные модели более подробно, чтобы определить их достоинства и недостатки, а также возможности делегирования или заблаговременное распределение критически важных функций с целью повышения живучести РСУЦ.

## Анализ базовых моделей доверия РСУЦ

Иерархическая модель является самой используемой моделью, в которой создание структуры сертификатов строго установлено, что значительно улучшает процесс обработки информации при её построении. Иерархию УЦ можно представить в виде дерева узлов, в котором корень является головной УЦ, который выступает в качестве основного источника доверия для установленного списка подчиненных ему организаций. Ниже головного УЦ располагаются промежуточные УЦ в виде соответствующих ветвей, к которым крепятся листья, которым соответствуют конечные абоненты.

Основное преимущество строгой иерархии состоит в чёткой и понятной структурированности и управляемости. Иерархическая модель приемлема для функционирования в государственных структурах власти с единой подсистемой администрирования. Тем не менее, данная модель обладает низкой живучестью – выход из строя узлов в иерархической структуре сертификации ведет к нарушению доступности данных в системе, вследствие чего нормативно-правовыми актами РФ к безотказности работы УЦ предъявляются очень строгие требования. Согласно Федеральному закону № 63-ФЗ от 6.04.2011 г. «Об электронной подписи» каждый подчиненный УЦ является доверенным лицом головного УЦ.

Мостовая модель доверия является подходящей только тогда, когда нужно соединить несколько разнородных систем. Мостовой УЦ является посредником между несколькими УЦ или системами УЦ. Отличительной особенностью данного УЦ является то, что он не занимается обслуживанием абонентов: его абонентами являются только другие УЦ, в то же время он является полноценным УЦ со всеми программными и аппаратными средствами. Таким образом, мостовой УЦ соединяет узлы инфраструктуры в единое пространство доверия.

Главное преимущество мостовой архитектуры это её масштабируемость: любой новый УЦ очень легко может присоединиться к инфраструктуре. Однако проблема сложности структурирования системы и проверки корректности записей в ней является главным недостатком для мостовой архитектуры доверия в виду того, что она объединяет разнородные системы.

Проанализированные модели доверия отражают организацию взаимодействия абонентов с множеством УЦ одновременно, при этом они не всегда осуществляют взаимодействия между собой, так как проверка корректности структуры сертификатов для каждого УЦ осуществляется отдельно. Подразумевается, что нормативные требования к живучести технического оснащения УЦ являются очень жесткими, вследствие чего нет или не рассматриваются условия, при которых бы возникла необходимость в делегировании или распределении критически важных функций. Однако если рассмотреть корпоративную сеть, имеющую в своей структуре собственные УЦ, которые осуществляют деятельность только в её интересах, нет необходимости в установлении доверительных связей за пределами данной сети и развертывании технических средств, удовлетворяющих всем требованиям по их надежности и живучести. Таким образом, одноранговая модель доверия для такого вида сетей предположительно является более предпочтительной и требует более детального анализа.

Одноранговая модель доверия выстраивает взаимодействие между несколькими УЦ, образуя архитектуру, в которой отсутствуют головные и подчиненные узлы. Тем не менее, у нее есть возможность включения иерархии в зависимости от приоритета обработки запросов к соответствующим узлам. Главным преимуществом одноранговой модели состоит в том, что

в случае компрометации какого-либо узла в сети другие узлы легко аннулируют его сертификат, исключая данный узел из информационного обмена.

Однако, несмотря на высокую масштабируемость одноранговых сетей, создание структуры сертификации является трудоемкой задачей в виду того, что при ее построении требуется конечная согласованность между узлами. Каждый узел должен быть уверен в том, что имеет полный достоверный список всех сертификатов в РСУЦ и соответствующую ему базу данных, при этом целесообразно применение концепции ZeroTrust (нулевое доверие) [4].

Данная концепция говорит о постоянном контроле узлов системы при каждом их информационном взаимодействии, при этом требует постоянного подтверждения каких-либо операций на основе аутентификации и авторизации. Кроме того, в условиях нулевого доверия требуется рассмотрение возможности делегирования функций выходящих из строя УЦ. Основные функции УЦ, реализуемые в РСУЦ, обеспечиваются аппаратными и программными средствами УЦ. Работоспособное техническое обеспечение УЦ определяет свойство доступности информации, однако не все функции УЦ нарушают данное свойство.

С целью определения списка критически важных функций используем теоретико-множественный подход [5].

### **Формализованная оценка возможности делегирования или заблаговременного распределения критически важных функций удостоверяющих центров в РСУЦ**

Введем обозначение множеств:

**$N$  (nodes)** – множество узлов в сети ( $a=|N|$ );

**$CC$  (certification center)** – подмножество удостоверяющих центров в РСУЦ ( $b=|CC|$ );

**$DCC$  (destroy certification center)** – вектор вероятностей, с которой узлы будут выходить из строя в условиях активных деструктивных воздействий, ( $b=|DCC|$ );

**$WN$  (working nodes)** – подмножество узлов в сети, оставшихся работоспособными после деструктивного воздействия, ( $c=|WN|$ );

**$FCC$  (function sof certification center)** – множество критически важных функций, исполняемых каждым УЦ в РСУЦ, ( $d=|FCC|=6$ );

**$PE$  (possibility of execution)** – вектор возможности исполнения критически важных функций УЦ размерностью  $d$ ,  $pe \in \{0,1\}$  – элемент вектора делегирования критически важных функций УЦ, принимающий значение 0, если функция исполняется, и 1 – если функция не исполняется;

**$PD$  (possibility of delegate)** – вектор возможности делегирования критически важных функций УЦ размерностью  $d$ ,  $pd \in \{0,1\}$  – элемент вектора делегирования критически важных функций УЦ, принимающий значение 0, если функция не может делегироваться, и 1 – если может быть делегирована;

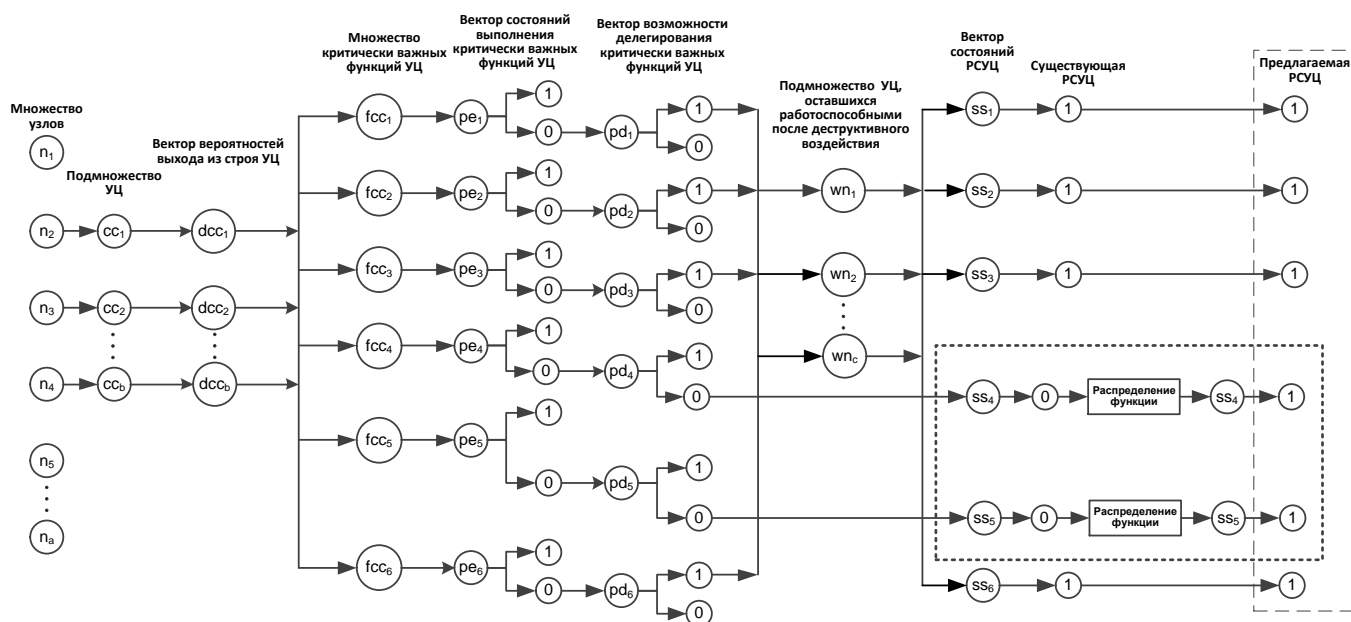
**$SS$  (System status)** – вектор состояний РСУЦ в каждый момент времени размерностью  $d$ ,  $ss \in \{0,1\}$  – элемент вектора состояний системы, принимающий значение 0, если сетевые ресурсы системы недоступны, и 1 – если доступны.

Для существующих критически важных функций УЦ отразим возможности их делегирования в РСУЦ в таблице.

## Возможность делегирования функций работоспособным узлам после деструктивного воздействия злоумышленников

№ п/п	PCУЦ	
	<i>FCC</i>	<i>PD</i>
1.	$fcc_1$ – генерация ключей	$pd_1=1$ – можно делегировать
2.	$fcc_2$ – выдача средств ЭП	$pd_2=1$ – можно делегировать
3.	$fcc_3$ – генерация сертификатов	$pd_3=1$ – можно делегировать
4.	$fcc_4$ – аннулирование сертификата	$pd_4=0$ – нельзя делегировать
5.	$fcc_5$ – запись сертификатов в реестр	$pd_5=0$ – нельзя делегировать
6.	$fcc_6$ – проверка подлинности ЭП	$pd_6=1$ – можно делегировать

В случае возможности делегирования критически важных функций другим узлам в PCУЦ или их распределения между всеми узлами, предполагается повышение живучести системы в условиях активных деструктивных воздействий злоумышленника с целью обеспечения доступности авторизованных абонентов к ресурсам всей системы (показано на рисунке).



**Структурно-логическая схема оценки живучести PCУЦ**

Из данных, приведенных в таблице, видно, что в настоящее время каких-либо технологий, позволяющей осуществлять делегирование функций 4 и 5 для одноранговой модели доверия, не предлагалось, при этом сбой одного узла не приведет в неработоспособное состояние всю систему, однако не будут доступны сетевые ресурсы вышедшего из строя узла, что исключит информационное взаимодействие с множеством абонентов, принадлежавшим данному узлу.

С целью устранения данного недостатка предлагается проанализировать применимость технологии распределенных реестров (блокчейн), так как в данной технологии осуществляется распределенное управление записью данных в одноранговой сети, обеспечивая их конечную согласованность и нулевое доверие. Кроме того, чтобы автоматизировать процессы, необходимые для осуществления контроля над инфраструктурой, также необходимо рассмотреть технологию самоисполняющихся цифровых договоров (смарт-контрактов).

## Заключение

При проведении анализа предложенной модели оценки живучести РСУЦ можно сделать вывод, что одноранговая модель доверия для корпоративных сетей является наиболее предпочтительной из рассмотренных альтернатив, так как в большинстве случаев нет необходимости в доверии за пределами данных сетей. Возможность делегирования всех критически важных функций другим узлам позволяет сохранить доступность сетевых ресурсов РСУЦ, однако при невозможности его реализации, требуется заблаговременное распределение данных функций между узлами в соответствии с определённым алгоритмом, что позволит повысить её живучесть. С этой целью в дальнейших исследованиях предлагается проанализировать применимость технологии распределенных реестров, так как данная технология синтезирует модель однорангового доверия с концепцией ZeroTrust.

## Библиографический список

1. «Статья по проблематике Единого пространства доверия электронным подписям,» [Электронный ресурс]. Available: <http://smev.gosuslugi.ru/portal/api/files/get/1080>.
2. **Полянская, О.Ю.** Инфраструктура открытых ключей: учеб. пособие / О.Ю. Полянская, В.С. Горбатов. – М: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 368 с.
3. PKI: Implementing & Managing E-Security // A. Nash, B. Duane, D. Brink, C. Joseph. – McGraw-Hill Osborne Media, 2001
4. «Zero Trust: никому не доверять.» [Электронный ресурс]. Available: <http://securitylab.ru/blog/company/PandaSecurityRus/343497.php>.
5. **Новиков, Ф.А.** Дискретная математика для программистов: учебник для вузов. 3-е изд. / Ф.А. Новиков. – СПб.: Питер, 2009. – 384с. ил

**A. S. Toroev, A. B. Sizonenko, S. Yu. Kozlov**

## ANALYSIS OF THE SURVIVABILITY OF A DISTRIBUTED SYSTEM OF CERTIFICATION CENTERS UNDER THE CONDITIONS OF ACTIVE DESTRUCTIVE ACTIONS OF AN ATTACKER

Krasnodar higher military school

The survivability of a distributed system of certification centers (CC) depends on the survivability of network resources and the selected model of trust between its nodes. This article analyzes the basic models of trust, describes the advantages and disadvantages of each of them, as well as their applicability in different conditions of the system. The peer-to-peer trust model based on the Zero Trust concept is considered in more detail with the aim of its possible implementation for private corporate networks. Formalized assessment of the possibility of delegating critical functions of failed certification centers in order to assess the survivability of the system as a whole, while it is proposed to analyze the possibility of using distributed registry technology in order to improve it.

**Keywords:** distributed system, certification center, trust model, peer-to-peer network, distributed registry, Zero Trust, survivability.

Ю.А. Белевская, А.П. Фисун

**ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПОЛИТИКО-ПРАВОВАЯ  
ЭВОЛЮЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА:  
ВЗАИМОСВЯЗЬ, КОНЦЕПЦИИ, СОСТОЯНИЕ, ГИПОТЕЗЫ**

Орловский государственный университет, г. Орел

**Цель.** Развитие теоретико-методологических основ информационной, правовой, экономической, политической, других наук, как основного инструмента решения актуальных прикладных задач современного информационного общества и его сфер в условиях глобального и непрерывного воздействия угроз

**Методы решения проблемы.** Системный анализ, информационно-деятельностный комплексный подход исследования эволюции, информационного общества через содержание и формы политико-правовых, общественных отношений, являющихся «концентрированным выражением экономики», основанных на реализации информационных процессов во всех материально-энергетических и информационной сферах, направленных на удовлетворение определенных целей человека, общества, государства, достижения ими конкретных результата.

**Основные результаты моделирования и их научная новизна.** Системное представление взглядов, подходов, концепций и принципов формирования понятийного базиса, информационной, правовой, экономической, политической и других наук современного информационного общества, их центральных понятий: «информация», «информационное общество», «информационная безопасность информационного общества». Выявлено, что информационное общество – это и общество, в котором все правовые, политические, экономические и другие общественные отношения во всех сферах и видах деятельности имеют информационный характер, определяются основным объектом этих отношений – информацией, удовлетворяющей требованиям безопасности, достоверности, своевременности и требующее регулярного и непрерывного обеспечения информационной безопасности.

**Практическая значимость.** В статье проанализированы и систематизированы взгляды и подходы отечественных и зарубежных ученых на определение содержания и особенностей информационного общества, ценности научного знания о нём, являющиеся эффективным инструментарием обеспечения его функционирования и прогнозирования направлений развития, наиболее значимых для человека, общества, национальной государственной политики в целом и институтов гражданского общества в частности.

**Ключевые слова:** информация, информационное общество, информационная безопасность, экономическая, социальная, политическая, информационная сферы, гражданское общество.

**Введение**

Актуальность исследования политико-правовой эволюции информационного общества в условиях глобальных и непрерывных угроз его безопасности, и прежде всего информационной (ИБ), неразрывно связанного с необходимостью исследования направлений развития теоретико-методологических основ информационной, правовой, экономической, политиче-

ской, других наук и научных направлений может быть обоснована важными трендами современного, демократического, гражданского общества, которые нашли своё отражение в посланиях Президента России Федеральному Собранию 2018 и 2019 годов, нацеленных на решение проблем обеспечения устойчивости, стабильности сфер жизни страны, её развитие и обновление, а также задач внутреннего социального и экономического развития, реализации национальных проектов, направленных на запросы и ожидания граждан страны, достижение нового качества жизни для всех поколений, обеспечение динамичного развития России [1].

Рассмотрение искомой проблемы развития информационного общества основано на подходах и традициях: 1) политико-правового анализа и методологии греко-римской философии, рассматривающей общество, как множество равных и свободных субъектов, участников политической и экономической жизни; 2) взглядов Гоббса на общество, которое, в отличие от взглядов Аристотеля, носит искусственно созданный людьми механизм, требующий от людей умения договариваться и соблюдать без нарушений договорённости [2]; 3) представления Д. Локком общества, как некоего коллектива, основанного на общественном договоре на принципах свободы и равенства; 4) взглядов Гидденса на эволюцию общества в целом через призму рефлексии, определяющей возможность и способность общества в экономической, политической и других сферах деятельности изменяться, в том числе и развиваться, только при наличии новой информации.

Исходя из последнего подхода рассмотрения эволюции общества, подтверждающего его информационную природу, можно утверждать, что значительные, несопоставимые скорости создания и распространения информации в современном мире, влекут реальные последствия изменения общества и потенциальные угрозы, обусловленные несоответствием требований к её свойствам своевременности, достоверности, безопасности, полноты, релевантности, пертинентности и др. Такие нарушения явно и косвенно, оказывает разрушающее воздействие на человека, общество, государство, развитие его политической, экономической и других сфер и видов деятельности, что подтверждает значимость качественной информации, как основного объекта, для эффективного развития всех сфер информационного общества, его экономических, политических процессов и политической деятельности государства.

### **Анализ и систематизация подходов к формированию понятия и содержания эволюционирующего информационного общества**

Для анализа и систематизации подходов к формированию понятия, содержания и особенностей информационного общества (ИО), используется информационно-деятельностный и системный метод исследования. Современное общество приобрело право называться информационным в связи с ростом информационных технологий [3]. При этом основными в таком обществе являются знания, информация, полученные с использованием современных информационно-телекоммуникационных технологий (ИКТ), которые позволяют эффективно управлять экономикой и политикой государства, предоставляя новые возможности политической сфере ИО [3]. Однако, сведение понятия ИО к понятиям «электронного правительства», «электронной демократии», существенно сужает содержание ИО, сводя его к содержанию только производных продуктом ИО, представляемых субъектам информационных услуг в электронном виде. Содержание же ИО, его политическое осмысление, по нашему мнению, должно определяться много векторными направлениями развития его политической, экономической, информационной и других сфер в тесном взаимодействии с институтами демократического, гражданского общества.

В ходе исследований, кроме рассмотренных подходов, были выявлены и выделены и другие подходы, концепции взгляды на формирование содержания и эволюцию ИО.

*Определение 1.* Информационное общество, как понятие политологии и социальной философии [4], характеризует его как общество постиндустриальное, основанное на активном потреблении информации, информационных продуктов и услуг, развитии новых ИКТ.

*Определение 2.* Информационное общество связано с радикальным обновлением всей жизни человечества, его политической, экономической или социальной сфер, что обусловило многообразие содержаний, объединённых латинской приставкой «пост» («после»), отражающих сведения о каких-то «...всемирных катаклизмах, глобальных переворотах в технике и в сознании людей, обуславливающих начало новой эры, эпохи, возникновения нового общества», что требует поиска «...принципиальной новизны грядущего общества» [5].

Такое пояснение природы ИО не совсем корректно, предполагает его формирование только лишь в ходе так называемой *информационной революции и информатизации*, что существенно сужает понимание содержания и особенностей ИО на различных этапах исторического развития.

*Определение 3.* Информационное общество, как высшая форма развития гражданского общества может быть определено через его отличительные черты, определяющие в целом его содержание: увеличение роли информации, знаний, ИКТ в жизни общества; возрастание числа людей, занятых в сфере ИКТ, производстве информации; информатизации общества; создание глобального информационного пространства [6]. Такое содержание, связывает природу ИО с процессом информатизации и развитием новых ИКТ.

*Определение 4.* Информационное общество (Information society) – общество, находящееся на ступени развития современной цивилизации, характеризующейся увеличением роли информации и знаний в жизни общества, возрастанием доли ИКТ, информационных продуктов и услуг в валовом внутреннем продукте, созданием глобальной информационной инфраструктуры, обеспечивающей информационное взаимодействие [7].

*Определение 5.* Информационное общество – «...общество – как совокупность физических субъектов (личностей), объединённых определёнными коммуникативными отношениями, имеющими социально-информационную природу и образующими социально-информационное пространство» [8], осуществляющих социальное взаимодействие, представляющее все виды информационной деятельности во всех отраслях, их обеспечивающих, всех занятых обработкой информации [9].

*Определение 6.* Информационное общество – общество с усложненной децентрализованной структурой и преобладанием сетевых коммуникаций [10].

*Определение 7.* ИО – общество, в котором информация, уровень ее применения, доступности, существенно влияют на экономические и социокультурные условия жизни граждан [11].

*Определение 7.* Гражданское общество, рассматривают как не общечеловеческое и не общенаучное понятие, а идеологему, сформированную западноевропейской цивилизацией, основанной на Y-матрице, и навязываемой остальным обществам, народам, в том числе и России, качестве образца самооценки и подражания, что неприемлемо для России [12].

*Определение 8.* Информационное общество – общество, где процесс компьютеризации даст людям доступ к достоверным источникам информации, обеспечит высокий уровень автоматизации производства (Ю. Хаяши: Economic Planning Agency – «Японское ИО: темы и подходы»; Japan Computer Usage Development Institute – «План ИО», 1971; Industrial Structure Council – «Контур политики содействия информатизации японского общества», 1969).

*Определение 9.* Информационное общество – бесклассовое, бесконфликтное, общество согласия, с небольшим правительством и государственным аппаратом, представляющее по-



стиндустриальное общество, в котором «изменится само производство – продукт его станет более «информационно емким», что означает увеличение доли инноваций, дизайна и маркетинга в его стоимости, а основной ценностью его станет не потребление товара, как в индустриальном, а время [16]. Этот вариант концепции ИО связан с решением задач экономического развития Японии. Поэтому имеет некоторую ограниченность.

*Определение 9.* Формирование и развитие ИО отождествляют с постиндустриальным обществом, образовавшимся в результате раздела истории человеческого общества на три стадии – аграрную, индустриальную и собственно постиндустриальную, признаки которой определяются через характеристики индустриальной стадии, а сущность определяется как организованное вокруг производства вещей и машин для производства вещей. Индустриальное общество эволюционирует к постиндустриальному, которое и должно стать определяющей социальной формой XXI века [17].

*Определение 12.* Содержание ИО связывают с наступлением новой технической эры, обеспечившей конкретный уровень производства товаров и услуг и новые возможности для дезинтеграции Советского Союза [18].

*Определение 10.* Информационное общество – «совершенное рыночное общество, в котором образование и информация сделают каждого человека осознающим коллективные ограничения, и общество совершенного планирования, где центр получает от каждой единицы базиса верные сообщения о ее целях и предпочтениях и в соответствии с этим формирует собственную структуру и позицию. Информация и участие в управлении развиваются в едином процессе» [25]. Полагая, что ИО будет менее четко социально структурировано и более полиморфно, чем общество индустриальное, одним из факторов полиморфизма будет отношение различных групп к тенденции упрощения языка, связанной, в частности, с обеспечением эффективности баз данных, других электронно-опосредованных коммуникаций, что предполагает единый язык компьютеризации, способствующей преодолению культурного неравенства [25].

*Определение 11.* М. Информационное общества – общество в котором знание (или информация) является основной ценностью современного общества [19]. При этом нельзя сводить в одно понятие различное понимание признаков и видов общества, так как «определение новых явлений становится определением всего общества», нельзя понимать информацию только как экономическое явление, так как легкость, с которой информация может воспроизводиться или передаваться, уже разрушает правовую систему, устои, которые были сформированы для защиты частной собственности на материальные вещи. [19].

### **Утверждения и гипотезы зарождения, формирования и развития информационного общества**

Исходя из рассмотренных первопричин, истоков зарождения, подходов и концепций формирования и развития ИО, и определения его содержания [1-19], рассмотрения его как переходной формы развития или «высшей формы, этапа развития» [13, 14, 15], можно сделать следующие выводы, утверждения, гипотезы.

**1.** ИО зародилось, существовало и развивалось на всех этапах исторического формирования социума, развития человечества, а его основной объект «информация» существует вне зависимости от нашего к ней отношения и не связано с конкретным историческим этапом развития человека, общества, государства. Такая концепция определения содержания ИО не исключает возможности уточнения, расширения, более полного, четкого представления его содержания на каждом историческом этапе, связанных с основными понятиями терми-

на «информации», её особенностями на определенных этапах и уровнях общественных отношений.

**2.** Концепции, формирования ИО, подчеркивали ценность научного, теоретического знания, информации, прогнозировали возрастание их роли в обществе с развитием компьютерных и телекоммуникационных технологий, усилением тенденций развития ненаучной информации ее соотношении с иными видами информации, их влияния на формирование ИО.

**3.** Основной шкалой оценки эффективности информации, являются её свойства (своевременность, достоверность, безопасность и другие), выступающие критериями оценки развития ИО и обеспечения его ИБ, для которого характерны: бурное развитие ИКТ, формирующих новую культуру потребления; приобретение «вещей одноразового пользования», ускоренное обновление товаров, традиционно считавшихся «товарами длительного пользования»; изменение характера межличностных менее устойчивых отношений; обострение ряда противоречий между прогрессом, новыми возможностями и сменой ценностных ориентиров, неспособностью прийти к единому стандарту поведения (пример – регулирование Интернета), общим правилам, языку, что приводит при развитии ИО к резкому росту субкультур, увеличению степени «конфликтности» общества [20-24].

**4.** Исследователи ИО, оперируют недостаточно разработанными определениями изучаемого объекта, изучают особенности ИО без обоснованного выбора его показателей и критериев, понимая возрастающее значение информации, не дают точного представления о том, когда эта информация заняла такое важнейшее значение во всех сферах личности, общества и государства.

**5.** Центральным понятием во всех сферах ИО является понятие «информация», содержание которой определяется её свойствами и относится к понятийному аппарату ИО, способствует формированию подходов к определению его содержания.

**6.** Множество подходов к формированию содержания ИО связано особенностями развития отдельного государства, отдельно взятого исторического периода. Основываясь на центральном понятии «информация», ее характерных признаках, особенностях, необходимо избегать рассмотрения ИО, как общества возникающего в связи с бурным развитием ИКТ, ростом экономического, инновационного потенциала, дабы не сужать смысл ИО на рассматриваемых этапах его исторического развития и учитывать влияние понятия «информация», трансформации ее природы на общественные отношения в данном историческом периоде.

**7.** Современное ИО – это форма социально-политического, экономического взаимодействия, основанная на реализации информационных процессов и направленная на удовлетворение определенных потребностей личности, общества и государства, достижения ими конкретного результата в зависимости от заданного исторического этапа и при обеспечении их ИБ; общество, в котором все социально-политические и экономические отношения имеют информационный характер, определяемый основным объектом общественных отношений – информацией. Существенные признаки при формировании содержания понятия «ИО» дают основания для отнесения его к категориальному аппарату всех его сфер, в том числе экономической, политической, правовой и другим.

**8.** Утверждать о возникновении и содержании ИО как о каком-то новом обществе, возникшим в результате определённых, но ограниченных факторов исторических этапов развития общества – некорректно в силу многообразия и разнообразия возникновения, суще-

ствования, отмирания общественных отношений на конкретных исторических этапах развития общества, являющимися всегда информационно-материально-энергетическими.

**9.** Основным, центральным объектом общественных отношений на всех уровнях и этапах развития общества, государств, истории развития цивилизации, является информация, обеспечивающая, определяющая и обуславливающая, существование человечества, формирование, развитие всех уровней и этапов общества и государства, создание материально-энергетических и информационных продуктов, услуг для удовлетворения потребностей личности, общества и государства.

**10.** ИО было всегда и любое общество, государство и цивилизация, в целом – всегда являлись и являются информационным. Поэтому корректнее утверждать о существовании его этапов, фаз, стадий с конкретным, относительно полным и объективным содержанием на конкретных исторических этапах, классификация которых принята в исторической науке: появления письменности, книгопечатания, электричества, телеграфа, телефона, радио, компьютеров, сети «Интернет» ИО).

### **Заключение**

Определение содержания этапов развития ИО, причин и источников его происхождения, основано на систематизированных исторических причинно-следственных связях, факторах изменения социально-экономических формаций цивилизаций, рассмотренных взглядах, концепциях, что позволяет сформулировать следующую концепцию: причинами перехода общества на новый этап, в новую информационную формацию, являются рост объёмов информации («информационные взрывы»), обусловленные ростом количества субъектов общественных информационных отношений, «массы» («объёма») потребностей субъектов общественных отношений». Выбор такой упрощённо-примитивной формулы роста объёмов информации от количества населения (субъектов) позволяет определить относительные точки отсчёта стадий развития ИО, принятых в исторической классификации так называемых информационных революций, которая также может быть интерпретирована экспоненциальной моделью роста объёма информации на временной оси. При этом необходимо также рассматривать более строгие и сложные зависимости роста информации на различных этапах развития цивилизации.

### **Библиографический список**

1. Послания Президента РФ Федеральному Собранию РФ. 27.02.2018, 20.02.2019 г.г. [Электронный ресурс]: URL:<http://kremlin.ru/events/president/news/>
2. **Гоббс, Т.** Ливиафан. Т.2. С.97.
3. Политология. Под ред. В.К. Батурина. – 4-е изд., перераб. и доп.- М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2016. – 567с. С.529-530
4. **Соловьев, Э.Г.** Новая философская энциклопедия Институт Философии Российской Академии Наук. URL: <http://iph.ras.ru/elib/1265.html>.
5. **Бутенко, Е.В.** Эволюция теорий информационного общества: дис...канд. философ. наук: 09.00.11/ –Томск, 2004 – 130с.

6. **Куняев, Н.Н.** Правовое обеспечение национальных интересов Российской Федерации в информационной сфере / Н.Н. Куняев. – М.: Логос, 2010. –С. 176-185.
7. Глоссарий по информационному обществу / Под общ. ред. Ю.Е. Хохлова. — М.: Институт развития информационного общества, 2009. — С.62-63.
8. **Сляднева, Н.А.** Социально-информационные технологии как синергетический фактор социального управления // Социально-информационные технологии: проблема двойного назначения. Аналитико-прогностические исследования. Ч. 1. М.: МГУКИ, 2004. 13-34.
9. **Смолян, Г.Л.** Некоторые ключевые понятия информатизации: категориальный статус и предметная область // ИО. - №1. – С.7-17.1
10. **Войниканис, Е.А.** Парадигма интеллектуальных прав с точки зрения теории права: общая характеристика // Право и государство: теория и практика.- 2015.- №7 (127). – С.6-10.
11. Стратегия развития ИО в Российской Федерации [Электронный ресурс]: [Утверждена Президентом Российской Федерации 7 мая 2017г. № Пр.-203.]. - URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919/>
12. **Кирдина, С.Г.** Гражданское общество: уход от идеологемы 1 [Текст] // Социологические исследования. 2012. - №2 (382). – С.63-67.
13. **Караваяев, Н.Л.** ИО: попытка осмысления сущности понятия //НТИ. – 2014. - №6. – С. 1-6.
14. **Караваяев Н.Л.** О плюрализме трактовок понятия «информация» //НТИ. – 2014. - №4. – С. 9-13.
15. **Фролова Е.А.** Социальное и экономическое благополучие современного информационного общества / Е.А. Фролова, М.В. Рыжкова, Э.Р. Кашапова // ИО. – 2015. - №5. – С. 3-7.
16. **Баева, Л.В.** Исследовательские мегатренды в условиях ИО и проблемы социокультурной безопасности // ИО. – 2015. - №2-3. –С.13-24
17. **Masuda, Y.** The Information Society as Postindustrial Society. Wash.: World Future Soc., 1983, p. 29.
18. **Bell, D.** The Coming of Post-industrial Society. A Venture in Social Forecasting. N.Y., Basic Books, Inc., 1973.
19. **Brzezinsky, Z.** Between Two Ages. America's Role in the Technotronic Era. N.Y.: The Viking Press, 1970.
20. **Poster, M.** The Mode of Information: Poststructuralism and Social Context. Cambridge: Polity Press, 1990.
21. **Toffler, A.** Powershift: Knowledge, Wealth and Violence at the Edge of the 21st Century. N.Y., 1990.
22. **Ракитов, А. И.** Философия компьютерной революции / А.И. Ракитов. - М.: Политиздат, 1991. С. 91.
23. **Ракитов, А.И.** Наш путь к информационному обществу // Теория и практика общественно-научной информации. М.: ИНИОН, 1989.
24. **Курносков, И.Н.** ИО в России: особый путь // Информ-ревью. 1997. №
25. **Смирнов, А.И.** Информационная глобализация и Россия: вызовы и возможности / А.И. Смирнов. - М.: Издательский дом «Парад», 2005.
26. **Nora, S., Minc A.** The Computerisation of Society. A Report to the President of France. Cambridge, L., 1980 p. 135

A. P. Fisun, Yu. A. Belevskaya

## INFORMATION SECURITY AND POLITICAL AND LEGAL EVOLUTION OF THE INFORMATION SOCIETY: RELATIONSHIP, CONCEPTS, STATE, HYPOTHESES

Oryol State University

**Goal.** Development of theoretical and methodological foundations of information, legal, economic, political, and other Sciences as the main tool for solving actual applied problems of the modern information society and its spheres in the conditions of global and continuous impact of threats.

**Methods for solving the problem.** System analysis, information and activity complex approach to research the evolution of the information society through the content and forms of political, legal, social relations, which are "concentrated expression of the economy", based on the implementation of information processes in all material, energy and information spheres, aimed at meeting certain goals of the person, society, state, and achieving specific results.

**The main results of modeling and their scientific novelty.** System representation of views, approaches, concepts and principles of formation of the conceptual basis, information, legal, economic, political and other Sciences of the modern information society, their Central concepts: "information", "information society", "information security of the information society". It is revealed that the information society is also a society in which all legal, political, economic and other public relations in all spheres and types of activity are informational in nature, determined by the main object of these relations-information that meets the requirements of security, reliability, timeliness and requires regular and continuous information security.

**Practical significance.** The article analyzes and systematizes the views and approaches of domestic and foreign scientists to determine the content and features of the information society, the value of scientific knowledge about it, which is an effective tool for ensuring its functioning and forecasting the directions of development that are most important for the individual, society, national state policy in General and civil society institutions in particular.

**Keywords:** information, information society, information security, economic, social, political, information spheres, civil and democratic society

## Секция 5. Техническая кибернетика

### 5.1. Системы обработки информации

УДК 004.62

А.Д. Леонов, М.Б. Багиров, Т.Л. Бородина, Т.Д. Карклин, В.С. Салтыков

#### РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ КОРЗИНЫ ПОКУПАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

В настоящее время в сфере торговли генерируется большое количество неиспользуемых данных, при анализе которых возможно получение высокоуровневой мета-информации с высокой долей включения в процесс взаимодействия потребителей и торговых сетей. Необходимо разработка и автоматизация интеллектуальных алгоритмов по работе с такими объемами данных с целью прогнозирования потребительского спроса с использованием технологии больших данных.

**Ключевые слова:** большие данные, сбор данных, анализ данных, рекомендательная система, задача кластеризации, унификация данных.

#### Введение

В настоящее время наметилась тенденция роста доли расходов населения на продукты питания. Одна из причин - продолжающееся сокращение реальных доходов населения и в связи с этим первоочередное потребление товаров первой необходимости. Большинство граждан отмечают подорожание продуктов. Индекс роста цен на них за последние полгода составил 10–15%. По прогнозам экспертов, цены продолжают расти. А значит, пора учиться экономить. Разрабатываемая система позволит существенно снизить расходы на продукты питания.

Эффективное планирование бюджета и времени — одни из главных проблем современного общества. В особенности, когда речь идет о продуктах питания. Ведь порой покупка продуктов на неделю вперед резко «бьет» по кошельку, а на поиск магазина, в котором большинство продуктов из списка товаров будут стоить по минимальной цене, уйдет много драгоценного времени.

Анализ совершенных покупок, реализуемый на базе самообучающейся прогностической системы, позволит выявить неявные корреляционные зависимости между определенными категориями товаров, и внешними по отношению к торговой площадке событиями, - сезонность, праздники, местоположение и др. Разработанная система позволит прогнозировать изменения спроса на товары, с учетом большого количества факторов.

Целью данного исследования является проектирование системы прогностической анали-

тики, предназначенной для анализа и формирования списка поисковых запросов пользователей торговой сети. Выявление зависимостей среди собранных данных пользователя системы для прогнозирования спроса с учётом разнообразных факторов, базируясь на технологии больших данных.

Необходимость проведения данной работы обуславливается тем, что мы снижаем затраты клиентов на поиски отдельных товаров по акции, предоставляя им готовый вариант (магазин) с минимальной корзиной покупателя и находящимся в доступных пределах. Также с помощью рекомендательной системы мы напоминаем клиенту о товарах, которые он, возможно, забыл указать в своей продуктовой корзине, или предложить ему товары, которые лучше всего могут подойти к тем, которые он указал. Таким образом, разрабатываемую нами систему можно будет использовать как базис для реализации других подобных систем.

Разрабатываемая система ориентирована не только для клиентов торговых сетей, но также и для самих торговых сетей. Фиксируя покупки покупателя в целом можно выявить покупательную способность и востребованность в том или ином товаре, а также избежать рисков закупки продукции в больших объемах, которая может оказаться невостребованной. Ключевыми преимуществами системы перед конкурентами являются выявление скрытых корреляционных зависимостей между определенными категориями товаров, предоставление аналитического среза торговым сетям и геотаргетирование.

### **Разработка клиент-серверного приложения**

Программное обеспечение прогностической системы будет построено на архитектуре "клиент-сервер".

Клиентская часть представляет из себя мобильное приложение, устанавливаемое на мобильное устройство пользователя, имеет следующее функциональное назначение:

- 1) отображает справочную информацию об ассортименте, ценах, скидках, акциях и иной информации производителей и продавцов товаров повседневного спроса;
- 2) сохраняет в режиме реального времени информацию о геолокации человека;
- 3) осуществляет передачу собранных данных в зашифрованном виде на сервер ;
- 4) предлагает список ближайших торговых сетей с наиболее низкими ценами на интересующие пользователя товары, учитывая геолокационные данные;
- 5) предлагает список ближайших торговых сетей с наиболее выгодным стоимостным предложением на интересующую пользователя группу товаров, учитывая геолокационные данные;
- 6) на основе предпочтений человека предлагает персонализированную информацию о предложениях и акциях в торговых сетях.

Серверная часть будет включать систему хранения собранных данных и алгоритмы их интеллектуального анализа.

Клиент, установленный на устройстве А и Б, сообщает данные между сервером. Сервер играет роль связующего звена между устройством А и Б... и т.д. Также он играет роль «накопителя» данных, для их восстановления, на случай удаления на одном из клиентских устройств. Взаимодействие будет производиться путем HTTP запросов и JSON ответов.

Клиент будет посылать POST запросы серверу, для внесения данных в БД, и GET запросы, для отображения находящихся в БД данных на устройстве. Связь данных для конкретного устройства будет происходить по android\_id — уникальному uid android устройства.



**Рисунок 1. Архитектура разрабатываемой системы**

В связи с тем, что Android не может напрямую взаимодействовать с СУБД, которые расположены на сервере, возникла необходимость написать свой сервер, для «общения» с приложениями-клиентами. Для этого было решено выбрать программную платформу Node.js[1] и фреймворк Express [2]. Данная платформа была выбрана, поскольку она позволяет работать в единственном потоке, имеет отличную производительность, позволяет поддерживать десятки тысяч конкурентных соединений и передает ошибки вызывающей стороне как параметры обратного вызова, на случай, если какое-то необработанное исключение проскочит и всплывет, существует множество инструментов, позволяющих следить за процессом Node и выполнять необходимое восстановление аварийно завершившегося экземпляра;

Для взаимодействия android приложения и сервера было решено использовать библиотеки Retrofit[3] и RxJava[4].

Retrofit - типобезопасный HTTP-клиент для Android и Java. Он является незаменимым инструментом для работы с API в клиент-серверных приложениях.

Retrofit позволяет сделать полноценный REST-клиент, который может выполнять POST, GET, PUT, DELETE и выполнять запросы (и, следовательно, получать данные) двумя способами — синхронными и асинхронными запросами. Также, чтобы приложение не имело сотню объектов, выполняющих одну и ту же функцию, мы произведем всю инициализацию в классе, унаследованном от Application.

RxJava – библиотека для реактивного программирования. Rx применяется для составления и обработки последовательностей событий. Например: UI события, такие как buttonclick, события вроде изменения свойства, обновления коллекции, «Заказ оформлен», «Регистрация закончена» и т. д.



В итоге, функционал сервера описывается следующим образом: android приложение посылает запрос на сервер, сервер обрабатывает тело запроса и передает его СУБД, СУБД формирует ответ по данным запроса и отправляет на сервер, сервер посылает ответ на android приложение.

### Сбор и обработка данных

Сбор данных осуществляется с официальных ресурсов представителей торговых сетей, с помощью парсера данных, написанного на языке программирования Java. Данный язык выбран потому, что он является кроссплатформенным, простым, высокопроизводительным, многопоточным и хорошо подходит для работы с базой данных и Web-серверами. Парсер функционирует, используя инструмент, такой как Selenium Web Driver – драйвер браузера.[5] Данный драйвер отлично работает на языке программирования Java, его можно использовать с любым современным веб-браузером, а также он позволяет работать с сайтом после выполнения на нем всех JavaScript'ов. Так же он хорош и тем, что можно просматривать работу данного драйвера, как он ведет себя на сайте, и сразу отлавливать моменты, в которых возникают различного рода ошибки в программном коде. Это упрощает работу с браузером в несколько раз.

Исходя из структурной составляющей покупки товара в магазине и проанализированных исходных данных, была составлена главная схема хранения данных (см. рис. 2).

- USER – Пользователь системы, его имя, контактная информация, описание, геолокация. С пользователем связан RankList и License. Также пользователи могут быть объединены в группы.
- RankList – Объект, представляющий из себя статистику по продуктам, купленным пользователем, составляют часть статистики.
- License – объект лицензии, может относиться как к пользователю, так и к торговой сети.
- Group – группа пользователей
- Commercial\_network – коммерческая сеть, ее описание и контактная информация. Этот объект связан с магазинами сети и хранит аналитику.
- Store – магазин, содержит в себе контактную информацию, геолокацию, описание.
- Classification – классификатор, описывающий определённый тип продукции.
- Item – продукт и его описание
- Attachment – любой файл, например картинка продукта, накладные и прочее.
- Receipt – чек, представляющей из себя список продуктов. Причем чек может быть связан как с магазином, так и с пользователем, его реализовавшим.

Данные решено было хранить в NoSQL[6] базе данных. Смысл таков, что в NoSQL базах в отличие от реляционных структура данных не регламентирована (или слабо типизированна, если проводить аналогии с языками программирования) — в отдельной строке или документе можно добавить произвольное поле без предварительного декларативного изменения структуры всей таблицы. Таким образом, если появляется необходимость поменять модель данных, то единственное достаточное действие — отразить изменение в коде приложения. В отличие от реляционной модели, которая сохраняет логическую бизнес-сущность приложения в различные физические таблицы в целях нормализации, NoSQL хранилища оперируют с этими сущностями как с целостными объектами.

Для унификации наименований товаров, из данных были удалены знаки препинания. Чтобы установить правильную связь слов в наименовании и избежать возникновения дополнительных ошибок, было принято решение не применять лемматизацию слов и приведение к единому регистру.

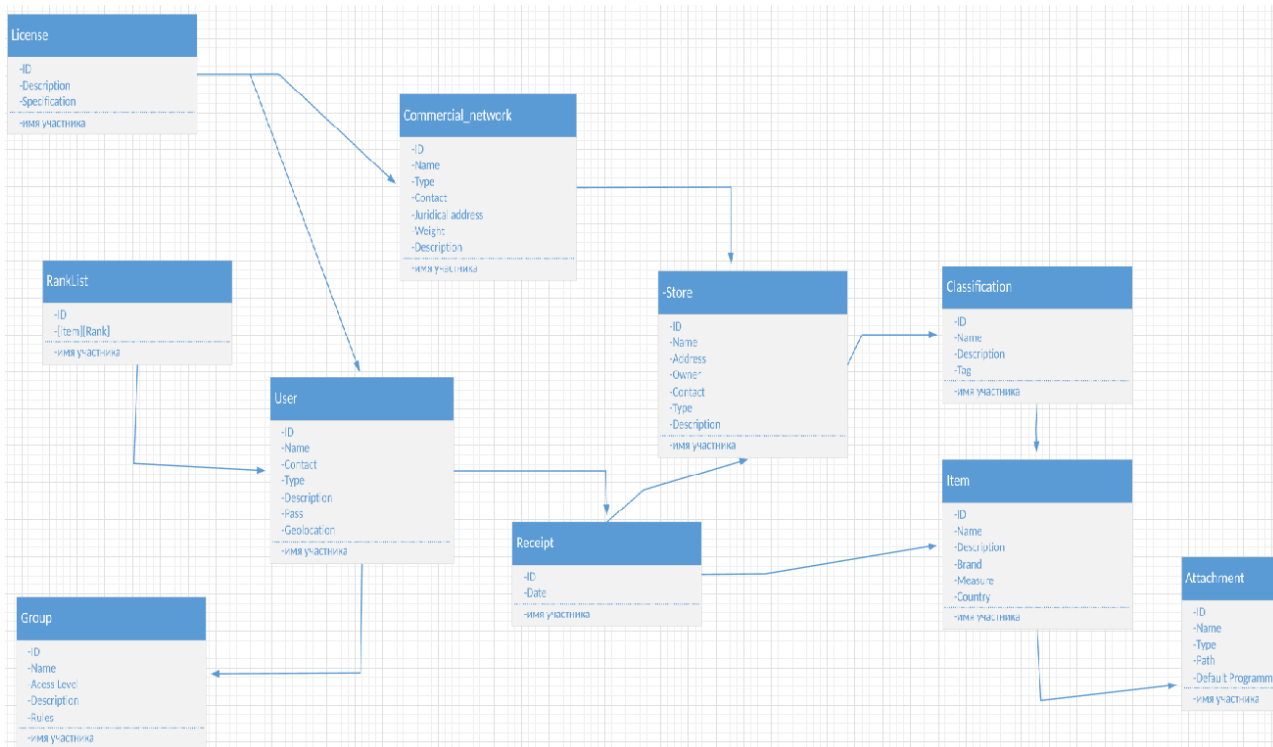


Рисунок 2. Главная схема хранения данных

### Рекомендательная система

Для рекомендательной системы было решено использовать рекомендации, основанные на контенте (content-based)[7] – рекомендации основаны на данных, собранных о каждом конкретном товаре. Пользователю рекомендуются объекты, похожие на те, которыми он ранее интересовался либо уже приобретал. Похожесть оценивается исходя из содержимого объектов. Большой плюс — возможность заинтересовать нового пользователя предложениями с первых потребительских шагов. Для этого не нужно долго собирать данные о предпочтениях, а можно сразу включить потребителя в работу с ресурсом. Возможно рекомендовать даже те объекты, которые не получили оценку других пользователей. По мере взаимодействия пользователя с системой, векторные описания приобретенных им товаров объединяются (суммируются и нормализуются) в единый вектор и, таким образом, формируется вектор его интересов. Далее достаточно найти товар, описание которого наиболее близко к вектору интересов, то есть решить задачу поиска  $n$  ближайших соседей.

Не все элементы одинаково значимы: например, союзные слова, очевидно, не несут никакой полезной нагрузки. Поэтому при определении числа совпадающих элементов в двух векторах все измерения нужно предварительно взвешивать по их значимости. Данную задачу решает преобразование TF-IDF, которое назначает больший вес более редким интересам.

Совпадение таких интересов имеет большее значение при определении близости двух векторов, чем совпадение популярных.

$W_{x,y} = tf_{x,y} * \log(N/df_x)$ , где  $tf_{x,y}$  – частота слова  $x$  в описании товара  $y$ ,  $df_x$  – количество товаров, содержащее слово  $x$ ,  $N$  – общее количество товаров.

В качестве меры близости двух векторов чаще всего используется косинусное расстояние.

$$\text{Sin}(A,B) = \cos(\theta) = (A * B) / |A| * |B|$$

При добавлении новой оценки вектор интересов обновляется инкрементально (только по тем элементам, которые изменились). При пересчете имеет смысл давать новым оценкам чуть больше веса, поскольку предпочтения могут меняться.

## Заключение

В ходе проведения данного исследования были решены следующие задачи:

- 1) разработано клиентское мобильное приложение, реализующее интерфейс взаимодействия пользователя с аналитической системой;
- 2) разработана серверная программная составляющая аналитической системы, осуществляющая обработку запросов от пользователей;
- 3) разработаны средства администрирования и предоставления статистических данных для аналитической системы.

В результате проведенных исследований будет разработано клиент-серверное приложение, осуществляющее сбор статистических данных о структуре потребительской массы и их аналитическую обработку для крупных торговых сетей, а также выдача частных рекомендаций по оптимизации стоимости и территориальной доступности потребительской корзины для конечных пользователей.

## Библиографический список

1. NodeJS [Электронный ресурс], URL: <https://nodejs.org/en/docs/> (дата обращения: 15.08.2019)
2. Express [Электронный ресурс], URL: <https://expressjs.com/> (дата обращения: 15.08.2019)
3. Retrofit 2 [Электронный ресурс], URL: <https://habr.com/ru/post/314028/> (дата обращения: 24.08.2019)
4. RxJava [Электронный ресурс], URL: <http://reactivex.io/documentation> (дата обращения: 24.08.2019)
5. Selenium [Электронный ресурс], URL: <https://www.seleniumhq.org/> (дата обращения: 23.07.2019)
6. NoSQL [Электронный ресурс], URL: <https://habr.com/ru/post/152477/> (дата обращения: 25.07.2019)
7. **Бритвина, Е.** Графовые модели данных и алгоритмы для рекомендательных систем / Е. Бритвина, В. Крылов // LAP Lambert Academic Publishing. 2015.-115 с.

**A.D. Leonov, M.B. Bagirov, T.L. Borodina, T.D. Karklin, V.S. Saltykof**

## DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM TO REDUCE THE COST OF THE CUSTOMER'S BASKET USING BIG DATA PROCESSING TECHNOLOGIES

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva

Currently, a large amount of unused data is generated in the trade sphere, in the analysis of which it is possible to obtain high-level meta-information with a high share of inclusion in the process of interaction between consumers and trade networks. It is necessary to develop and automate intelligent algorithms to work with such volumes of data in order to predict consumer demand using big data technology.

**Keywords:** big data, data collection, data analysis, recommendation system, clustering task, data unification.

Н.П. Степаненко<sup>1</sup>, О.Г. Берестнева<sup>2</sup>, А.Л. Юмашева<sup>2</sup>, И.А. Лызин<sup>2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЗДОРОВЬЯ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ ДЕТЕЙ С ОЖИРЕНИЕМ

<sup>1</sup>ФГБУ СибФНКЦ ФМБА России, Томская обл., ЗАТО Северск, г.Северск

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, Россия, Томск

Рассматриваются вопросы применения математических методов для построения интегральных критериев на основе информативных показателей для оценки индивидуального состояния детей с заболеванием щитовидной железы. Кратко приводится общее описание и роль щитовидной железы в организме, формируется постановка задачи моделирования. Для выделения информативных показателей используется диаграмма Парето. Для формирования интегральных критериев разработана методика шкалирования данных на основе функции Харрингтона.

**Ключевые слова:** дети, ожирение, промежутки года, лечение, интегральный показатель здоровья, шкалирование, диаграмма Парето, функция Харрингтона.

В настоящее время отмечается повышенный интерес к использованию интегральных показателей для оценки состояния организма человека, в том числе, интегральных показателей здоровья в исследованиях по изучению ритмической организации процессов в организме [1, 2, 3], исследованиях по изучению влияние сезонных изменений внешней среды на функциональное состояние организма [4,5], оценки уровня физической работоспособности, состояния адаптационных возможностей и резистентности организма, эффективности лечебных, оздоровительных [6, 7] и тренировочных [7, 8] мероприятий. Авторами была предложена и апробирована методика применения индивидуального интегрального показателя для оценки уровня здоровья детей с ожирением на этапе медицинской реабилитации.

В соответствии с поставленной целью, была разработана стратегия исследования, которая включала изучение среднемесячных показателей липидного и гормонального статуса у здоровых детей и детей с ожирением в течение года и дана оценка эффективности стандартного комплекса восстановительного лечения.

В соответствии с поставленной целью и задачами было проведено клиническое исследование 298 детей. Из них 200 пациентов (100 мальчиков и 100 девочек) страдали ожирением I-III степени в возрасте от 10 до 15 лет ( $12,9 \pm 1,5$  лет), и 98 детей аналогичного возраста ( $12,8 \pm 0,1$  лет) были практически здоровы (40 мальчиков и 58 девочек) и составили контрольную группу. Ежемесячно обследованы по 7-19 человек. Критериями включения были возраст детей от 10 до 15 лет, согласие ребенка, подписание родителями добровольного информированного согласия, масса тела  $\geq 95$  перцентили. Состояние детей оценивалось при поступлении ребенка на лечение и по окончании курса реабилитации. Показателями, измеряемыми у детей, являлись клинические и лабораторные данные: показатели иммунной системы, результаты биохимического и гормонального анализа крови.

В контрольную группу включали детей среднего физического развития, с показателями АД не превышающими 90 перцентиль для данного пола и возраста, без хронической патологии, у которых не было зарегистрировано острых заболеваний в течение 3 месяцев до исследования.

Всем пациентам с ожирением (200 человек) назначали стандартный комплекс лечения. Комплекс состоял из гипокалорийной диеты, занятий степ-аэробикой ежедневно, душа Шарко через день (10 процедур), электросна через день (10 процедур), занятий с психологом.

Диагноз ожирения устанавливался согласно принятой классификации [3].

Оценка непосредственных результатов лечения проводилась по специальной адаптированной интегрально-модульной системе оценки здоровья, основой которой является унифицированная система стандартизации значений количественных и качественных показателей по шкале Харрингтона [4,5,6] и интегрально-модульная оценка состояния здоровья с определением интегрального показателя здоровья (ИПЗ) [6]. При оценке эффективности проводимого лечения использовались показатели, влияющие на качество жизни пациентов, и показатели, отражающие развитие метаболических нарушений: жалобы (уровень аппетита, утомляемость, одышка при физической нагрузке, головные боли, дискомфорт, связанный с избытком массы); объективные показатели (ИМТ, ОТ, АД, показатели функционального состояния сердечно-сосудистой системы (по данным ВЭМ); показатели гормонально-метаболического статуса (гликемия натощак, уровень ОХС, ХС-ЛПВП, ТГ, инсулин); показатели психоэмоционального состояния (уровень общего стресса, ситуативной тревожности, психоэмоционального напряжения).

Для каждого показателя были заданы верхняя и нижняя границы нормы.

Формально исходная информация о лабораторных показателях может быть представлена в виде матрицы  $X_{mn}$ :

$$X_{mn} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{p2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix},$$

где  $n$  – число показателей;  $m$  – число детей.

Кроме того, имеем векторы, характеризующие диапазон нормы для каждого показателя, где вектора  $(x_{1н}, \dots, x_{nн})$  и  $(x_{1в}, \dots, x_{нв})$  – нижняя и верхняя границы нормальных значений показателей для здоровых детей.

Такая форма представления дает возможность использовать системные методы моделирования при решении задач, связанных как с выбором информативных показателей, так и с разработкой на их основе интегральных индексов здоровья.

Для формирования обобщенных показателей оценки состояния исследуемого объекта и его изменений применим аппарат описания нелинейных динамических систем. При этом необходимо учесть особенности функционирования биологических объектов, заключающиеся в том, что для них характерны устойчивые равновесные состояния, которые поддерживаются внешними и внутренними энергетическими ресурсами и вблизи которых совершаются циклические обменные процессы. Сами равновесные состояния в зависимости от внешних условий изменяться во времени или сохранять постоянные значения на определенном отрезке времени. Поэтому имеет смысл рассматривать свойства таких систем и их характеристики в небольшой области, определяемой допустимыми значениями отклонений от равновесного состояния.

Введем понятия динамических систем, их переменных состояния и определим эффекты движения таких систем. Для этого воспользуемся общепринятой формой математического описания систем и обозначим  $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$  – переменные состояния;  $U(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)\}$  – их измерения;  $W(t) = \{w_1(t), w_2(t), \dots, w_l(t)\}$  – внешние и внутренние энергетические ресурсы. В простейшем случае  $U(t) = C \cdot X(t)$ , где  $C$  – единичная матрица. В общем случае система нелинейная, характеризуется равновесными значениями пе-

ременных  $X_0(t)$ ,  $W_0(t)$ , которые могут изменяться со временем, и их колебаниями в некоторых допустимых пределах. Для введения эффекта движения систем (а именно это представляет интерес) воспользуемся фазовым представлением координат состояния и введем вектор  $\vec{y}_i(t) = \{x_i(t), \dot{x}_i(t)\}$ .

Динамической системой называется система, описываемая дифференциальным уравнением в виде:

$$\dot{Y}(t) = F_Y(\vec{Y}(t), \vec{W}(t)), \quad (1)$$

где  $F_Y$  – векторное силовое поле.

С использованием переменных состояния уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\dot{X}(t) = F_X(X(t), \dot{X}(t), \vec{W}(t)). \quad (2)$$

Здесь  $F_X$  – векторная силовая функция, определяющая движение системы в некоторой области.

По структуре уравнение (2) описывает поведение векторного осциллятора, устойчивые колебания которого вблизи равновесного состояния поддерживаются компенсацией потерь за счет внешних и внутренних ресурсов. Как уже говорилось выше, в фазовом пространстве такие траектории ограничены некоторой гиперповерхностью, удовлетворяющей условию

$$(X(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X(t) - X_0) + (\dot{X}(t) - \dot{X}_0)^T \cdot Q \cdot (\dot{X}(t) - \dot{X}_0) = V = \text{const}. \quad (3)$$

Здесь  $P$  и  $Q$  – положительно определенные симметричные матрицы.

В одномерном случае гиперповерхность выражается в плоскость, ограниченную эллипсом.

Второе слагаемое выражения (3) определяет эффекты движения системы и может служить обобщенной оценкой функционирования систем на отрезке времени  $[t, t_1]$ :

$$\gamma = \frac{(\dot{X}(t) - \dot{X}_0)^T \cdot Q \cdot (\dot{X}(t) - \dot{X}_0)}{V} = 1 - \frac{(X(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X(t) - X_0)}{V}.$$

В точках  $X(t) = X_0(t)$  скорость равна нулю  $\dot{X}_0(t) = 0$  и  $V_0 = (X_0(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X_0(t) - X_0)$ , тогда

$$\gamma = 1 - \frac{(X(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X(t) - X_0)}{(X_0(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X_0(t) - X_0)}.$$

Введем показатель:

$$\kappa = \sqrt{\gamma - 1} = \sqrt{\frac{(X(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X(t) - X_0)}{(X_0(t) - X_0)^T \cdot P \cdot (X_0(t) - X_0)}}$$

Здесь изменения  $\kappa$  находятся в пределах  $0 \leq \kappa \leq 1$ , причем  $\kappa=1$  соответствует здоровью, а  $\kappa=0$  указывает на болезнь.

Перед применением разработанного критерия на практике требуется решить следующие задачи:

- 1) выбрать информативные показатели из общего числа регистрируемых, определить равновесные значения и допустимые отклонения;
- 2) выбрать метод шкалирования исходных данных с целью приведения их к единой безразмерной системе измерений для последующего объединения в интегральный показатель здоровья;
- 3) разработать метод оценки эффективности лечения на основе интегрального показателя здоровья.

Для выделения информативных показателей была использована диаграмма Парето, являющаяся с одной стороны достаточно простой для понимания врачами и не требующей сложных программных решений, с другой стороны обеспечивающей необходимую скорость и точность вычислений.

Диаграмма Парето представляет собой столбиковую диаграмму, в которой каждый столбец отражает относительный вклад каждого элемента в изучаемую проблему, причем все они расположены в убывающем порядке по степени кумулятивного вклада слева направо.

Согласно правилу построения диаграммы Парето, по исходным данным определяется число отклонений каждого показателя от нормы:

$$a_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{ji} \in (x_{in}, x_{iv}); \\ 1, & \text{если } x_{ji} \notin (x_{in}, x_{iv}); \end{cases}$$

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_{ji},$$

где  $b_i$  – число отклонений  $i$ -го показателя;  $x_{ji}$  – значение  $i$ -го показателя  $j$ -го пациента;  $(x_{in}, x_{iv})$  – нижняя и верхняя граница нормы  $i$ -го показателя;  $i=1, \dots, n$ ;  $n$  – количество показателей.

Полученные отклонения располагаются в порядке убывания, и строится столбиковая диаграмма, как показано на рис. 1.

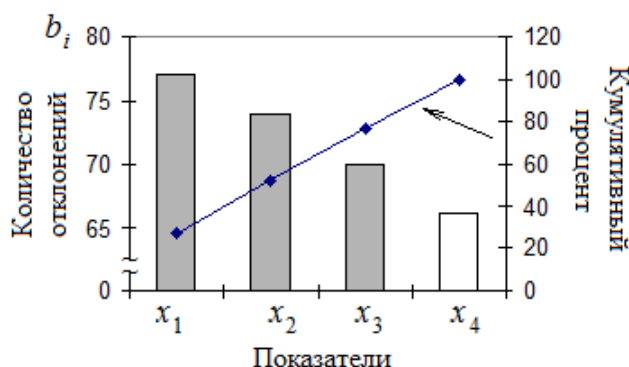


Рисунок 1. Пример построения диаграммы Парето

Затем вычисляется процент отклонений каждого показателя от общего числа отклонений и на график наносится линия кумулятивного процента.

Определение информативных показателей производится на основании их кумулятивного процентного вклада в изучаемый процесс. В нашем случае за наиболее информативные принимались показатели, дающие вклад около 80 %.

При расчете интегрального показателя здоровья (ИПЗ) возникает необходимость объединения переменных разного масштаба. Чтобы сделать корректным сопоставление значений различных лабораторных признаков, как правило, применяется процедура шкалирования. Основными вопросами шкалирования входной информации являются, во-первых, выбор приемлемой шкалы, во-вторых, выбор функции принадлежности.

В ряде работ [5–10] предлагается использовать шкалу соответствий между отношениями предпочтений в эмпирической и числовой системах в виде стандартных отметок (шкалы предпочтений, табл. 1).

Для этого применяют так называемые функции принадлежности [5–7], на основе которых формируются индексы здоровья и определяются зоны предпочтительного (желательного) состояния, обозначаемые буквой «d» – от англ. *desirable* – желательный. Эти функции пред-

ставляют собой способ перевода натуральных значений в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами.

Таблица 1

Эмпирические и числовые соответствия шкалы предпочтений, усл. ед.

Эмпирическая система	Числовая система
Очень хорошо	1,00...0,80
Хорошо	0,80...0,63
Удовлетворительно	0,63...0,37
Плохо	0,37...0,20
Очень плохо	0,20...0,00

Конкретные способы реализации функции принадлежности могут быть весьма разнообразны: экспертные функции, простые аналитические функции, функция Харрингтона и др.

В данной работе использовалась функция принадлежности Харрингтона [5] (рис.2), которую в общем виде можно записать

$$\ln d(z_i) = -e^{-z_i}, \quad (5)$$

$$z_i = \frac{x_i - x_{in}}{x_{ib} - x_{in}},$$

где  $d$  – функция принадлежности;  $z_i$ –кодированное значение  $i$ -го показателя, представляющее собой безразмерную величину;  $x_i$ –значение  $i$ -го показателя в исходной шкале;  $x_{in}, x_{ib}$ –нижняя и верхняя границы нормы соответственно для  $i$ -го показателя в исходной шкале.

В таком виде функцию Харрингтона можно использовать для показателей, ограниченных снизу. Если же показатель имеет ограничение сверху, то необходимо использовать «зеркальную» функцию Харрингтона:

$$\ln d(z) = -e^z. \quad (6)$$

Если показатель имеет двусторонние ограничения, то следует взять должное значение показателя или вычислить среднее значение на интервале ограничений, если должное значение не задано, а затем воспользоваться формулой (5) для левой части интервала ограничений, и, соответственно, формулой (6) для правой части.

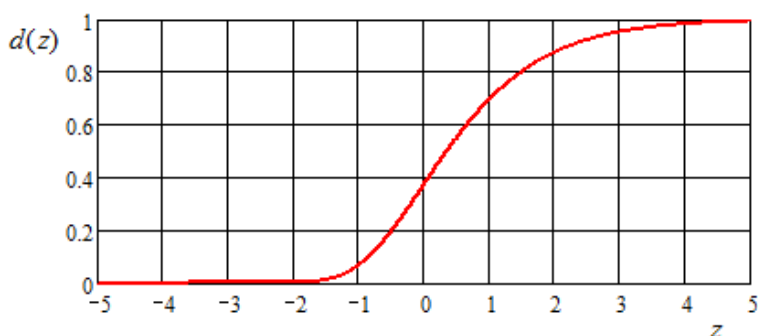


Рисунок 2. График функции Харрингтона для показателей, ограниченных снизу

После шкалирования и приведения исходных показателей к интервалу [0–1], формула (5) примет вид:

$$E = \sqrt{\frac{(d_1 - 1)^2 + (d_2 - 1)^2 + \dots + (d_n - 1)^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - 1)^2} \quad (7)$$



где  $d_i$  – значения исходных показателей  $x_i$ , приведенные к интервалу [0–1];  $n$  – число показателей.

При вычислении евклидова расстояния определяется насколько далеко отстоит исследуемый пациент от здорового человека, у которого ранжированные значения всех показателей равны единице.

Для медицинских работников интегральный показатель удобно представить в процентах. Для этого необходимо отнять значение  $E$ , вычисленное по формуле (7), для конкретного пациента от единицы, чтобы получить результат в виде текущего значения уровня здоровья для пациента, а не как отклонение от нормального значения:

$$\text{ИПЗ} = (1 - E) \cdot 100 \% . \quad (9)$$

Для принятия решения о состоянии здоровья пациента интервал значений ИПЗ от 0 до 100 % можно разделить на так называемые уровни здоровья в соответствии со шкалой Харрингтона (табл. 2).

**Таблица 2**

**Шкала соответствия интегрального показателя уровню здоровья**

<b>ИПЗ, %</b>	<b>Уровень здоровья</b>
100...80	Нормальный
80...63	Незначительное снижение
63...37	Умеренное снижение
37...20	Значительное снижение
20...0	Выраженное снижение

Для экспериментальной проверки разработанного показателя сотрудниками Томского НИИ Курортологии и физиотерапии была набрана группа детей и подростков обоего пола в возрасте от 7 до 15 лет с заболеваниями щитовидной железы и ожирением в качестве сочетанной патологии. Состояние каждого ребенка оценивалось при поступлении на лечение и по окончании курса реабилитации на основании набора лабораторных данных. Для исследований дети были поделены на три группы: по характеру ожирения на гипоталамическое (ГО) и конституционально-экзогенное (КЭО), а также по наличию тиреопатологии – эндемический зоб (ЗОБ).

Прежде всего, методом Парето были выделены информативные показатели из общего числа лабораторных данных по группам. В результате набор анализируемых лабораторных показателей был сокращен в 2 раза (с 34-х до 17-ти показателей).

Выделены различия в составе информативных показателей для различных групп пациентов, что позволит врачам лучше понять их особенности и дифференцированно подойти к составлению плана лечебных процедур.

По формуле (9) рассчитан интегральный показатель здоровья (табл. 3) для всего набора показателей, а для информативных и неинформативных показателей. Полученные результаты показали, что исключение неинформативных показателей позволяет избавиться от «шума» и лучше разглядеть картину, характеризующую состояние пациента.

Ранжирование признаков проводилось следующим образом: отсутствие отклонений от нормы – 1 балл; выше или ниже нормы на 25% – 2 балла; выше или ниже нормы на 26–50% – 3 балла; выше или ниже нормы более чем на 50% – 4 балла. ИПЗ представляли в процентах, используя шкалу Харрингтона (100–75% – нормальный уровень здоровья; 75–60% – умеренное снижение; 60–45% – значительное снижение; < 45% – выраженное снижение). Оценка результатов лечения ( $\Delta$  ИПЗ = ИПЗ после лечения – ИПЗ до лечения) осуществлялась по че-

тырёхбалльной системе:  $\Delta$  ИПЗ более 10,1% – 3 балла – значительное улучшение; 5,1-10% – 2 балла – улучшение, 0,1 до 5% – 1 балл – без перемен, 0% и менее – ухудшение.

Таблица 3

**Интегральный показатель здоровья (КЭО)**

Интегральный показатель здоровья	Все показатели		Информативные		Неинформативные	
	До, %	После, %	До, %	После, %	До, %	После, %
Незначительное снижение	45,53	64,23	47,15	66,66	98,38	99,19
Умеренное снижение	27,64	33,33	25,20	31,71	0,81	0,81
Значительное снижение	4,07	2,44	4,07	1,63	0,00	0,00
Выраженное снижение	22,76	0,00	23,58	0,00	0,81	0,00

**Заключение**

Предложенный метод индивидуальной оценки состояния здоровья человека на основе клинико-функциональных показателей не только обеспечивает возможность принимать достаточно объективные решения, но и позволяет использовать их при оценке эффективности санаторно-курортного лечения. Для этого необходимо определить ИПЗ до и после курса лечения. Кроме того, введение интегрального показателя позволяет в дальнейшем прогнозировать эффект назначаемой терапии.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-00543 и №19-37-90005.*

**Библиографический список**

1. Дедов, И.И. Ожирение: этиология, патогенез, клинические аспекты / Под ред. И. И. Дедов, Г. А. Мельниченко – М., 2004. – 456с.
2. Комаров, Ф.И. Мелатонин и биоритмы организма / Ф.И.Комаров, Н.К.Малиновская, С.И.Рапопорт– В кн.: Хронобиология и хрономедицина. – М.: Триада-Х, 2000. – 82–90с.
3. Кравец, Е. Б. Метаболический синдром – взгляд эндокринолога. Учеб. пособие / Е. Б. Кравец, Л. И. Тюкалова, Н. П. Гарганеева, Ю. Г. Самойлова и др. – Томск: Аграф-Пресс, 2008. – 156с.
4. Левицкий, Е.Ф. Обоснование хронооптимизации восстановительного лечения пациентов, проживающих в условиях средних широт / Е. Ф. Левицкий, Л. В. Барабаш, В. Б. Хон // Вопр. Курортологии. – 2009. – №1. – С.6–8.
5. Рыбаков, В.П. Биоритмы на службе здоровья / В.П.Рыбаков – М.: Советский спорт, 2001. – 112с.
6. Савченко, В. М. Унифицированная стандартизация значений показателей исследования в клинической пульмонологии // Украинский пульмонологический журнал. – 2002. – № 3. – С. 22–25.

7. Хильдебрандт, П. Хронобиология и хрономедицина / П. Хильдебрандт; М. Мозер, М. Лехофер. Пер. с нем. – М.: Арнебия. 2006. – 144с.

8. Хисамутдинов, А.Ф. Клинико-физиологическая характеристика особенностей изменения липидного и гормонального обмена в различные сезоны года / А.Ф. Хисамутдинов //: Автореф. канд. дис. – Москва: РУДН. – 2010. – 25 с.

9. Cole T.J. et al. Establishing a standard definition for child overweight and obesity worldwide: international survey / T.J.Cole et al. // BMJ – 2006. – №320(7244) – P. 1240–1243.

10. Берестнева, О. Г. Математические методы в психологии и педагогике: учебное пособие / О. Г. Берестнева, Е. А. Муратова, И. Л. Шелехов, О. С. Жаркова, А. М. Уразаев. – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета, 2012. – 276 с.

N.P. Stepanenko<sup>1</sup>, O.G., Berestneva<sup>2</sup>, A.L.Yumasheva<sup>2</sup>, I.A. Lyzin<sup>2</sup>

**APPLICATION OF INDIVIDUAL INTEGRAL HEALTH INDICATOR  
ON THE EXAMPLE OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF REHABILITATION  
OF CHILDREN WITH OBESITY**

<sup>1</sup>FSBI SibFSCC FMBA of Russia, Tomsk oblast, CATU Seversk, Seversk

<sup>2</sup> Tomsk Polytechnic Universit, Russia, Tomsk

**Purpose:** The aim of the work is to develop an individual integral indicator of the health of children with obesity at the stage of medical rehabilitation.

**Design/methodology/approach:** Evaluation of treatment results was carried out using a special adapted integrated-modular health assessment system, which is based on a unified system of standardization of quantitative and qualitative indicators on the Harrington scale.

**Findings:** A research strategy was developed that included studying the average monthly indicators of lipid and hormonal status in healthy children and children with obesity during the year and evaluating the effectiveness of the standard complex of restorative treatment.

**Research limitations/implications:** The article presents data on the clinical study of 298 patients – children aged 10 to 15 years, overweight and obesity. The evaluation of the immediate results of treatment was carried out according to a specially adapted integral-modular system of health assessment, the basis of which is a unified system of standardization of values of quantitative and qualitative indicators of the Harrington scale and integral-modular assessment of health status with the definition of an integral health index. In assessing the effectiveness of the treatment used indicators that affect the quality of life of patients and indicators that reflect the development of metabolic disorders, objective indicators, indicators of hormonal and metabolic status, indicators of psycho-emotional state.

**Originality/value:** As shown by the results of testing this approach, the proposed method allows to make fairly objective decisions and use them when evaluating the effectiveness of treatment. In addition, the use of an integral indicator will not only evaluate but also predicts the effectiveness of treatment.

**Keywords:** children, obesity, intervals of year, treatment, integral health indicator, scaling, Pareto chart, Harrington function.

А.Б. Ваганов<sup>1</sup>, А.В. Валяев<sup>2</sup>, Е.А. Лукина<sup>2</sup>, Ю.С. Федосенко<sup>2</sup>**АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПОСАДКИ ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО СУДНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ**<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева"<sup>2</sup>ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Рассматриваются модели автоматизированного расчёта гидростатических характеристик корпуса и посадки речного водоизмещающего судна. На численных значениях параметров корпуса теплохода массового проекта типа «Октябрьская революция» приведены примеры результатов численных расчетов гидростатических характеристик корпуса и посадки судна в случае затопления двух отсеков и действии наклоняющего момента. Используемый алгоритм разработан для программной реализации в системе поддержки принятия решений при угрозе наступления скоротечной аварии судна.

**Ключевые слова:** алгоритм расчёта посадки судна, характеристики остойчивости, гидростатические характеристики корпуса судна.

При проектировании речного судна проводится расчетный анализ его плавучести и остойчивости в определенных Правилами Российского Речного Регистра [1] ситуациях. Вместе с тем, вследствие изменения характеристик судна в процессе его эксплуатации возможно возникновение аварий вне пределов непотопляемости, определенных указанными Правилами. Так, в процессе затопления корпуса терпящего бедствие судна происходит непрерывное изменение во времени как характеристик его посадки, так и объемного водоизмещения корпуса, и можно говорить только о мгновенных, определенных в конкретные моменты времени значениях характеристик плавучести и остойчивости. Соответственно, судоводителю в таких ситуациях необходимо непрерывно отслеживать динамику этих характеристик, особенно в условиях комплексного внешнего воздействия.

Возможны две различные вычислительные модели оценки динамики корпуса поврежденного судна [2]. Для первой модели считается, что вода, проникшая в отсеки при повреждении корпуса, является жидким грузом, вес которого равен весу влившейся воды. В этом случае весовое водоизмещение поврежденного судна будет превышать водоизмещение неповрежденного судна на вес влившейся воды и его центр тяжести изменит свое положение. Во второй модели считается, что при повреждении корпуса вес судна остается неизменным, а изменяется только форма его подводного объема и, соответственно, в этом случае вода в поврежденных отсеках исключается из подводного объема судна, весовое водоизмещение и положение центра тяжести судна при этом остаются неизменными.

Обе вычислительные модели основаны на ясных физических предположениях, и их использование приводит к одинаковым результатам расчета характеристик состояния судна, которые могут быть непосредственно измерены или по ним рассчитаны значения: осадки, углов крена и дифферента, коэффициента остойчивости и восстанавливающего момента. Вместе с тем, при расчете таких относительных величин, характеризующих остойчивость судна, как метацентрическая высота, плечо статической остойчивости, использование этих вычислительных моделей приводит к неодинаковым результатам, поскольку значения указанных па-

раметров определяются делением абсолютных величин на водоизмещение, по разному учитываемому в этих моделях.

Задачу расчета характеристик плавучести и остойчивости для аварийной ситуации, связанной с затоплением корпуса, можно рассмотреть в рамках модели приема на судно большой массы груза (более 10% от водоизмещения судна [3]), склонного к смещению при наклонении корпуса. Усложняющими факторами для такой модели являются внешние кренящий и дифференцирующий моменты, и собственно прием груза на судно протекает во времени, то есть представляет собой динамический процесс.

Внешние воздействия на судно в реальных условиях эксплуатации, как правило, проявляются комплексно. Опрокидывание судна может пройти не только вследствие затопления отсеков, но и по причине аэродинамического воздействия ветра, скопления пассажиров на одном борту, приема больших подвешенных грузов (крановые суда), пожаротушения, приема и смещения больших незакрепленных, сыпучих и других, склонных к смещению грузов (грузовые, технические, рыболовные суда, паромы).

Ниже приводятся выполненные в программных системах ТКОСТ [4-6] и «Диалог-Статик» [7] результаты численных исследований динамики посадки судна в процессе затопления на примере пассажирского судна массового проекта 26-37 типа «Октябрьская революция», параметры корпуса которого определены следующими значениями: длина по конструктивную ватерлинию – 90 м, ширина по конструктивную ватерлинию – 11,65 м, осадка – 2,38 м. Гидростатические характеристики корпуса, рассчитанные в программе «Диалог-Статик», приведены в табл. 1, где  $T$  – текущая осадка,  $V$  – объемное водоизмещение,  $X_c$  – абсцисса центра величины,  $Z_c$  – аппликата центра величины,  $S$  – площадь ватерлинии,  $X_f$  – абсцисса центра тяжести площади ватерлинии,  $Z_m$  – аппликата поперечного метацентра,  $Z_M$  – продольный метацентрический радиус.

Таблица 1

Гидростатические характеристики корпуса по программе «ДИАЛОГ-СТАТИК»

$T$ , м	$V$ , м <sup>3</sup>	$X_c$ , м	$Z_c$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>	$X_f$ , м	$Z_m$ , м	$Z_M$ , м
1,50	781,7	3,32	0,876	709,2	1,25	8,827	334,76
2,00	1156,06	2,39	1,16	780,6	-0,21	7,403	287,18
2,38	1461,3	1,74	1,376	829,3	-1,23	6,713	267,46
2,50	1562,50	1,538	1,445	842,9	-1,483	6,539	261,50
3,00	1995,80	0,822	1,729	887,1	-1,889	6,034	233,26

Гидростатические характеристики корпуса, рассчитанные по программе ТКОСТ, приведены в табл. 2.

Таблица 2

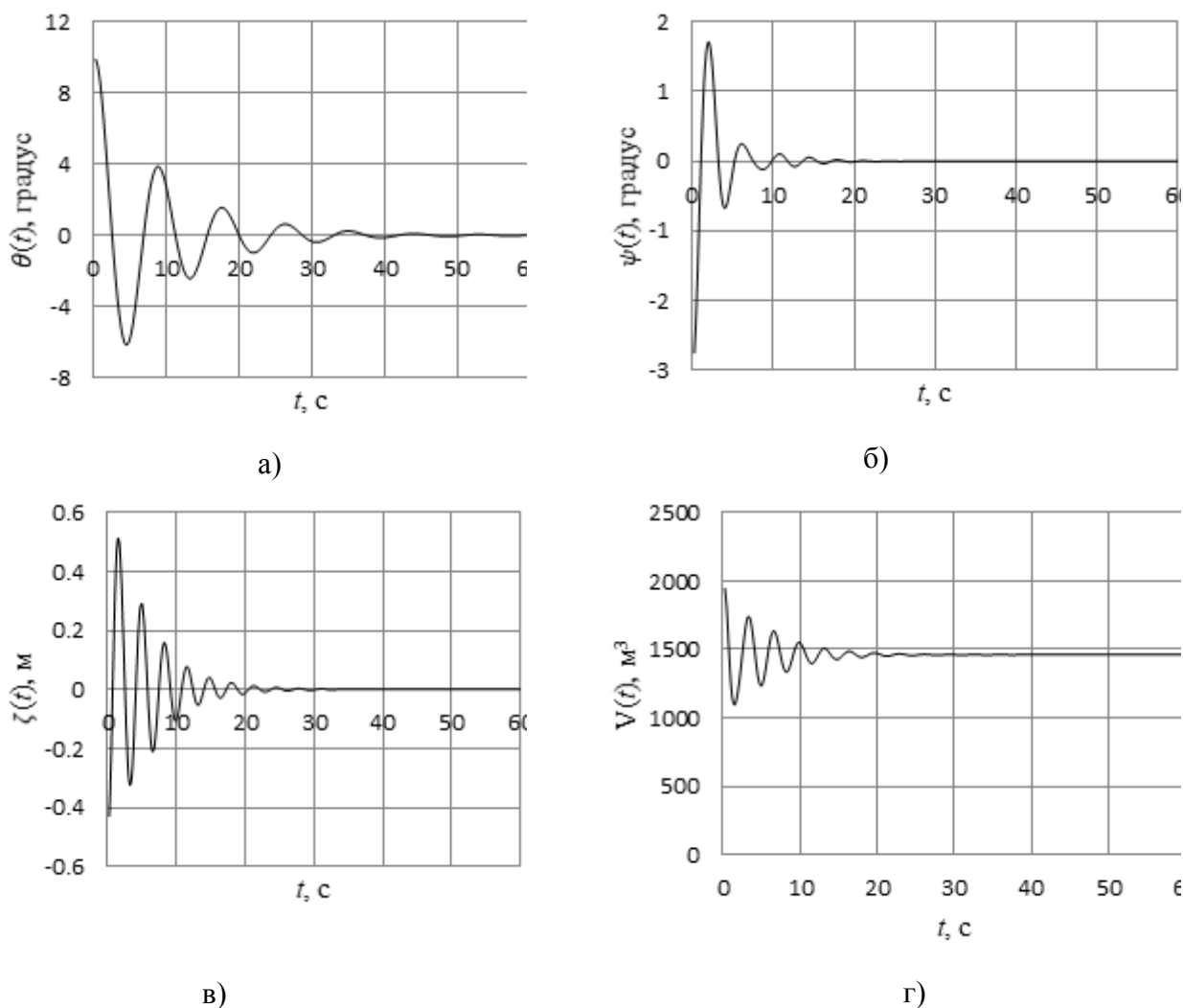
Гидростатические характеристики корпуса по блоку ТКОСТ

$T$ , м	$V$ , м <sup>3</sup>	$X_c$ , м	$Z_c$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>	$X_f$ , м	$Z_m$ , м	$Z_M$ , м
1,50	781,63	3,325	0,876	709,443	1,244	8,812	335,28
2,00	1155,232	2,396	1,16	780,6	-0,213	7,391	286,97
2,38	1461,275	1,741	1,376	829,426	-1,236	6,704	267,15
2,50	1561,622	1,542	1,444	842,826	-1,476	6,533	261,07
3,00	1995,011	0,822	1,729	887,512	-1,907	6,033	233,20

Сравнение полученных результатов демонстрирует их приемлемую для практического применения близость.

Также с целью выявления особенностей в характеристиках движения корпуса при сложных видах воздействия внешних сил были рассмотрены свободные колебания на тихой воде. Вычислительный эксперимент проводился при начальных значениях: вертикального перемещения  $\zeta_o = -0.5$  м, углов крена  $\theta_o = 10^\circ$  и дифферента  $\psi_o = 3^\circ$  соответственно.

На рис. 1а, б, в приведены графики изменения этих параметров во времени, а также изменение водоизмещения судна  $V(t)$  на рис. 1г, рассчитанные в зоне линейной части диаграммы статической остойчивости.



**Рисунок 1. Свободные колебания корпуса:**

а) крен, б) дифферент, в) вертикальные перемещения, г) водоизмещение

Значение координат центра величины – абсциссы  $\xi_o(t)$  и ординаты  $\eta_o(t)$  представлены на рис. 2. После снятия нагрузки судно перешло к движению без крена, дифферента, а водоизмещение составило 1461,3 кН·м, как и расчетное значение для положения судна при осадке  $T = 2,38$ м (табл. 2). Результаты вычислительных исследований при моделировании приложения момента скопления пассажиров у одного борта на тихой воде: момент кренящий  $M_{кр} = 2000$  кН·м, момент дифферентующий  $M_{диф} = -18000$  кН·м.

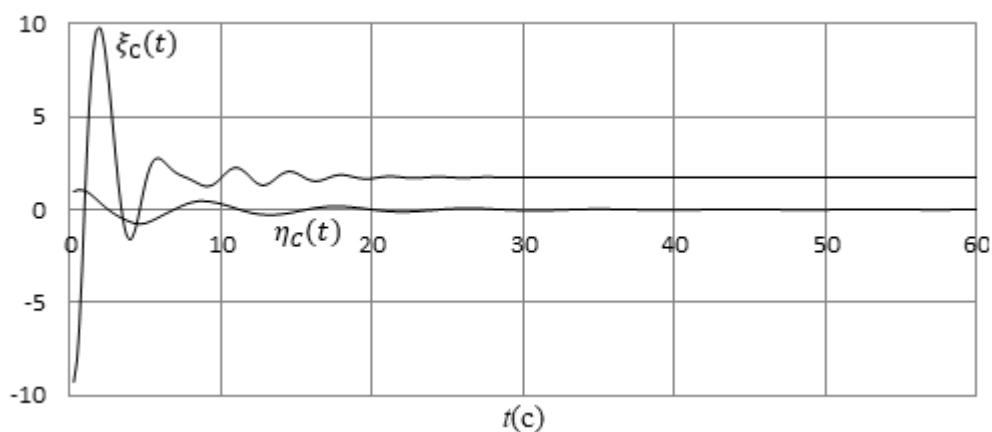


Рисунок 2. Координаты центра величины

Как видно из рис. 3, в течение 90 секунд судно перешло к плаванию в положении равновесия с креном  $\theta(t)=3,7^\circ$  на правый борт и дифферентом  $\psi(t)=0,2^\circ$  на корму. Затем к этой нагрузке добавляется затопление двух кормовых отсеков со скоростью поступления воды  $0,85 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Влившаяся вода для каждого момента времени учтена как прием на судно большого груза, склонного к перемещению при наклонении корпуса. Изменение водоизмещения судна при этом показано на рис. 4.

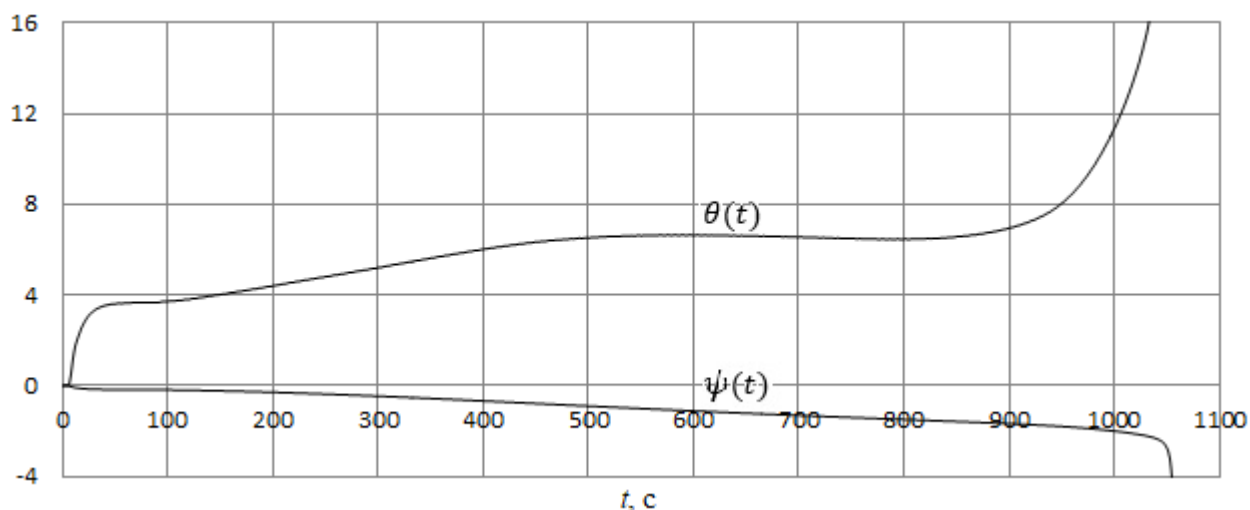


Рисунок 3. Изменение параметров посадки судна

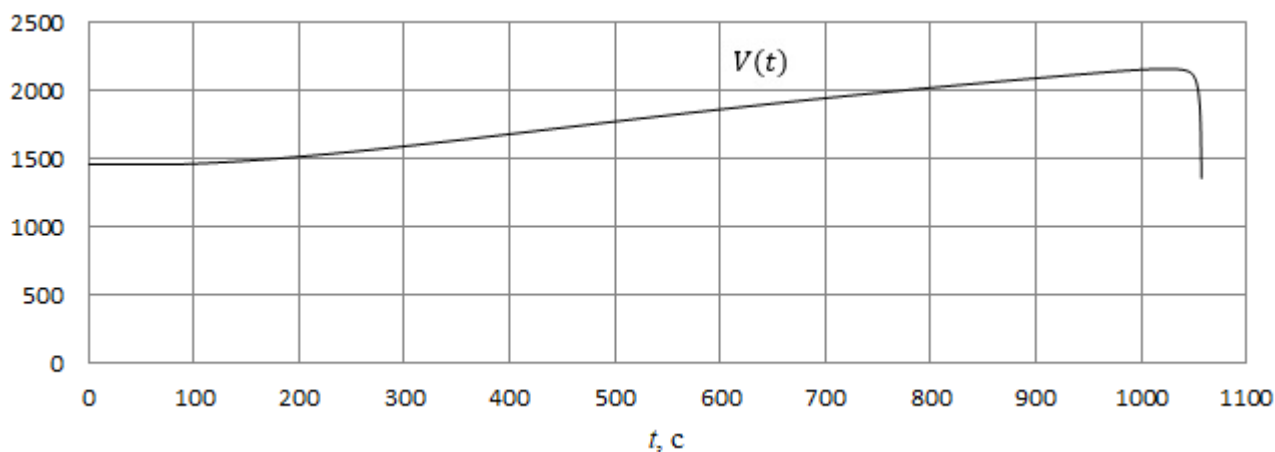


Рисунок 4. Объемное водоизмещение судна при поступлении воды в отсеки

По мере увеличения объема влившейся воды, увеличивался крен, дифферент, вертикальные перемещения центра тяжести судна (рис. 4). При этом контролируется центр тяжести груза (рис. 5) и центр величины судна (рис. 6).

Как видно из приведенных графиков, длительность затопления корпуса судна при рассмотренном варианте воздействия внешних сил составляет более 15 минут. Далее происходит скоротечное наклонение и опрокидывание судна.

Согласно [8], длительность проведения спасательной операции для водоизмещающего трехпалубного судна с вышерассмотренными параметрами корпуса составляет 3 минуты 50 секунд, и, соответственно, аварию отнести к виду «продолжительная». То есть при заданных форс-мажорных обстоятельствах, времени до опрокидывания достаточно для принятия решения капитаном о мерах по спасению пассажиров и членов экипажа. Данный результат подтверждает необходимость мониторинга посадки и остойчивости до наступления момента неизбежной гибели судна.

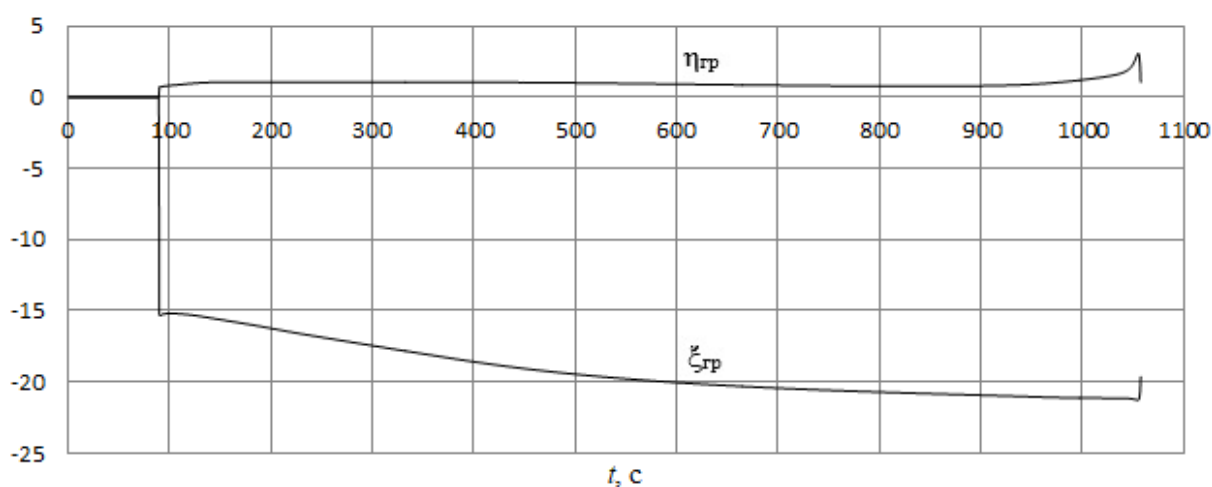


Рисунок 5. Координаты центра тяжести груза

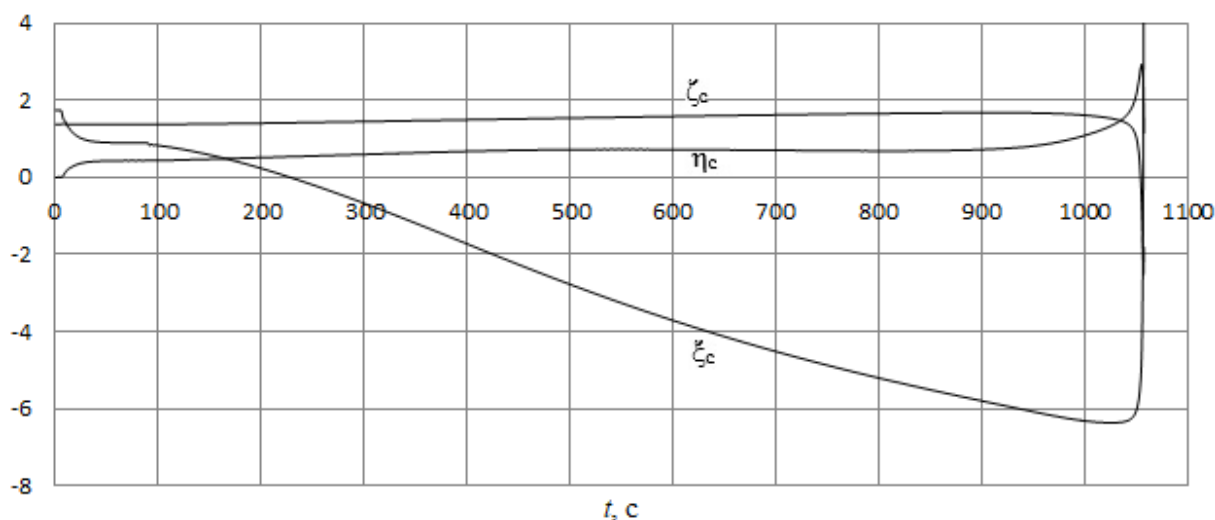


Рисунок 6. Координаты центра величины судна

Работа выполнена при поддержке гранта «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 13574 ГУ/2018).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.



### Библиографический список

1. Российский Речной Регистр [Электронный ресурс] / Правила РРР // Режим доступа <https://www.rivreg.ru/assets/uploads/rules2019.pdf> (дата обращения: 02.02.2020).
2. **Мальцев, Н.Я.** Теория непотопляемости судна // Л. : «Судостроение». 1983. – 320 с.
3. **Милова, И.И.** Теория корабля. Часть I. Статика судов внутреннего и смешанного плавания: учебное пособие для студентов специальности 180101 «Кораблестроение» / И.И. Милова. - Нижний Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ». 2008
4. **Ваганов, А.Б.,** Краснокутский И.Д. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ, №2014612348 «Расчет качки судов и плавучих сооружений на морском волнении».
5. **Ваганов, А.Б.** Численное моделирование характерных режимов эксплуатации водоизмещающего судна / А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве. НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2016. С. 35-41.
6. **Ваганов, А.Б.** Краснокутский И.Д. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ, №2014612390 «Расчет гидростатических характеристик и диаграмм устойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке».
7. ООО "Конструкторское бюро "ПАССАТ". Сертификат об одобрении компьютерного приложения № 0222062, выданный Российским Речным Регистром, наименование "Диалог-Статик"
8. **Александров, М.Н.** Безопасность человека на море / М.Н. Александров. - Л.: «Судостроение». 1983. – 209 с.

**A.B. Vaganov<sup>1</sup>, A.V. Valyaev<sup>2</sup>, E.A. Lukina<sup>2</sup>,  
Juy. S. Fedosenko<sup>2</sup>**

#### **ANALYSIS OF COMPUTING ASSESSMENT MODELS FIT CALCULATION SHIP'S FOR A DECISION SUPPORT SYSTEM UNDER COMPLEX EXTERNAL INFLUENCE**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
<sup>2</sup>Volga State University of Water Transport

**Purpose:** The paper presents the features of the automated calculation of the hydrostatic characteristics of the hull and the fit of a displacement vessel.

**Design/methodology/approach:** Examples of a numerical experiment are given: the characteristics of the hull motion in the zone of the linear part of the diagram of static stability are calculated under the influence of external forces; The hydrostatic characteristics of the hull and the fit of the vessel were calculated during the flooding of two compartments and the action of the tilting moment.

**Findings:** The task of calculating the buoyancy and stability characteristics for an emergency associated with flooding of the hull of a ship should be defined as the reception of a large load of a ship prone to movement when the hull is tilted. A study of the dynamics of the vessel allows us to

note that during a prolonged accident, a slow change instability is observed, allowing control of landing and stability to organize the rescue operation of the crew and passengers. The analysis of the dynamics of the vessel confirms the advisability of introducing the time boundaries of the stages of the accident to create a decision support system.

**Research limitations/implications:** The calculation algorithm is necessary to build a subsystem that is part of a scalable software and hardware system developed by the authors to support the decision by the captain of a river cargo/passenger (cruise) vessel about the readiness to use standard technical means to save passengers and crew in case of a threat of a transient ship accident.

**Originality/value:** The work is valuable for the study of accidents outside the classification of the Russian River Register for the section of unsinkability.

**Key words:** fit calculation ship's algorithm, stability characteristics, hydrostatic characteristics of the ship's hull

В.В. Вычужанин, А.В. Вычужанин

**ИНФОРМАЦИОННАЯ КОГНИТИВНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Одесский национальный политехнический университет

Актуальным является формирование методологического применения информационных технологий при диагностике и прогнозировании состояния сложных технических систем с оценкой риска отказов на основе моделирования взаимодействия их компонентов. Использование разработанной информационной когнитивной модели сложной технической системы, метода и модели поддержки принятия решений при поиске причин отказов элементов диагностируемых подсистем сложной технической системы позволяет: контролировать значения риска отказов компонентов системы при поступлении информации об отказах в компонентах; прогнозировать значение риска отказов компонентов систем с целью выбора стратегии ее восстановления; поддерживать принятие решений при поиске причин отказов компонентов системы; обеспечить экономический эффект за счет увеличения сроков эксплуатации систем и снижения затрат на ремонт при сохранении заданного уровня их надежности.

Ключевые слова: сложная техническая система, имитационное моделирование, когнитивная модель, поддержка принятия решения.

**Введение**

Рост степени сложности сложных технических систем (СТС) требует развития известных и разработки новых методов обеспечения надежности СТС. Актуальным остается формирование методологического применения информационных технологий при диагностике и прогнозировании состояния СТС с оценкой риска отказов [1-3] на основе моделирования взаимодействия их компонентов. Широко применяется способ прогнозирования технического состояния систем на основе моделирования с использованием временных рядов параметров, характеризующих СТС [4]. Достоинства и недостатки подобных методов изложены в публикациях [5,6]. При прогнозировании на основе ретроспективных данных используются системы машинного обучения на базе искусственных нейронных сетей [7]. Для мониторинга, диагностики причин отказов СТС, прогнозирования также используются методы глубокого обучения [8-10]. К интеллектуальным методам, применяемым в системах диагностики и прогнозирования состояния СТС можно отнести эволюционное программирование. Для прогнозирования возникновения аварий и отказов СТС могут использоваться модификации Байесовского подхода и Байесовских сетей. В [11] приведена динамическая байесовская сеть доверия, позволяющая прогнозировать значения вероятностей отказов и осуществлять поиск дефектов и неисправностей в системах поддержки принятия решений. В настоящее время широко применяется имитационное моделирование (ИМ). Оно позволяет экспериментировать с аналитически-вероятностной моделью, проигрывая различные ситуации и упрощая процесс принятия решения. Наличие разнообразного программного обеспечения имитации в виде продуктов ИМ, таких как Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World и других способствует широкому применению ИМ. Однако программные средства облегчают процесс испытаний, но не касаются трудоемкой задачи сбора исходной информации, ее интерпрета-

ции, формализации и адекватного соотношения с конкретным объектом. Перспективным методом ИМ для исследования надежности систем при их переходах между разными вариантами состояния является когнитивное имитационное моделирование (КИМ) на основе моделей в виде орграфов, отражающих взаимодействие компонентов СТС [12].

Проведенный анализ методов моделирования показал перспективность дальнейшего развития методов КИМ для оценки риска отказов компонентов СТС.

### **Информационное обеспечение процессов диагностики работоспособности (оценки риска отказов) СТС**

Концепция оценки риска отказов СТС в аварийных сценариях основывается на объединении разнородных элементов СТС в единую модель. Модель должна обеспечить оценку риска отказов элементов СТС с учетом взаимосвязанности и взаимодействия их компонентов с точки зрения значимости и критичности для функционирования всей системы в целом, а также обеспечить выявление структурных угроз, уязвимых мест в СТС.

Когнитивная модель может быть представлена в виде функционального графа

$$\Phi_{\Pi} \langle G, X, F, Q \rangle, \quad (1)$$

где  $G = \langle V, T, E \rangle$ ,  $G$ -знаковый орграф;  $V = \{v_i\}$ ,  $i=1, 2, \dots, k$  - множество вершин когнитивной карты;  $E = \{e_{ij}\}$  - множество дуг, соединяющих вершины  $v_i$  и  $v_j$ ;  $T$  - время;  $X = \{x_i\}$  - множество параметров вершин;  $F = f\{v_i, v_j, e_{ij}\}$  - функция связи между вершинами;  $Q$  - пространство параметров вершин;  $T$ - время.

При проведении исследований модели генерируется поражающий моделирующий импульс (ПМИ) в условно заданной пораженной вершине (ребре) КИМ, движущийся к последующим вершинам (ребрам), последовательно выводя из строя взаимосвязанные элементы систем.

Моделирование реализовано средствами разработанного прикладного программного обеспечения, базирующегося на клиент-серверной архитектуре. Моделирование действия ПМИ на систему производилось на базе дистрибутива операционной системы Debian GNU/Linux 8.0 (stable). В качестве языка программирования использован Python 3.7, среда разработки PyCharm 2018, библиотека создания интерфейса пользователя PyQt. Данные об компонентах СТС размещены в NoSQL СУБД MongoDB. Обмен данными между клиентской и серверной стороной осуществляется использованием Restfull API. Исходные данные моделей представлены в формате JSON. Автоматизация работы системы осуществлялась на базе инструментов GNU make. Анализ полученных результатов проводился средствами Calc Libre Office.

Используемое для исследований разработанное программное обеспечение позволяет пользователю:

- создавать КИМ СТС в виде графа, с поддержкой функций названия модели, задания краткого описания, создания новой вершины и ее изображения на панели, создания связи между вершинами, выбора алгоритма расположения и отображения структуры в графическом контейнере;
- просматривать структуру ранее созданной КИМ в виде графа с отображением общего числа вершин и ребер, поддерживая операцию ее загрузки в рабочее пространство программы;
- импортировать графа в формате \*.json для его визуализации в системе;
- экспортировать КИМ в виде графа в отдельный графический файл формата \*.jpg;

- проводить расчеты значений ущербов от отказов и риска отказов компонентов моделируемой СТС и отображать полученные результаты в табличном виде сводной таблицы;
- построить графики визуализации полученных результатов в ранжированном виде.

Для апробации программного приложения в нем создана КИМ СТС в виде ориентированного графа, на примере автомобильных подсистем двигателя внутреннего сгорания (ДВС), механически связанного с ведущими колесами соответствующими подсистемами. **Схема автомобильного ДВС состоит из подсистем:** ТАВ – тяговая аккумуляторная батарея; DVS – двигатель внутреннего сгорания; ZRD – задатчик режимов движения; BS – блок суммирования напряжений и мощностей; OPE – обратимый преобразователь энергии; PNM – преобразователь частоты вращения и момента; MP – механическая передача; PK – ведущие колеса; MSI – муфта сцепления между валами DVS и OPE; MS2 – муфта сцепления между валами OPE и MP; ROPE – регулятор OPE; RPNM – регулятор PNM; RDVS – регулятор DVS. Исследование имитационной модели оценки риска отказа при эксплуатации подсистем ДВС, показали, что даже относительно небольшое количество рассматриваемых компонентов подсистем порождают большое число возможных сценариев и вариантов развития экстремальной ситуации при поражении какого-либо из компонентов. При дополнении моделей показателями реальной критичности и пространственной компоновки подсистем масштабы моделей возрастают в несколько раз. Увеличение масштаба исследуемых подсистем приводит к дальнейшему увеличению состояний подсистем. Подсистемы ДВС являются динамической структурой, т.к. их компоненты обладают различной степенью износа, изменяют свои характеристики с различной скоростью. Все это обуславливает следующие требования к используемому методу поддержки принятия решений (ППР) [11,13] при поиске причин отказов компонентов диагностируемых подсистем ДВС: гибкость - возможность использования метода на любом уровне оценки риска отказов компонентов подсистем ДВС при различных их конфигурациях; адаптивность - метод должен обладать способностью адаптации при изменениях конфигурации подсистем ДВС.

Для поддержки принятия решений по оценкам риска отказов подсистем ДВС, а также при поиске отказавших компонентов системы используется метод, основанный на динамических байесовских сетях доверия (ДБСД). Построение и исследование ДБСД оценки риска отказов компонентов подсистем ДВС осуществлено с использованием программного продукта GiNie [14]. Структура ДБМД подсистем ДВС приведена на рис.1.

Целевая функция оценки работоспособности компонентов СТС посредством ДБСД имеет вид

$$F(P_b) = \{G, M\}, \quad (2)$$

где  $G$  – ациклический направленный граф сети;  $M$  – множество подсистем ДВС, составляющих ДБСД

Вершинами графа являются подсистемы СТС, которые с учетом иерархии определяются

$$v = \{v_i^j | \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}, \quad (3)$$

где  $v$  – наименование элемента СТС;  $i$  – номер блока в сети,  $n$  – число блоков в сети,  $j$  – номер уровня в сети,  $m$  – число уровней в сети.

С учетом расположения компонента в структуре ДБСД возможны два типа элементов (вершин) графа:

- родители ( $v_i^j = \text{parent}(v_i^{j+1})$ ) множество вершин  $v_i^j$ , вершины  $v_i^{j+1}$ , обеспечивающие связи от родителя  $v_i^j$  к дочернему элементу  $v_i^{j+1}$ ;
- дочерние элементы ( $v_i^{j+1} = \text{children}(v_i^j)$ ) множество вершин  $v_i^{j+1}$ , вершины -  $v_i^j$ , обеспечивающие связи между дочерним элементом  $v_i^{j+1}$  и родителем  $v_i^j$ .

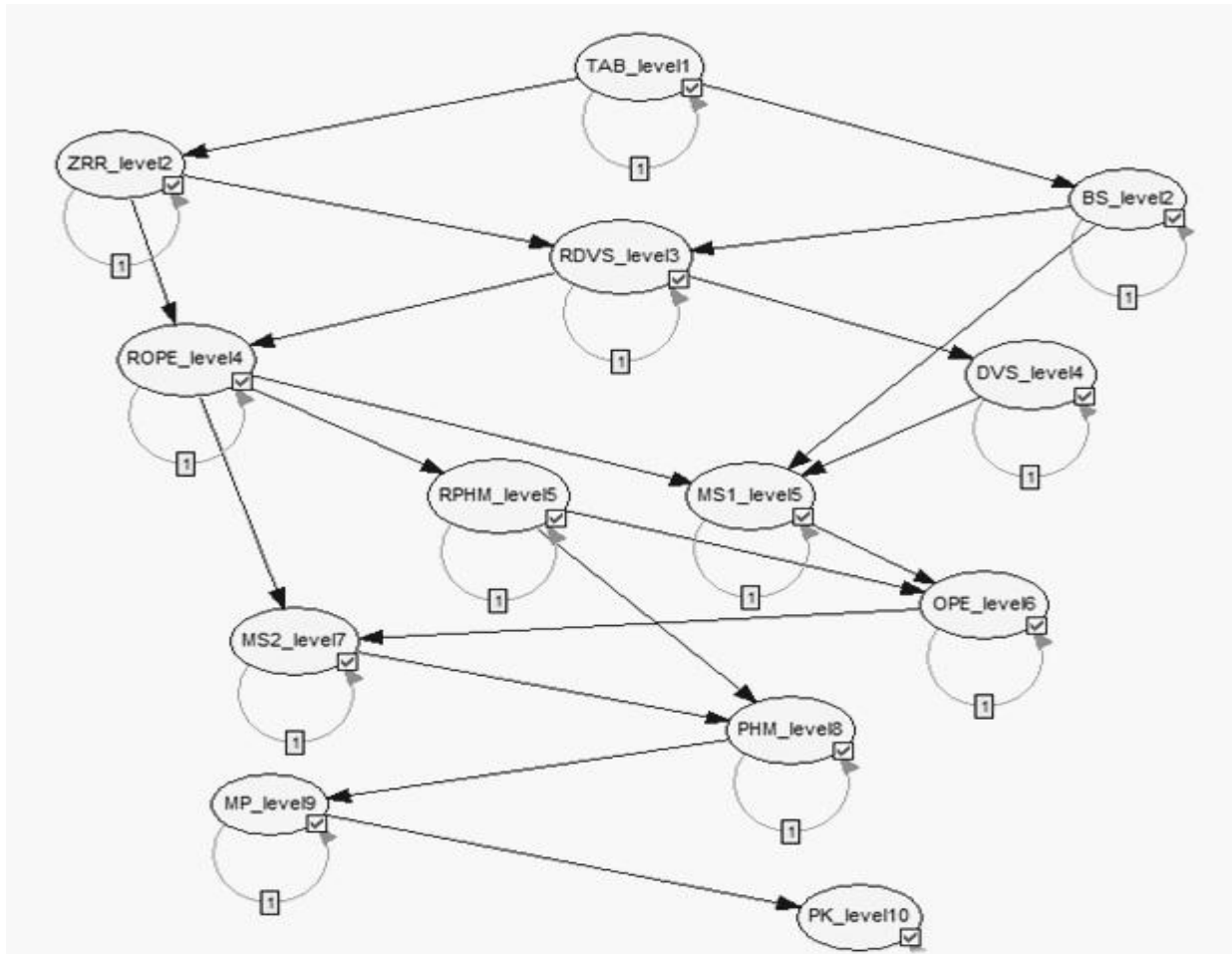
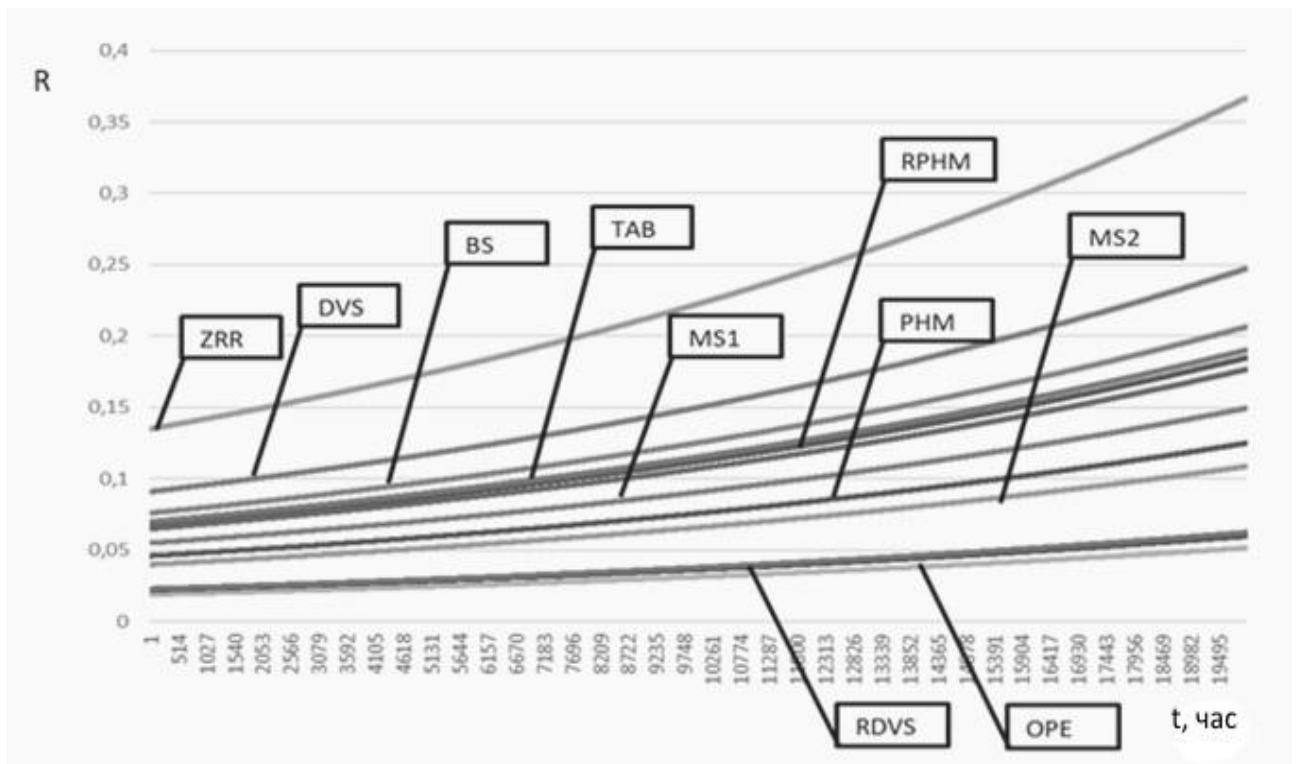


Рисунок 1. Структура ДБМД подсистем ДВС

Вероятности потери работоспособности при прогнозировании надежности (работоспособности) подсистем ДВС изменяются в соответствии с экспоненциальным законом распределения и использованием логистической регрессии, способствующей предсказанию вероятности возникновения некоторого события по значениям множества признаков.

При моделировании ДБСД подсистем ДВС для различных значений вероятности (риска) отказа входного элемента определены значения риска отказов подсистем за 20000 часов эксплуатации подсистем ДВС (рис. 2).

Из результатов проведенных исследований следует, что при росте риска отказа входного элемента от 0.09 до 0.2 растут значения риска отказов всех дочерних, нижестоящих элементов ДБСД подсистем ДВС.



**Рисунок 2. Риск отказа элементов подсистем ДВС при вероятности потери работоспособности элемента на входе системы 0,26**

В таблице представлены значения риска отказов подсистем ДВС за 20000 часов эксплуатации СТС.

**Риск отказов подсистем ДВС**

№	Наименование подсистемы	Риска отказа за 20000 ч.
1	BS	0,20
2	DVS	0,24
3	MP	0,10
4	MS1	0,14
5	MS2	0,1
6	OPE	0,05
7	PHM	0,12
8	PK	0,05
9	RDVS	0,06
10	ROPE	0,18
11	RPHM	0,17
12	TAB	0,19
13	ZRR	0,36

### **Заключение**

Разработанный концептуальный подход основанный на создании методических основ оценки риска отказов СТС в условиях поражающих воздействиях позволяет выявить наиболее уязвимые компоненты СТС функционирование, которых существенно отражается на работоспособности и надежности всей системы.

Использование разработанного метода и модели ППР при поиске причин отказов компонентов диагностируемых подсистем СТС позволяет: контролировать значения риска отказов компонентов системы при поступлении информации об отказах в подсистемах; прогнозировать значение риска отказов компонентов системы с целью выбора стратегии ее восстановления; поддерживать принятие решений при поиске причин отказов компонентов системы; обеспечить экономический эффект за счет увеличения сроков эксплуатации систем и снижения затрат на их ремонт при сохранении заданного уровня их надежности.

### Библиографический список

1. **Вычужанин, В.В.** Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем. Монография/ В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко. – Одесса, Из-во Экология, 2019. – 178 с.
2. **Цветков, В.Я.** Сложные технические системы / В.Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии, 2017. – №3(20). – С. 86-92.
3. **Vychuzhanin, V.V.** Assessment of risks structurally and functionally complex technical systems / V.V. Vychuzhanin, N.D. Rudnichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014. – Vol.1. – №2. – С. 18-22.
4. **Шевцов, Ю.Д.** Прогнозирование параметров технического состояния двигателей энергетических установок / Ю.Д. Шевцов, Л.Н. Дудник, С.А. Арефьева, Е.Д. Фадеев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. – № 132.. – С. 508-517.
5. **Букреев, В.Г.** Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов: монография / В.Г. Букреев, С.И. Колесникова, А.Е. Янковская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 254 с.
6. **Вычужанин, В.В.** Модель оценки живучести судовых технических систем / В.В. Вычужанин // Вестник Миколаївського кораблебудівного університету, 2012. – №3. – С. 62-67.
7. **Shin, S.J.** Developing a big data analytics platform for manufacturing systems: architecture, method, and implementation / S.J. Shin, P. Meilanitasari // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. – P.1-42.
8. **Wang, J.** Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications / J. Wang, Y. Ma, L. Zhang, R.X. Gao, D. Wu // Journal of Manufacturing Systems, 2018.. – Vol. 48. – P. 144-156.
9. **Park, J.K.** Machine learning-based imaging system for surface defect inspection/ J.K.Park, B.K. Kwon, J.H. Park, D.J. Kang // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technologies. 2016. – Vol. 3. – No. 3. – P. 303–310.
10. **Zhao, R.** Deep learning and its applications to machine health monitoring: a survey. / R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, Z. Chen., K. Mao, P. Wang, 2016: [Электронный ресурс] Режим доступа : <https://arxiv.org/pdf/1612.07640.pdf>.
11. **Вычужанин, В.В.** Информатизация прогнозирования риска структурно сложных технических систем с помощью моделей байесовских сетей доверия/ В.В. Вычужанин, Н.О. Шибаева. // Информатика и математические методы в моделировании, 2016. – Том. 6 . – №. 3 . – С. 205-214.



12. **Рудниченко, Н.Д.** Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // Информатика и математические методы в моделировании, 2013. – Т.3, №3. – С. 240-247.
13. **Vychuzhanin, V.** Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems/ V.Vychuzhanin, N.Rudnichenko, V.Boyko, N. Shibaeva, S. Konovarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016 . – V. 84. – № 6/9. – P. 4 - 11.
14. **Дорожко, И. В.** Оценка надежности структурно сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe / И. В. Дорожко, А. Г. Тарасов, А. М. Барановский // Intellectual Technologies on Transport, 2015. – № 3. – С. 36-45.

V.V. Vychuzhanin, A.V. Vychuzhanin

### **INFORMATION COGNITIVE SIMULATION MODEL OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEM**

Odessa National Polytechnic University

Actual is the formation of the methodological use of information technology in the diagnosis and prediction of complex technical systems with an assessment of the risk of failures based on modeling the interaction of their components. Using the developed informational cognitive model of a complex technical system, the decision support method and model for finding the causes of failures of elements of diagnosed subsystems of a complex technical system allows you to: control the risk values of system component failures when information about component failures is received; to predict the value of the risk of failure of system components in order to select a strategy for its recovery support decision making when searching for the causes of failures of system components; provide an economic effect by increasing the life of the systems and reducing repair costs while maintaining a given level of reliability.

**Keywords:** complex technical system, simulation, cognitive model, decision support

Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин, Д.С. Шибает, Н.О. Шибаета

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕШАЮЩЕГО ДЕРЕВА ДЛЯ КОГНИТИВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕТАДАНЫХ О БОЛЬШИХ ОБЪЕМАХ ИНФОРМАЦИИ

Одесский национальный политехнический университет

Задачи обработки и структурирования больших объемов данных приобретают все большую актуальность в связи с повышением требований к качеству и скорости мониторинга и анализа данных о состоянии исследуемых технических систем. В связи с этим необходимо использование и совершенствование существующих методик представления данных в более компактной форме для повышения оперативности выполнения поисковых и вычислительных операций при анализе данных. Возможным решением обозначенных задач является использование когнитивных моделей в виде решающих деревьев, позволяющих отразить структурную схему метаданных в виде логических правил. В статье рассмотрены ключевые аспекты создания подобной модели в инфраструктуре системы интеллектуального анализа данных, приведена структура разработанной модели решающего дерева с оценкой ее качества на базе различных индексов неоднородности.

**Ключевые слова:** большие данные, интеллектуальный анализ данных, метаданные, технические системы, деревья решений

### Введение

В настоящее время активно развиваются направления когнитивного моделирования различных систем и процессов, с целью выявления скрытых закономерностей и взаимодействия между их внутренними элементами и внешней средой [1-3]. Данный подход является особенно актуальным для сфер, которые характеризуются постоянным ростом объемов данных различных показателей функционального состояния различных взаимосвязанных систем [4,5]. В частности, примером подобных систем являются сложные технические системы (СТС) установленные на транспорте, где необходимо выполнение большого числа диагностических операций для своевременного выявления рисков аварийных отказов критичных узлов. Задачи оперативной обработки и анализа больших объемов данных о состоянии отдельных элементов и межэлементных связей СТС являются трудновыполнимыми и трудоемкими с точки зрения временных затрат как в ручном режиме, так и с использованием современных аппаратных средств и ЭВМ [6-8]. Это обусловлено необходимостью одновременного охвата, агрегации и сопоставления больших объемов данных (превышающих десятки и сотни терабайт) для оценки статистических показателей (средневзвешенных, медианных значений входящих и целевых признаков) поиска аномальных значений, выбросов и погрешностей измерения с целью диагностики надежности и работоспособности системы, прогнозирования ее дальнейшей работы [9,10]. Осложняющим данный процесс фактором является проблема обеспечения качества поступающих в хранилище данных, которые не всегда являются четко структурированными, согласованными и непротиворечивыми [11]. Поэтому актуальной задачей является снижение объемов обрабатываемых данных путем обобщения (сжатия) признаков из близких кластеров средствами технологий и методов интеллектуального анализа данных с использованием методик создания моделей метаданных, способных описать состояние исследуемой СТС в более компактной форме [12]. Одной из наиболее

удобных с точки зрения наглядности, иерархичности и удобства обработки формой представления когнитивных моделей СТС являются деревья решений (ДР), имеющие вид связанных графов [13,14]. Дополнительные преимущества ДР для решаемой задачи заключаются в компактной форме хранения, возможности описания в виде логических правил и семантических связей, гибкости визуального представления и наглядности отображения в графическом виде для проверки отдельных сценариев взаимодействия элементов системы управляющими операторами или экспертами-аналитиками [15]. В связи с этим целесообразным является разработка подобных моделей ДР и их имплементация с внедрением в рамках программно-аппаратных комплексов и систем диагностики состояния элементов и межэлементных связей различных СТС, что и является целью данной работы.

### **Описание концепции построения системы модели**

Предлагаемая концепция базируется на модульной структуре [16]. Под управлением системы сбора данных осуществляется получение и преобразование значений технических параметров элементов СТС с соответствующих цифровых и аналоговых сенсоров по проводным и беспроводным каналам связи. Полученные данные агрегируются, структурируются по принадлежности к подсистемам и сохраняются в файлах формата \*.json, после чего отдельными потоками отправляются в облачную инфраструктуру.

Интегрированные в рамках системы данные обрабатываются модулем консолидации по заданным критериям (компактность, информативность, фильтрация) с целью их дальнейшего согласованного и равномерно распределения в рамках отдельных хранилищ данных (ХД) в виде узлов пространства данных (пула). Модуль представления и структурирования больших данных осуществляет запрос на извлечения требуемых данных заданного объема в пул, в ответ на который возвращается набор данных из соответствующих ХД. Концептуальная схема состава предлагаемой системы обработки и когнитивного представления больших данных приведена на рис. 1.

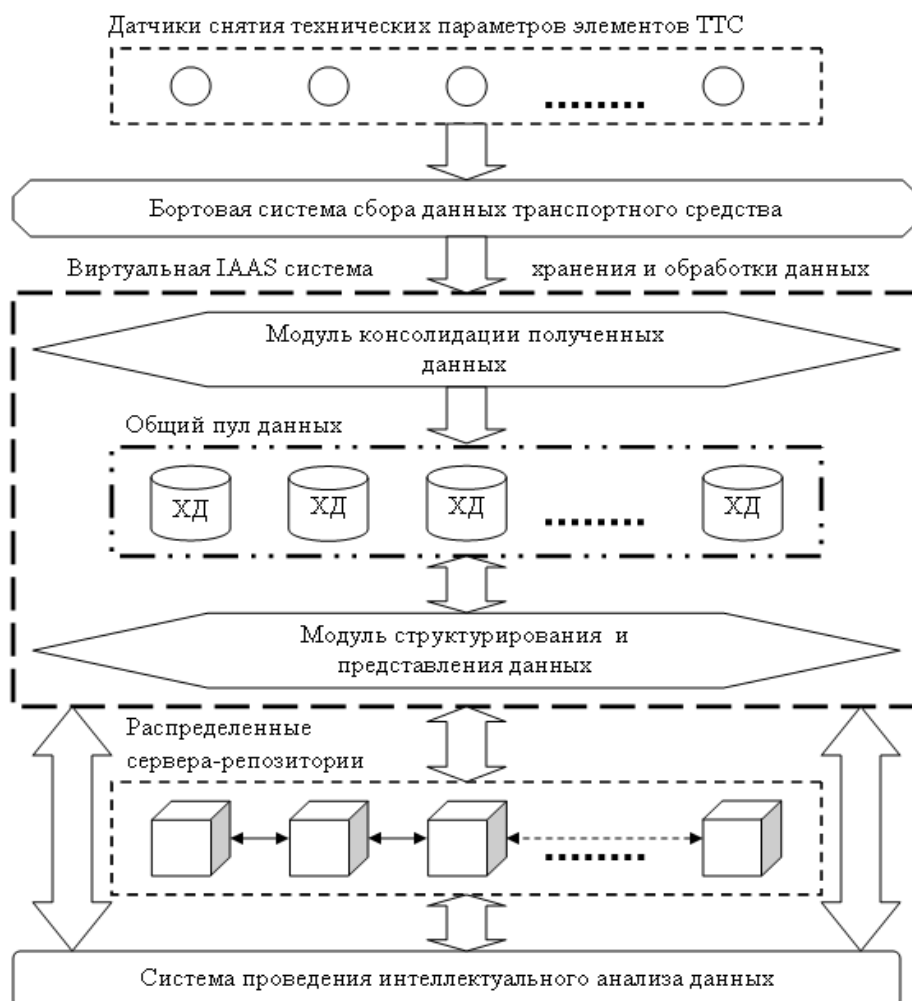
В результате работы данного полученные модели ДР в виде упорядоченной схемы метаданных в форматах json и xml отправляются для дальнейшего хранения в распределенные репозитории, функционирующие под управлением файловой системы HDFS. Дальнейшее проведение анализа по хранимым метаданным становится возможным путем использования аналитического программного обеспечения (Kname, SPSS Statistics, QIWare, Orange) или собственной информационной системы.

В случае необходимости проведения дополнительных операций по обработке или анализу данных из системы должен быть предусмотрен прямой доступ к облачной системе посредством интеграции соответствующего API или поддержки протокола удаленного доступа RDP с сервисом режима терминального доступа. Предлагаемый подход к построению модели ДР основывается на алгоритме CART. Построение ДР нацелено на классификацию входных данных в соответствии с некоторым интегральным показателем.

Модель ДР включает в себя: корневую вершину, которая инцидентна всем выходящим из нее ребрам графа; внутренние вершины, инцидентные единственному входящему ребру графа и нескольким выходящим; концевые вершины, которые инцидентны входящему ребру. Логически, построение модели ДР формируется путем выполнения следующих этапов:

- выбор подмножества обучающей выборки заданного размера, для построения структуры дерева;
- на каждой итерации по формированию нового разделения в дереве проводится численная оценка частотности признаков;

– выбор признака с максимальной частностью проявления и осуществление операции разделения иерархии дерева на новый уровень.



**Рисунок 1. Концептуальная схема состава системы обработки и когнитивного представления больших данных**

Данный процесс повторяется до исчерпания всей обучающей выборки или достижения заданных первоначально граничных условий, в частности, максимально допустимой глубины дерева. Для исследования эффективности построения когнитивных модели ДР предлагается использовать следующие индексы неоднородности:

1. Информационная энтропия (*IG*). Рассчитывается энтропия всех атрибутов модели (*C*) по выборке данных (*X*) и выбирается атрибут с наименьшим значением энтропии для формирования дальнейших ветвей.

$$IG(C) = - \sum_{c \in X} p(X) \log p(X), \quad (1)$$

где  $p(X)$  - доля примеров в заданном классе модели ДР,  $C$  – число атрибутов модели.

2. Коэффициент усиления информации (*GR*). Модифицированный вариант *IG*, расширяющий информационную энтропию для каждого атрибута модели с целью обеспечения широты и однородности при обработке данных и уменьшения смещения в сторону многозначных атрибутов. *GR* определяется через показатель разделения информации (*SP*), кото-

рый представляет потенциальную информацию, сгенерированную путем разделения набора обучающих данных  $X$  на  $v$  разделов, соответствующих результатам атрибута  $C$ .

$$GR(C) = \frac{G(C)}{SP(C)} \quad (2)$$

3. Индекс Джини ( $GI$ ). Мера неравенства между распределениями характеристик набора данных. Разделение по выбранному атрибуту модели приводит к уменьшению среднего индекса Джини в результирующих подмножествах. Если набор данных  $X$  содержит данные  $n$  классов, тогда индекс Gini определяется следующим образом

$$Gini(X) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2, \quad (3)$$

где  $p_i$  — вероятность (относительная частота) класса  $i$  в  $X$ .

Наилучшим считается то разбиение, для которого  $Gini(X)'$  минимально. Если  $N$  — число примеров в узле — предке,  $L, R$  — число примеров соответственно в левом и правом потомке,  $l_i$  и  $r_i$  — число экземпляров  $i$ -го класса в левом/правом потомке. Тогда качество разбиения оценивается по следующей формуле:

$$Gini(X)' = N - \left( \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i^2 + \frac{1}{R} \sum_{i=1}^n r_i^2 \right) \rightarrow \min \quad (4)$$

4. Стандартной точности ( $AC$ ). На каждом шаге выбирается такой атрибут для разделения, который максимизирует общую точность классификации модели.

В качестве примера рассмотрена система двигателя внутреннего сгорания автомобильного средства в общем виде. В качестве функциональных параметров (атрибутов) для построения модели ДР используются следующие показатели: структурный риск выхода из строя элемента системы; функциональный риск выхода из строя элемента системы; режим эксплуатации элемента системы; длительность эксплуатации элемента системы; степень ремонтпригодности элемента системы; степень физического износа элемента системы; регламентная наработка на отказ элемента системы; количество выполненных ремонтов элемента; среднерыночная стоимость элемента; работоспособность. Интегральным показателем оценки элемента (целевой переменной для классификации) системы является его техническое состояние.

### Исследование результатов моделирования

Моделирование ДР проводилось средствами системы Rapid Miner Studio. Наиболее точные результаты классификации были получены на основе использования индекса GR. Структура модели ДР на базе использования индекса GR приведена на рис.2.

Корнем дерева является атрибут структурного риска, в случае значения ниже 0.49 модель классифицирует уровень работоспособности системы как низкую.

В случае, если значение структурного риска превышает 0.49, осуществляется классификация по остальным атрибутам в порядке убывания их приоритетности. В частности, следующим атрибутом модели ДР является регламентная наработка на отказ, превышение которым значения 180000 приводит к разбиению данных по длительность эксплуатации элемента (значение менее или равно 3.5 соответствует классу высокого уровня работоспособности), степени физического износа (значение менее или равно 7.5 соответствует классу высокого уровня работоспособности), среднерыночной стоимости (значение менее или равно 17500 соответствует классу высокого уровня работоспособности). На базе дальнейшего развития дерева по атрибуту функционального риска в класс работоспособности является средним (значение функционального риска меньше или равно 0.435) или низким (в случае, когда режим эксплуатации является внештатным).

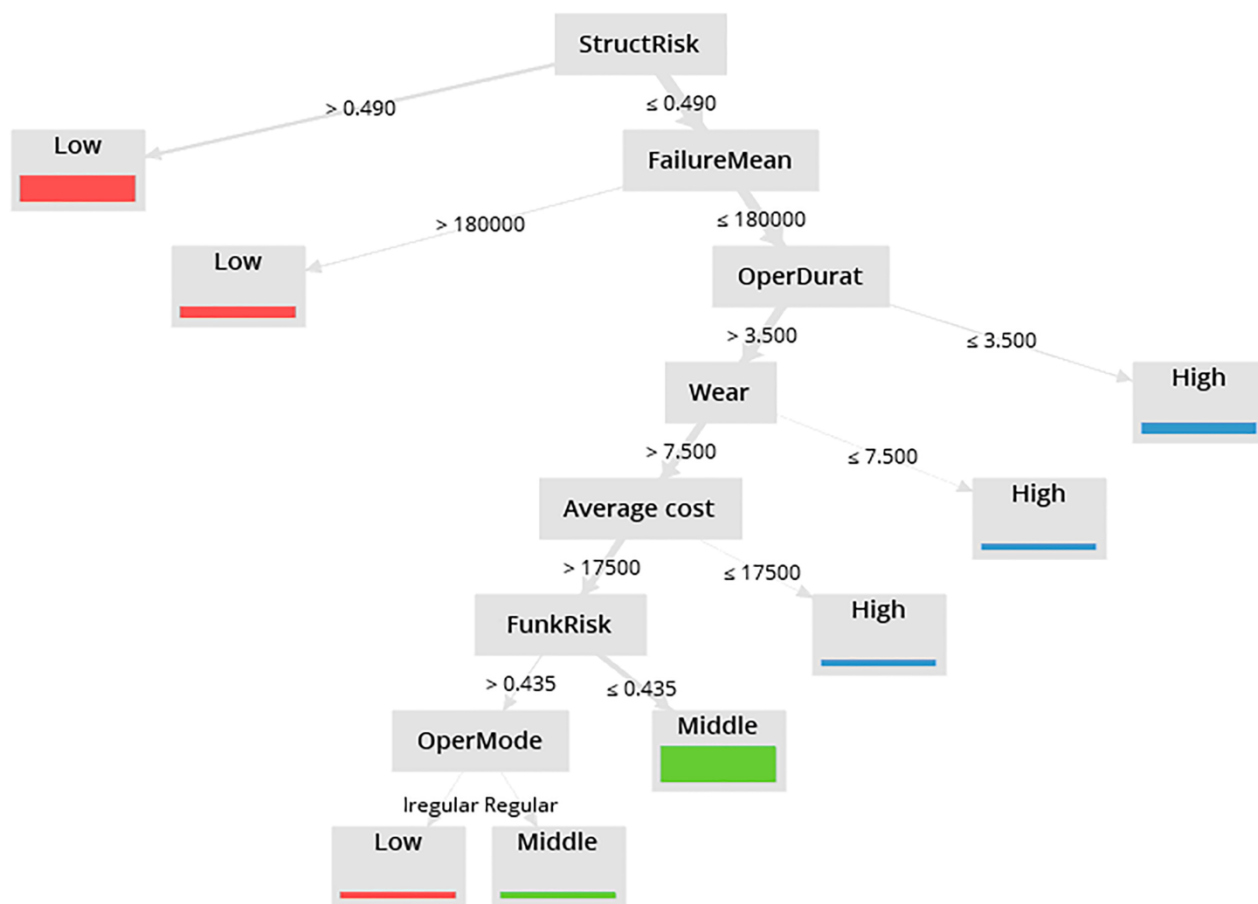


Рисунок 2. Структура модели ДР на базе использования индекса GR

Фрагмент полученных логических правил по выполненной моделью ДР на основе индекса GA классификации данных приведен далее.

```

StructRisk > 0.490: Low {High=0, Middle=0, Low=5}
StructRisk ≤ 0.490
| FailureMean > 180000: Low {High=0, Middle=0, Low=2}
| FailureMean ≤ 180000
| | OperDurat > 3.500
| | | Wear > 7.500
| | | | Average cost > 17500
| | | | | StructRisk > 0.435
| | | | | | OperMode = Iregular: Low {High=0, Middle=0, Low=1}
| | | | | | OperMode = Regular: Middle {High=0, Middle=1, Low=0}
| | | | | StructRisk ≤ 0.435: Middle {High=0, Middle=7, Low=0}
| | | | Average cost ≤ 17500: High {High=1, Middle=0, Low=0}
| | | Wear ≤ 7.500: High {High=1, Middle=0, Low=0}
| | OperDurat ≤ 3.500: High {High=2, Middle=0, Low=0}

```

Полученный массив логических правил используется в качестве фрагмента метаданных и может быть использован в дальнейшем для более глубокого поиска и выявления скрытых ассоциативных правил между ними.

## Заключение

Проведя анализ полученных когнитивных моделей ДР рассмотренной СТС следует отметить, что более высокий уровень корреляции наблюдается между параметрами структурного риска, степенью технического износа и регламентной наработкой на отказ. Значения данных параметров оказывают наиболее высокое влияние на техническое состояние и уровень работоспособности элементов СТС, что обуславливает критичность в их оперативном мониторинге и анализе для функционирования всего транспортного средства в целом. Полученная структура метаданных в дальнейшем необходима для ускорения процесса поиска и анализа данных посредством снижения вычислительных и временных затрат на обработку данных и предотвращения необходимости проведения операций по отправке и преобразованию дополнительных выборок.

## Библиографический список

1. **Вычужанин, В.В.** Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко // *Informatics & Mathematical Methods in Simulation*, 2013. – Т. 3. – №3. – С. 240 – 247.
2. **Zenkin, E.** Cognitive Model of the Internal Combustion / E. Zenkin, V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, D. Shybaiev// *SAE International*, 2018/9/10. – № 2018-01-1738. – P. 1 – 10.
3. **Шмбаев, Д.С.** Оптимизация отбора и анализа информации в разноструктурных хранилищах данных / Д.С. Шмбаев, В.В. Вычужанин, Н.О. Шмбаева, Н.Д. Рудниченко // *Информатика и математические методы в моделировании*. – 2017. – №3. – С.318-324.
4. **Чехарин, Е.Е.** Большие данные: большие проблемы / Е. Е. Чехарин // *Перспективы науки и образования*. – №3 (21). – 2016. – С. 7-11.
5. **Биктимиров, М.Р.** Тенденции развития технологий обработки больших данных и инструментария хранения разноформатных данных и аналитики / М.Р. Биктимиров, А.М. Елизаров, А.Ю. Щербаков // . – № 5. – Т.19. – 2016. – С.390-406.
6. **Вычужанин, В.В.** Распределенный программный комплекс на базе фреймворка APACHE SPARK для обработки потоковых BIG DATAот сложных технических систем/ В.В. Вычужанин // *Informatics & Mathematical Methods in Simulation*, 2018. – Т.8. – №2. – С.146 – 154
7. **Shibaev, D. S.** Analysis of a large volume of data on the state of high-tech equipment/ V.V. Vyuzhuzhanin, N.O. Shibaeva // *Transport development*, 2017. –1(1). – P. 90 – 95.
8. **Рудниченко, Н.Д.** Применение кластерного анализа данных для выделения меры схожести факторов влияния на работоспособность сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин, Д.С. Шмбаев // *Информатика и математические методы в моделировании*. – 2017. – №3. – С. 214-219.
9. **Vychuzhanin, V.V.** Big data mapping in the geopositioning systems for fishing industry / V.V. Vychuzhanin, D.S. Shibaev, V.D. Boyko, N.O. Shibaeva, N.D. Rudnichenko // *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. – 2017. – PP. 28-31.
10. **Shibaev, D.S.** Data control in the diagnostics and forecasting the state of complex technical systems / D.S. Shibaev, V.V. Vyuzhuzhanin, N.D. Rudnichenko, N.O. Shibaeva, T.V. Otradsкая // *Herald of Advanced Information Technology*. – 2019. – Vol. 2. – № 3. – PP. 183-196

11. **Вычужанин, В.В.** Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем. Монография / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко. – Одесса: Экология, 2019. – 178 с.
12. **Рудніченко, М.** Інтелектуальний аналіз Big Data при діагностиці технічного стану транспортних систем / М. Рудніченко, В. Вичужанін, Н. Шибасєва, Д. Шибасєв // Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики: монографія / Vlatnický Miroslav, Dizo Jan, Gerlici Juraj та ін.; за наук. ред. проф. Грицука Ігоря. - Херсон: ХДМА, 2019. – С.57-69.
13. **Мулюкова, К.В.** Сравнительный анализ современных инструментов Data Mining // Молодой ученый. — 2019. — №1. — С. 19-21
14. **Субботин, С.А.** Применение аппарата деревьев решений в задаче диагностирования автомобильных кузовов / С.А. Субботин, Е.А. Гофман // Системний аналіз. Інформатика. Управління : II Всеукраїнська наукова-практична конференція САІУ-2011, 10–11 березня 2011 р. : матеріали конференції. – Запоріжжя, 2011. – С. 211–212
15. **Шамаева, Д.Р.** Деревья решения для задач построения рейтинга коммерческих банков [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2017 г.). — СПб.: Свое издательство, 2017. — С. 18-22.
16. **Рудниченко, Н.** Применение методов машинного обучения для автоматизации процессов классификации массивов текстовых данных большого объема / Н. Рудниченко, В. Вычужанин, Н. Шибасєва, Д. Шибасєв, Т. Отрадская, И. Петров // Информационные управляющие системы и технологии. Проблемы и решения.: монография. – Одесса, 2019. – С.31-46.

**N.D. Rudnichenko, V.V. Vychuzhanin, D.S. Shibaev, N.O. Shibaeva**

## **DECISION TREE MODEL FOR COGNITIVE METADATA REPRESENTATION ON BIG DATA**

Odessa National Polytechnic University

The tasks of processing and structuring large volumes of data are becoming increasingly important in connection with the increasing requirements for the quality and speed of monitoring and analysis of data on the state of the technical systems. In this regard, it is necessary to use and improve existing methods for presenting data in a more compact form to increase the efficiency of search and computational operations in data analysis. A possible solution to these problems is the use of cognitive models in the form of decision trees, which allow reflecting the metadata block diagram in the form of logical rules. The article discusses the key aspects of creating such a model in the data mining system infrastructure, presents the structure of the developed decision tree model with an assessment of its quality based on various indices of heterogeneity.

**Keywords:** big data, data mining, metadata, technical systems, decision trees



В.Л. Николаенко<sup>3</sup>, Г.В. Сечко<sup>1</sup>, Т.Г. Таболич<sup>2</sup>

## ФОРМЫ ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ О НАДЕЖНОСТИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Стрим центр» (Минск)

<sup>2</sup>БелНИИТ «Гранстехника» (Минск)

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск)

Рассматриваются вопросы мониторинга (наблюдений) за работой сложной системы в части сбора данных о ее надежности. К сложным системам относятся компьютерные системы, системы телекоммуникаций, транспортные средства с бортовым компьютером и ряд других. Предлагаются усовершенствованные формы для сбора данных о надежности при мониторинге эксплуатации сложных систем.

**Ключевые слова:** сложная система, компьютерная система, надежность, сбор данных, формы для сбора, совершенствование.

### Введение

В 2019 году в Беларуси была издана небольшая книга [1]. В ней рассматриваются вопросы мониторинга (наблюдений) за работой сложной (в первую очередь компьютерной) системы в части сбора данных о ее надежности. К сложным системам, требующих мониторинга надежности своей работы во время эксплуатации, относятся компьютерные системы, системы телекоммуникаций, транспортные средства с бортовым компьютером и ряд других. Примером сложной является, в первую очередь, компьютерная система, состоящая из программного обеспечения, аппаратной части и операторов (пользователей и обслуживающего персонала).

Необходимость издания [1] была вызвана в первую очередь тем, что в интернете на запрос «наблюдения за работой компьютера» выдаются сведения о программных средствах (ПС) для наблюдений и слежки за компьютерами сотрудников, что очень важно для работодателей. К таким ПС относятся, например, программы «Yaware.TimeTracker», «Kickidler», «Стахановец» и множество других. В перечисленных программах полностью отсутствуют функции сбора данных о надежности компьютера как сложной системы.

Запрос «мониторинг эксплуатации компьютера» выдает в первую очередь информацию о технологии мониторинга (оценки внутреннего состояния в процессе эксплуатации) винчестера, которую назвали SMART (Self-Monitoring Analysis and Report Technology). Основная задача системы SMART – определение момента исчерпания рабочего ресурса винчестера и извещение об этом пользователя. Таким образом, речь идет только о винчестере как составной части компьютера.

Уточненный запрос «наблюдения за надежностью работы компьютера» позволяет получить детальную информацию об использовании системных ресурсов в составе операционной системы компьютера, а запрос «мониторинг надежности работы компьютера во время эксплуатации» выдает сведения о мониторинге и анализе надежности трансформаторов. Вывод по анализу всех вышеперечисленных запросов в интернет: актуальность издания [1] не вызывает сомнений.

Для более глубокого ознакомления с мониторингом эксплуатации компьютерной системы в [1] представляется практическая работа, в которой предлагается симитировать процесс эксплуатации системы путём ведения аппаратного журнала в среде Microsoft Excel и проведения обработки этого журнала в той же среде. В книге широко используются материалы [2-4] конференций ИСТ в Нижнем Новгороде 2010-2012 годов. Указывается, что результаты мониторинга эксплуатации компьютерной платежной системы Нацбанка Беларуси позволили в пять раз снизить число отказов системы за второе полугодие года внедрения мониторинга по сравнению первым полугодием (до внедрения). Общее время простоев за счет отказов сократилось в 10 раз. Это позволило повысить качество банковских услуг и снизить их себестоимость.

Предложенный в [1] аппаратный журнал представляет собой книгу Excel, состоящую из пяти листов:

- лист 1 (титульный лист аппаратного журнала, куда заносятся сведения о наблюдаемом устройстве),
- лист 2 (журнал-1, журнал учёта наработок и простоев),
- лист 3 (журнал-2, журнал учёта отказов, ошибок, сбоев и восстановлений),
- лист 4 (журнал-2доп, дополнение к журналу-2, первичный анализ отказов),
- лист 5 (журнал-3, журнал учёта техобслуживания).

В табл.1 и 2 показана шапка листа 2 книги Excel, (журнал-1, журнал учёта наработок и простоев). Перед заполнением журнала-1 его столбцы 6, 7, 8, 9 (длительность текущего состояния) предварительно связываются эксельными формулами со столбцами 2, 3, 4, 5 (время текущего состояния). Например, если любое текущее состояние началось в 9 часов 00 минут и закончилось в 15 часов 20 минут, то вычисленная по формуле длительность текущего состояния должна равняться  $[15 \text{ (цифра из столбца 4)} - 9 \text{ (цифра из столбца 2)}] \cdot 60 + [20 \text{ (цифра из столбца 5)} - 0 \text{ (цифра из столбца 3)}] = 380$  минут, причем символ «•» означает знак умножения.

**Таблица 1**

**Первые пять столбцов шапки журнала учёта наработок и простоев**

Дата	Время текущего состояния				Продолжение таблицы вправо показано в табли- це 2
	начало		окончание		
	час	мин	час	мин	
1	2	3	4	5	

**Таблица 2**

**Продолжение таблицы 1 (шапки журнала учёта наработок и простоев), следующие 6 столбцов вправо**

Длительность текущего состояния (мин)				Приме- чание	ФИО сде- лавшего за- пись
работа	простой				
	отказ	техобслужи- вание	прочие причины		
6	7	8	9	10	11

В лист 3 аппаратного журнала (журнал-2, журнал учёта отказов, ошибок, сбоев и восстановлений) записываются сведения о длительности технологических переходов операции восстановления работоспособности наблюдаемого объекта (ожидание осмотра, осмотра мелкий-

ремонт, ожидание крупного ремонта, крупный ремонт), а в лист 4 (журнал-2доп, дополнение к журналу–2, первичный анализ отказов) – данные о результатах восстановления работоспособности (внешнее проявление отказа, сбоя, или ошибки программного продукта (ПП), наименование отказавшей детали, сборочной единицы, ПП или его модуля, их входимость, способ устранения отказа, предполагаемая причина отказа, сбоя, ошибки (по мнению осматривающего, по мнению ремонтирующего)). В листе 5 (журнал-3, журнал учёта техобслуживания) отражаются сведения о техобслуживании (наименование работ по профилактике и техобслуживанию, наименование и количество израсходованных материалов).

### Теоретический анализ

Как показал опыт последнего полугодия, предложенный в [1] аппаратный журнал можно усовершенствовать. Мелким неудобством аппаратного журнала из [1] является использование его для относительно надежных (в части безотказности) наблюдаемых объектов. Это неудобство наблюдалось и ранее. Согласно [5], например, наработка на отказ персональных компьютеров (ПК) хозяйственного отдела Минского электротехнического завода оказалась равной 1398 часам. Однако из девяти зафиксированных отказов только один был вызван износом комплектующих (вздулись конденсаторы в блоке питания ПК с процессором Intel Core2Duo 2,2 ГГц), остальные были вызваны ошибками пользователей. Следовательно, если бы пользователи не совершали ошибок при работе с ПК, то наработка на отказ наблюдаемых ПК возросла бы в 9 раз и составила бы 12 582 часа. При среднечасовом включении ПК хозяйственного отдела в течение десяти часов это означает, что в среднем ПК работал безотказно примерно 1 258 дней (чуть меньше трех с половиной лет), а отказывал через 3,45 года. Лист 2 книги Excel, (журнал-1, журнал учёта наработок и простоев) аппаратного журнала при этом имел бы очень неудобную для чтения форму: 1 258 строк без отказов и только одна строка с длительностью отказа в столбце 7 таблицы 2. Чтобы найти эту строку с отказом среди 1 259 строк пришлось бы затратить много времени.

### Методика решения проблемы и экспериментальная часть

Для устранения описанного в п. 2 неудобства описанный в [1] аппаратный журнал предлагается усовершенствовать следующим образом:

3.1 Предложенный в [1] аппаратный журнал в виде книги Excel из пяти листов дополнить вспомогательным листом 6 «журнал-4, журнал учёта дней безотказной работы», показанным в табл. 3, 4:

**Таблица 3**

**Вид вспомогательного листа 6 книги Excel (аппаратного журнала) «журнал-4, журнал учёта дней безотказной работы», первые пять столбцов**

Дата	Время текущего состояния				<i>Продолжение таблицы вправо показано в таблице 4</i>
	начало		окончание		
	час	мин	час	мин	
1	2	3	4	5	

Таблица 4

Продолжение таблицы 3 (шапки журнала учёта дней безотказной работы), следующие 5 столбцов вправо

Длительность текущего состояния (мин)			Примечание	ФИО сделавшего запись
работа	простой			
	техобслуживание	прочие причины		
6	7	8	9	10

3.2 В дни безотказной работы заполнять только «журнал-4, журнал учёта дней безотказной работы», лист 6 книги Excel, а «журнал-1, журнал учёта наработок и простоев», лист 2 книги Excel, не заполнять. Заполнение «журнала-4» поручить пользователю под контролем системного администратора или другого специалиста, обслуживающего вычислительную технику.

3.3. Для учета в составе общей наработки длительности эксплуатации компьютера в дни безотказной его работы:

- итоговую (суммарную) наработку, отраженную в соответствующей ячейке вспомогательного «журнала-4, журнала учёта дней безотказной работы», связать эксельной формулой с ячейкой Яч«Р» (ячейка «Работа») «журнала-1, журнала учёта наработок и простоев», расположенной на пересечении столбца 6 (см. табл. 2) «Длительность текущего состояния (мин), работа» и дополнительной строки «журнала-1, журнала учёта наработок и простоев», показанной в табл.5;

- итоговое (суммарное) время техобслуживания, отраженное в соответствующей ячейке вспомогательного «журнала-4», связать эксельной формулой с ячейкой Яч«ТО» (ячейка «Техобслуживание») «журнала-1», расположенной на пересечении столбца 8 (см. табл. 2) «Длительность текущего состояния (мин), простой, техобслуживание» и дополнительной строки «журнала-1», показанной в таблице 5;

- итоговое (суммарное) время простоя по прочим причинам, отраженное в соответствующей ячейке вспомогательного «журнала-4», связать эксельной формулой с ячейкой Яч«ПП» (ячейка «Прочие причины») «журнала-1», расположенной на пересечении столбца 9 (см. табл. 2) «Длительность текущего состояния (мин), простой, техобслуживание» и дополнительной строки «журнала-1», показанной в табл. 5.

Таблица 5

Вид дополнительной строки (первые 6 столбцов) листа 2 книги Excel (аппаратного журнала) «журнал-1, журнал учёта наработок и простоев» (столбцы 10 «Примечание» и 11 «ФИО сделавшего запись», аналогичные одноименным столбцам таблицы 2, не показаны)

Дата	Время текущего состояния				Длительность текущего состояния (мин)		
	начало		окончание		работа	простой	
	час	мин	час	мин		техобслуживание	прочие причины
1	2	3	4	5	6	8	9
Дополнительная строка					Яч«Р»	Яч«ТО»	Яч«ПП»

Экспериментальная проверка предложенных выше усовершенствований аппаратного журнала в течение полугода проводится системными администраторами Общества с ограниченной ответственностью (ООО) «Стрим центр» (Минск).

### Результаты и выводы

Проведенная экспериментальная проверка предложенных выше усовершенствований аппаратного подтверждает возможность использования усовершенствованного журнала в практике работы системных администраторов. Администраторы ООО «Стрим центр» по результатам проверки подчеркивают удобство работы с усовершенствованным аппаратным журналом по сравнению с его прототипом, предложенным в [1].

### Библиографический список

1. **Мониторинг** эксплуатации компьютерных систем / под ред. В. В. Бахтизина, Г. В. Сечко. – Минск: Бестпринт, 2019. – 56 с.

2. **Калачев, И.А.** База данных по результатам наблюдений за работой вычислительной техники / И. А. Калачёв и [др.] // Материалы 16-й межд. НТК «Информационные системы и технологии ИСТ-2010», 23 апреля 2010 года, Нижний Новгород. – Нижний Новгород: НГТУ, 2010. – С. 204.

3. **Пачинин, В.И.** Взаимосвязь сложности создаваемой базы данных по результатам наблюдений за работой технического объекта с его видом и назначением / В. И. Пачинин и [др.] // Материалы 17-й межд. НТК «Информационные системы и технологии ИСТ-2011», 22 апреля 2011 года, Нижний Новгород. – Нижний Новгород: НГТУ, 2011. – С. 240.

4. **Пачинин, В.И.** Повышение надёжности и информационной безопасности оборудования автоматической телефонной станции / В. И. Пачинин и [др.] // Материалы 18-й межд. НТК «Информационные системы и технологии» (ИСТ–2012), Нижний Новгород (20 апреля 2012 г.). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2012. – 369 с. – С. 246

5. **Шерemet, Д. В.** Анализ отказов компьютерных станций хозяйственного отдела машиностроительного предприятия // 50-я науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению 8: Информационные системы и технологии: тез.докл. (Минск, 29 марта 2014 года). – Минск: БГУИР, 2014. – С. 51.

**V.L. NIKOLAENKO<sup>3</sup>, G.V. SECHKO<sup>1</sup>, T.G. TABOLIC<sup>2</sup>**

### RELIABILITY DATA COLLECTION FORMS WHEN MONITORING OPERATION OF COMPLEX SYSTEMS

<sup>1</sup>«Stream Center» Limited Liability Company (Minsk)

<sup>2</sup>Belarusian Scientific Research Institute Transtekhnika (Minsk)

<sup>3</sup>Belarusian National Technical University (Minsk)

The issues of monitoring (observation) of the operation of a complex system in terms of collecting data on its reliability. Complex systems include computer systems, telecommunications systems, vehicles with an on-board computer, and a number of other. Improved forms are proposed for collecting reliability data when monitoring the operation of complex systems.

**Keywords:** complex system, computer system, reliability, data collection, forms for collection, improvement.

Э.С. Соколова, С.С. Заборин

## МЕТОД ДОСТИЖЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО ВНЕШНЕГО КОНСЕНСУСА

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексева

В работе рассматривается проблема достижения отказоустойчивой репликации в распределенных системах на основе консенсуса и предлагается метод достижения отказоустойчивости распределённых приложений на основе системы универсального внешнего консенсуса.

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, распределенные системы, алгоритмы консенсуса.

### Актуальность и цель работы

Распределенные системы на сегодняшний день приобрели широкую популярность, и, не в последнюю очередь, эта популярность связана со стремлением повысить отказоустойчивость систем путем репликации критично важных компонент. При этом создание отказоустойчивых распределённых приложений является крайне сложным процессом, поскольку разработчикам необходимо учесть большое количество различных потенциальных проблем и аномалий, специфичных в области распределенных вычислений. Для того, чтобы справиться с этой сложностью, были введены различные абстракции, одна из самых фундаментальных и эффективных — это консенсус, то есть согласие всех процессов в распределённой системе относительно некоторого значения. На сегодняшний день разработаны и используются различные алгоритмы консенсуса, однако корректно реализовать отказоустойчивые распределенные приложения по-прежнему далеко не просто. Алгоритмы консенсуса являются сложными для понимания, разработки, тестирования и внедрения, поэтому не удивительно, что наиболее простой алгоритм консенсуса Raft превосходит по популярности прочие, даже более производительные алгоритмы консенсуса. Таким образом, несмотря на попытки упрощения разработки отказоустойчивых распределенных систем с помощью различных абстракций, эта задача по-прежнему является актуальной и достаточно сложной.

В данной статье рассматривается проблема достижения отказоустойчивой репликации в распределенных системах на основе консенсуса и предлагается метод достижения отказоустойчивости распределённых приложений на основе системы универсального внешнего консенсуса. Предполагается, что такой метод достижения отказоустойчивости распределенных приложений упрощает понимание, реализацию, тестирование и внедрение распределенных систем на основе консенсуса по сравнению с существующими методами.

### Отказоустойчивость и распределенные системы

Отказоустойчивость — это свойство системы сохранять работоспособность при наличии отказов, при этом качество функционирования отказоустойчивой системы уменьшается пропорционально серьезности отказа. Это отличает отказоустойчивые системы от систем, в которых любая ошибка ведет к отказу всей системы. Отказоустойчивость особенно востребована в системах с высокой степенью готовности. Основными характеристиками отказоустойчивости являются: отсутствие единой точки отказа, локализация отказов, сдержива-

ние распространения отказов. Одним из самых эффективных способов достижения отказоустойчивости системы является репликация критично важных компонент распределенной системы.

Распределенной называют систему, компоненты которой расположены на различных связанных в сеть вычислительных машинах, при этом компоненты, в свою очередь, взаимодействуют друг с другом и координируют свои действия посредством отправки сообщений для достижения общей цели. Разработка распределенных систем неизбежно связана с высокой сложностью, поскольку для обеспечения требуемых свойств системы разработчику приходится сталкиваться с большим количеством ошибок, трудностей и аномалий, не свойственных системам, состоящим из одного узла. Таким образом, достижение отказоустойчивости системы с использованием репликации является далеко не тривиальной задачей. Стоит так же отметить, что в области распределенных систем существуют и другие проблемы обеспечения корректного функционирования, которые, как мы покажем далее, имеют много общего с проблемой достижения отказоустойчивости на основе репликации и решаются похожими инструментами и методами.

### **Консенсус как средство обеспечения отказоустойчивости**

Репликация – это процесс распределения информации для поддержания согласованности резервных компонент с целью повышения отказоустойчивости, надежности и доступности системы в целом. В контексте данной работы рассмотрим вопросы репликации данных, без анализа вычислительных процессов. Репликация подразумевает распределение компонент, поэтому корректная реализация отказоустойчивой репликации связана со многими трудностями. В связи с этим, были разработаны различные модели для упрощения реализации репликации, одна из которых – реплицированный конечный автомат.

В рамках модели реплицированного конечного автомата каждая резервная компонента представляется в виде конечного автомата, тогда репликация достигается за счет выполнения на каждом из конечных автоматов одного и того же набора команд в одинаковой последовательности. Таким образом, проблема реализации репликации сводится к проблеме согласия всех компонент относительно выполняемых команд и их порядка. Если решить данную проблему, то удастся реализовать реплицированный конечный автомат, а значит, добиться отказоустойчивости соответствующей распределенной системы. В действительности эта проблема является фундаментальной в области распределенных систем и получила название «проблема консенсуса».

Консенсус – это соглашение между одноранговыми узлами распределенной системы относительно некоторого значения, надежно достижимое даже при наличии отказов. Примеры использования консенсуса в распределенных системах включают отказоустойчивые реализации атомарного широковещания, реплицированного конечного автомата, механизма подтверждения распределенной транзакции, механизма выбора лидера среди одноранговых узлов. В большинстве случаев для достижения консенсуса необходимо, чтобы на время реализации консенсуса больше половины одноранговых узлов распределенной системы находились в рабочем состоянии, то есть не находились в состоянии отказа. Консенсус предоставляет следующие важные гарантии:

- валидность – в ходе консенсуса могут быть приняты только предложенные значения и никакие другие;
- целостность – принятое значения должно совпадать у всех узлов;

- завершаемость – все узлы должны в итоге согласиться относительно некоторого значения.

На сегодняшний день существуют различные системы, построенные на основе консенсуса, которые получили широкое распространение по причине своей отказоустойчивости. Примерами таких систем могут быть отказоустойчивые распределенные многофункциональные системы на основе хранилищ типа ключ-значение, например, etcd и ZooKeeper.

### Традиционный метод достижения отказоустойчивой репликации на основе консенсуса

Самыми популярными на сегодняшний день алгоритмами достижения консенсуса в области распределенных систем являются алгоритмы семейства Paxos и алгоритм Raft. Очевидно, что наличие алгоритма как такового недостаточно для реализации системы. Рассмотрим подробнее, каким образом возможно реализовать отказоустойчивую репликацию на основе алгоритма консенсуса.

На рис. 1 представлена схема традиционного способа реализации, который используется практически во всех существующих системах, построенных на основе консенсуса. В традиционной модели логика достижения консенсуса и логика системы объединены в одно приложение, которое, в свою очередь, представлено в нескольких экземплярах. Таким образом, количество экземпляров модуля консенсуса равно количеству экземпляров основных модулей логики системы. Поскольку каждый модуль консенсуса объединен с модулем логики системы в одно приложение, отказ в одном из них приводит также к отказу в другом, при этом отказы в одном экземпляре приложения надежно обрабатываются логикой консенсуса и не приводят к отказу других экземпляров. В такой модели клиенты обращаются к приложению с предложением команд, которые сразу поступают на вход модуля консенсуса (стрелка 1). Модуль консенсуса реализует алгоритм консенсуса и отказоустойчиво реплицирует команду между всеми процессами (стрелка 2). Далее модуль логики системы, который рассматривается как конечный автомат, получает оповещение о принятии команды в набор и должен применить соответствующую команду к автомату (стрелка 3). После выполнения команды конечным автоматом приложение отправляет клиенту ответ с результатом выполнения команды (стрелка 4).

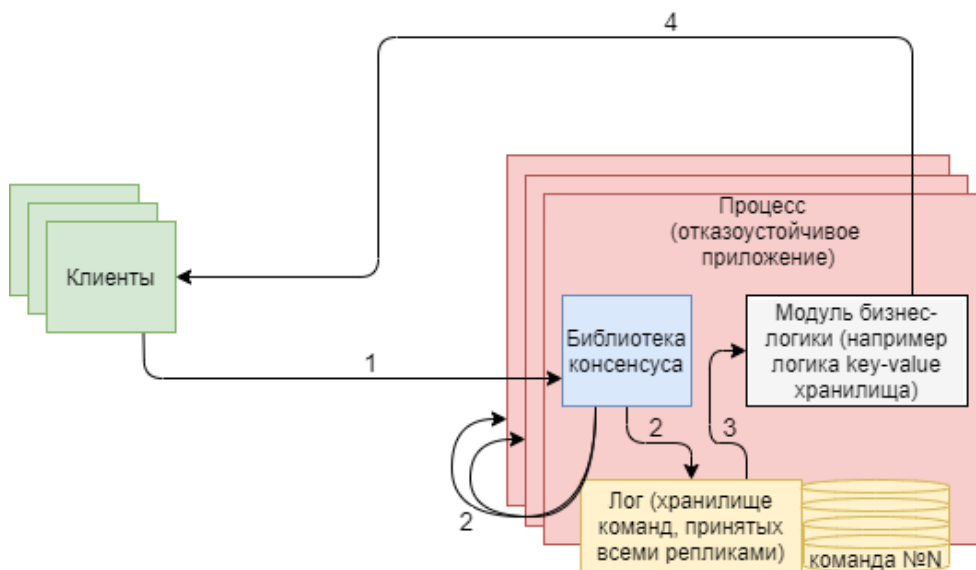


Рисунок 1. Схема традиционного метода реализации отказоустойчивой репликации на основе консенсуса

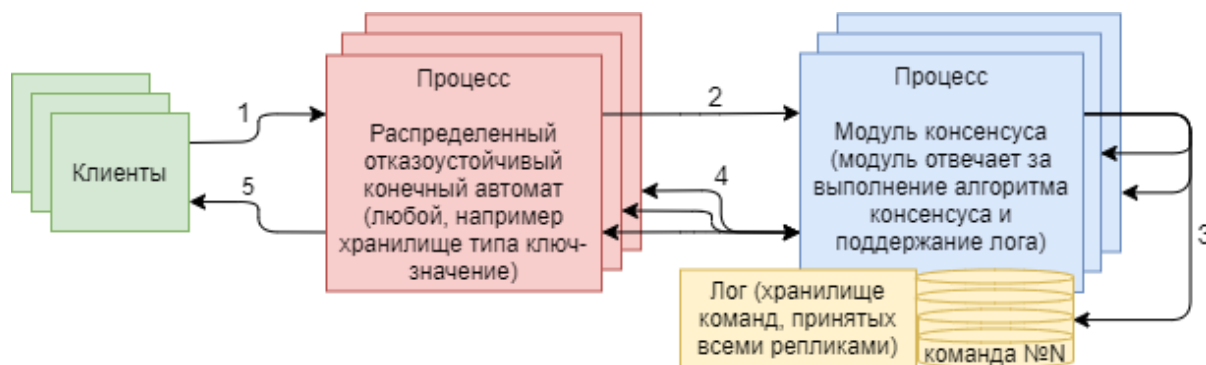


Традиционная модель является, фактически, единственным широко известным и принятым методом достижения отказоустойчивости с помощью консенсуса, однако она обладает рядом недостатков:

- объединение модуля логики системы и модуля консенсуса в одно приложение приводит к сильной связанности: приложение оказывается завязанным на конкретную реализацию консенсуса, так что эту реализацию становится сложнее заменить или перенастроить отдельно от приложения;
- модуль логики системы и модуль логики консенсуса отказывают одновременно, поскольку при любом отказе из строя выходит весь экземпляр приложения целиком;
- поскольку логика системы и логика консенсуса являются единым приложением, они должны быть реализованы на одном и том же языке программирования, что оказывает существенное влияние на выбор алгоритма консенсуса. Это также может привести к проблемам нахождения готовых реализаций (например, в выбранном языке программирования может не оказаться реализации нужного алгоритма консенсуса, либо доступные реализации могут быть плохо протестированными).

### Метод достижения отказоустойчивой репликации на основе системы универсального внешнего консенсуса

Принципиальное отличие предлагаемого в данной работе метода достижения отказоустойчивой репликации состоит в выделении модуля консенсуса в отдельную распределенную систему универсального внешнего консенсуса. На рис. 2 представлена схема предлагаемого метода. Как видно из схемы, при использовании предлагаемого метода модуль логики системы, представляющий реплицируемый конечный автомат, является приложением, отдельным от системы универсального внешнего консенсуса, содержащей логику консенсуса.



**Рисунок 2.** Схема альтернативного метода реализации отказоустойчивой репликации на основе системы универсального внешнего консенсуса

Рассмотрим подробнее, как проходит запрос клиента с помощью системы, реализованной предложенным методом. Клиент, традиционно, посылает команду приложению (стрелка 1), однако приложение не применяет команду к конечному автомату сразу. Для достижения отказоустойчивой репликации приложение посылает команду далее, в систему внешнего консенсуса (стрелка 2). Система внешнего консенсуса представляет собой отдельную распределенную систему, состоящую из нескольких узлов и отвечающую за отказоустойчивую упорядоченную репликацию принятых команд среди узлов этой системы (стрелка 3). Таким образом, за счет отказоустойчивой репликации систему внешнего консенсуса можно рассматривать как высокодоступный отказоустойчивый сервис по упорядочиванию команд. Прило-

жение опрашивает систему консенсуса о наличии новых команд, принятых в набор, и применяет их к конечному автомату по мере поступления в порядке их принятия (стрелка 4). Как только приложение обнаружит, что команда клиента была добавлена в набор и применена к конечному автомату, результат выполнения этой команды отправляется клиенту в качестве ответа (стрелка 5). Поскольку каждый конечный автомат выполняет только те команды, которые были отказоустойчиво приняты системой консенсуса, и только в том порядке, в котором их отказоустойчиво приняла система консенсуса, все экземпляры конечного автомата оказываются отказоустойчиво реплицированными.

Таким образом, сформулируем преимущества предложенного метода:

- разделение модуля логики системы и модуля логики консенсуса приводит к слабой связанности, так что отдельные модули могут быть заменены или перенастроены с меньшим влиянием на другие модули;
- отказы в одном из модулей в меньшей степени сказываются на других модулях и на системе в целом. Модули могут иметь разное количество экземпляров, например, модуль консенсуса может иметь 3 экземпляра, а модуль логики системы – 10 экземпляров;
- модуль консенсуса становится «переиспользуемым» и может взаимодействовать с модулями системы, написанными на различных языках. Модуль консенсуса может включать только хорошо протестированные реализации различных алгоритмов консенсуса, между которыми можно переключаться в случае необходимости.

### **Недостатки разрабатываемого альтернативного метода и способы их преодоления**

Важно учитывать тот факт, что разделение приложения на два отдельных взаимодействующих приложения, кроме перечисленных выше преимуществ, имеет ряд недостатков, которым нужно уделить пристальное внимание. К основным недостаткам метода на основе системы внешнего консенсуса можно отнести: увеличение количества сущностей, снижение производительности репликации конечных автоматов в связи с дополнительными задержками в сети, а также усложнение интерфейса взаимодействия модуля логики системы и модуля логики консенсуса. На первый взгляд эти недостатки могут показаться существенными, поэтому остановимся на каждом из них подробнее.

Увеличение количества сущностей может показаться серьезным недостатком, поскольку, чем больше сущностей, тем труднее ими управлять и тем тяжелее внедрить такую систему. На самом деле, использование современных популярных систем оркестрации приложений, например, Kubernetes [3], значительно упрощает процедуры внедрения и управления приложениями с большим количеством сущностей. Свидетельством этому является популярность «микросервисного» подхода к разработке систем, который фактически поощряет разделение системы на отдельные логические подсистемы. Тем не менее, в ходе разработки системы внешнего консенсуса планируется особое внимание уделить простоте внедрения, конфигурации и разворота системы.

Что касается снижения производительности из-за задержек в сети, то здесь можно привести следующие контраргументы:

- зачастую такая система целиком располагается в рамках одного центра обработки данных, где задержки в сети достаточно низкие;
- использование проверенных реализаций алгоритмов консенсуса так же подразумевает, что эти реализации более производительны, чем потенциально доступные в традиционном методе аналогичные реализации;

- часто незначительные снижения производительности являются приемлемой платой за достижение повышенной отказоустойчивости.

Несмотря на эту аргументацию, стоит, тем не менее, признать, что при прочих равных условиях метод на основе системы внешнего консенсуса будет уступать в производительности традиционному методу. В связи с этим, при разработке системы так же планируется сделать акцент на производительность, по возможности без ущерба гибкости и простоте использования.

Что касается усложнения интерфейса взаимодействия, то здесь также нужно признать, что некоторое усложнение – это вынужденная плата за наличие универсального решения, и интерфейс библиотеки, написанной на том же языке программирования, практически всегда гораздо проще любого универсально интерфейса взаимодействия с внешней системой. Соответственно, при разработке системы также планируется сделать акцент на реализацию максимально простого интерфейса для использования внешними клиентами. Часто реализация простого и производительного интерфейса оказывается сложной задачей, однако, существуют готовые технологии реализации высокопроизводительных, простых и функциональных интерфейсов, например, технология gRPC [4].

### Вывод

В данной работе сформулирована проблема достижения отказоустойчивой репликации в распределенных системах, рассмотрены абстракции конечного автомата и консенсуса как способы решения этой проблемы, а также предложен новый метод достижения отказоустойчивости распределенных систем на основе системы универсального внешнего консенсуса. Проведено сравнение существующего традиционного метода достижения отказоустойчивой репликации на основе консенсуса с новым предложенным подходом, рассмотрены преимущества и недостатки этих методов. Показано, что предложенный метод позволяет достичь большей гибкости, надежности и универсальности системы в целом ценой потери производительности и усложнения интерфейсов взаимодействия. В связи с наличием выявленных недостатков предложены рекомендуемые способы снижения возникающих негативных последствий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00151.*

### Библиографический список

1. **Мартин Клеппман.** “Designing Data-Intensive Applications”, O’Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472. Март 2017.
2. **Диего Унгаро.** “Consensus: Bridging Theory and Practice”, Stanford University. 2014 год.
3. Kubernetes [Электронный ресурс]: Материал из Википедии — свободной энциклопедии: Версия 103474124, сохранённая в 17:02 UTC 22 ноября 2019 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2019. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=103474124>
4. gRPC [Электронный ресурс]: Материал из Википедии — свободной энциклопедии: Версия 938312966, сохранённая в 12:13 UTC 30 января 2020 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2020. — Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/?oldid=938312966>

**E.S. Sokolova, S.S. Zaborin**

**METHOD FOR ACHIEVING FAULT-TOLERANCE IN DISTRIBUTED SYSTEMS  
BASED ON EXTERNAL UNIVERSAL CONSENSUS SERVICE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

In this work considered a problem of achieving fault-tolerant replication in distributed systems using consensus and suggested a new method for achieving fault-tolerance in distributed systems based on external universal consensus service.

**Key words:** fault-tolerance, distributed systems, consensus algorithms.

А.О. Бойкова, М.А. Степаненко, М.Б. Багиров

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ АГРЕГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМОБИЛИСТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Разработанная информационная система осуществляет агрегацию компаний автомоек. Система включает в себя два клиентских приложения: мобильное нативное приложение для клиентов и веб-инструмент для компаний автомоек. В данной статье представлена архитектура системы, описываются инструменты для разработки, рассматриваются таблицы из информационной модели базы данных.

**Ключевые слова:** агрегатор, информационная система для автомобилистов, клиент-серверная архитектура, мобильное приложение, веб-приложение

### Введение

В настоящее время разработка приложений в формате бизнес-агрегатора является одним из перспективных направлений развития. Не производя собственных предложений, агрегаторы обеспечивают связь между потребителем и исполнителем. Основные преимущества подобных систем – это высокая сосредоточенность представителей одной отрасли в одном месте, экономия времени при поиске (возможность искать необходимую услугу/товар по различным критериям), актуальность и достоверность предоставляемых данных.

В данной работе в качестве предметной области была выбрана сеть автомоек. Агрегатор автомоек может стать актуальным и для клиентов, и для компаний. Клиенты автомоек приобретут следующие возможности:

- коммуникация с компанией онлайн;
- доступ к информации об услугах, о свободном времени, о дополнительных возможностях;
- уверенность в надежности исполнителя (благодаря рейтингу, отзывам у клиента есть гарантия качества услуг);
- дополнительный функционал, предоставляемый мобильным приложением (например: построение маршрута от точки нахождения до локации, сортировка поиска, получение рекомендаций);
- минимизацию временных затрат (самостоятельный поиск, подбор необходимых услуг и сравнение их с альтернативами может потребовать много времени, благодаря агрегации компаний и рекомендательной системе неподходящие варианты могут быть отсечены автоматически).

Владельцы бизнеса автомоек в свою очередь выбором использования агрегатора могут решить следующие задачи:

- организация взаимодействия с клиентами;
- оценка своего положения на рынке (находясь в одной системе со своими прямыми конкурентами, компания может адекватно оценить свои слабые и сильные стороны);
- раскрутка для начинающего бизнеса (для новых автомоек использование популярного агрегатора – способ привлечь к себе клиентов).

- создание площадки для распространения информации о компании и о предоставляемых услугах;
- рекламный канал (рекомендательная система является дополнительным способом привлечь внимание потенциального клиента).

Основываясь на представленном формате, потребуем, чтобы разрабатываемая система состояла из следующих компонентов: база данных (БД), серверная часть, веб-клиент, мобильный клиент. Архитектура системы представлена на рис. 1.

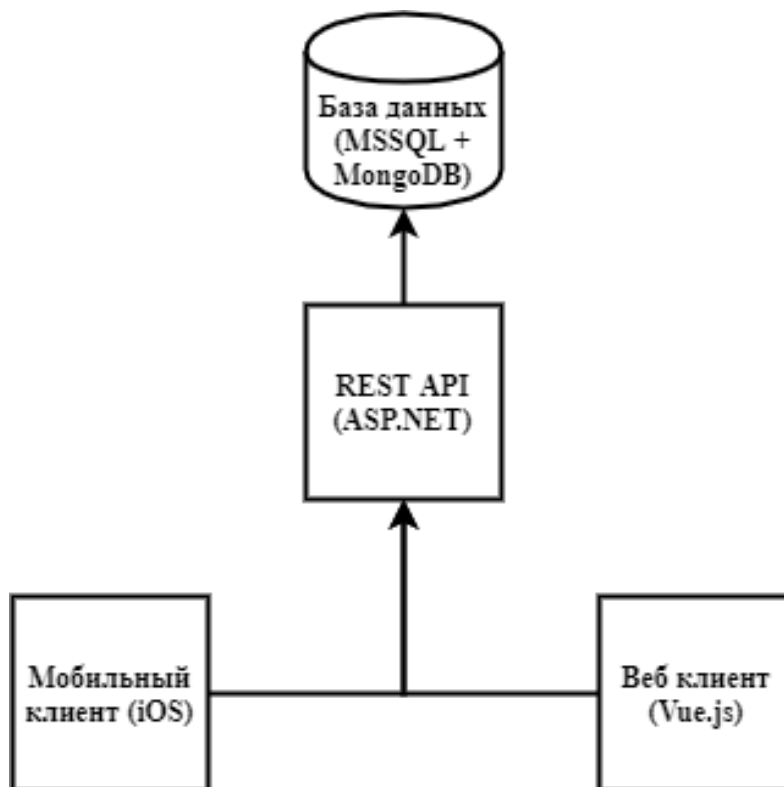


Рисунок 1. Архитектура системы

### База данных

NoSQL включает в себя широкий спектр различных технологий баз данных, которые были разработаны в соответствии с требованиями, предъявляемыми при создании современных приложений.

По сравнению с реляционными базами данных базы данных NoSQL являются более масштабируемыми и обеспечивают превосходную производительность, а их модель данных решает несколько проблем, для решения которых реляционная модель не предназначена [1]:

- Большие объемы быстро меняющихся структурированных, полуструктурированных и неструктурированных данных;
- Гибкие спринты, быстрая итерация схемы и частые изменения кода;
- Объектно-ориентированное программирование, простое в использовании и гибкое;
- Географически распределенная горизонтальная архитектура вместо дорогой монолитной архитектуры.

Выбор комбинации SQL и NoSQL баз данных обусловлен требованием сбора данных разной степени структурированности. Работа с неструктурированной информацией является

сильной стороной NoSQL-баз. Но предметная область не обладает настолько специфическими условиями, в которых NoSQL решения были бы выгодны в качестве основной базы данных. NoSQL хранилища показывают себя с очень хорошей стороны в симбиозе с реляционными базами данных.

Приведем описание некоторых таблиц из информационной модели SQL БД:

- User – хранит в себе данные о зарегистрированных пользователях, имеет связи с таблицами Company и Client.
- Company – характеристики пользователей веб-приложения, аккаунты компании.
- Client – характеристики пользователей мобильного приложения.
- CarWash – хранит в себе информацию об автомойках, имеет связи с CarWashWorkingHours, CarWashService и Appointment.
- CarWashWorkingHours – таблица с данными о рабочих часах автомойки.
- CarWashService – таблица с информацией об услугах автомойки, имеет связь с таблицей Appointment.
- Appointment – хранит в себе данные о заказах, имеет связи с вышеуказанными таблицами и таблицей Car.
- Car – хранит в себе свойства автомобилей, которые принадлежат клиенту и имеет связь с таблицами Appointment и Client.

Данные, используемые для анализа, будут собираться в NoSql базу. Для создания рекомендаций компаний для пользователей требуется собрать параметры заказов, оценки и запросы пользователя.

### Серверная архитектура

При выборе инструментов для развертывания сложной, но устойчивой к различным нагрузкам серверной системы необходимо учитывать ряд параметров. В первую очередь стоит проанализировать возможный набор данных, с которым будет работать продукт. Из него можно будет получить структуру данных для хранения. Этот этап позволяет подойти к выбору системы управления базами данных (СУБД) и инструментов для обработки информации. Следующим пунктом рассматриваются различные языки программирования и библиотеки, способствующие созданию серверного приложения как прослойки между клиентом и хранимыми данными. Дополнительными требованиями учитываются задачи, которые устанавливаются перед продуктом. Все выбираемые средства для разработки должны максимально надежно и качественно работать в связке между собой. Также важным критерием будет являться скорость работы при высокой серверной нагрузке.

Анализ существующих решений показал, что комбинация Microsoft SQL Server 2017/2019 и MongoDB (NoSQL) как СУБД и приложение на базе платформы .NET Core 3.1 с языком программирования C# с использованием библиотеки ASP.NET Core для развертывания web-приложения будет наиболее оптимальными набором инструментов при разработке системы. Главными преимуществами такого инструмента являются:

- Microsoft SQL Server не первый год на рынке, накопленный опыт и качество продукта делает данный инструмент одним из самых популярных решений [2];
- .NET Core – кроссплатформенное решение с открытым кодом от компании Microsoft, в последнее время набирает большую популярность, является продолжением семейства .NET Framework платформы;

- ASP.NET Core – кроссплатформенная библиотека от компании Microsoft для создания web-приложений, в частности для создания RESTful API, направленное на коммуникацию клиента с сервером [3];
- все перечисленные решения могут просто интегрироваться в единое решение без излишних трудностей.

Дополнительным удобством можно выделить возможность создания RESTful API приложения совместно с одностраничным приложением (SinglePageApplication, SPA) с помощью механизма промежуточных слоев (Middlewares). Таким образом, в систему было встроено JavaScript-приложение с использованием Vue.js библиотеки, что упрощает и процедуру разработки и последующих поставок. Коммуникация клиента и сервера происходит в два этапа: клиент инициирует выгрузку JavaScript-приложения с сервера при первом запуске сайта в браузере, после чего клиент с его помощью может через REST API запросы запрашивать с сервера или передавать ему данные. Разграничение ответственности SPA и REST API разделяется за счет контекста строки запроса: при наличии «/api/...» в начале строки запроса сервер будет интерпретировать запрос как обращение к API, иначе – к SPA. Схема работы серверной архитектуры системы приведена на рис. 2.

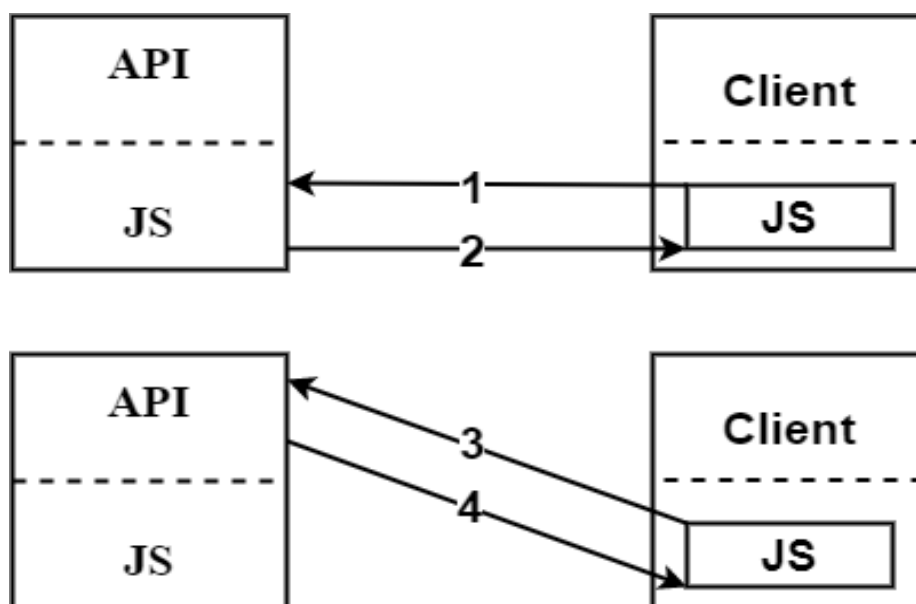


Рисунок 2. Схема работы серверной архитектуры с веб-клиентом

### Мобильный клиент

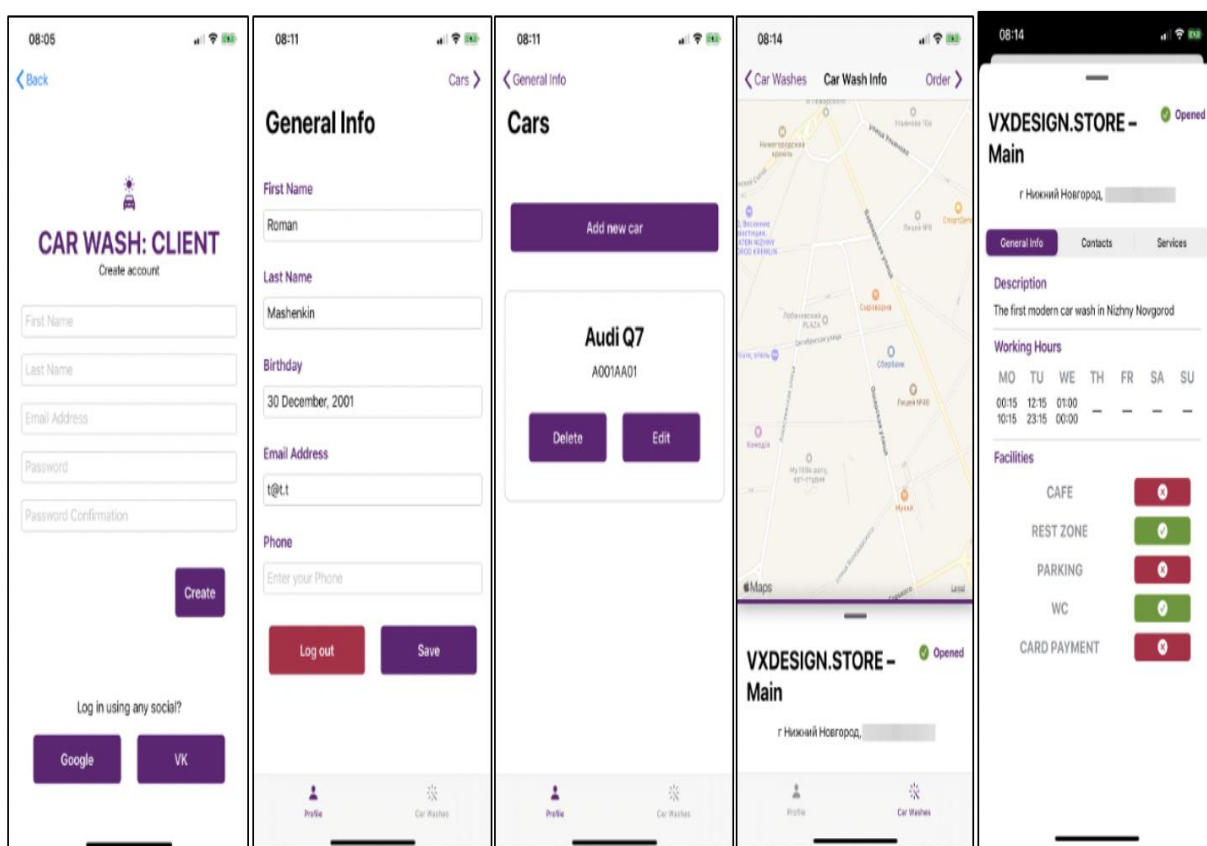
Анализ рынка мобильных приложений показал, что подобных агрегаторов в сфере автомоек не представлено. Приведем минимальный требуемый функционал для мобильного приложения:

- поиск компании с фильтрацией;
- получение рекомендаций на основе анализа запросов и заказов;
- оформление и отмена заказа;
- хранение истории заказов;
- построение маршрутов;
- возможность оставлять отзывы;
- регистрация и авторизация через систему и социальные сети;
- редактирование профиля пользователя



В качестве платформы для разработки мобильного приложения была выбрана платформа iOS. Apple анонсировала новый инструмент SwiftUI на WWDC в 2019 году. SwiftUI – это декларативный фреймворк для создания пользовательского интерфейса [4]. Это означает, что вместо применения Storyboards или программной генерации графических элементов можно использовать простоту фреймворка SwiftUI. Для реализации мобильного клиента с использованием современных средств подходит архитектура Model-View-ViewModel (MVVM), так как инструмент SwiftUI не создает контроллеров и не соответствует шаблону Model-View-Controller (MVC).

На рис. 3 представлен пример интерфейса разработанного мобильного приложения: экран регистрации, экран профиля пользователя, экран со списком автомобилей пользователя, экран с адресом автомойки и отметкой на карте, экран с профилем автомойки.



регистрация

профиль

список авто

локация автомойки

профиль автомойки

**Рисунок 3. Пользовательский интерфейс мобильного приложения**

### Веб-клиент

Для создания системы, удобной не только для клиентов (автомобилистов), требуется реализовать веб-приложение для компаний, в котором будут доступны следующие возможности:

- ввод, редактирование, удаление данных о компании;
- создание, редактирование, удаление списка услуг;
- создание, редактирование расписания;

- возможность просматривать заказы и менять их статус.

React, Vue и Angular являются отличным выбором для разработки веб приложений. Все 3 фреймворка стабильно лидируют на рынке. Тем не менее, следует отметить такие преимущества Vue, как меньшая емкость выделение памяти, структурированность, легкая настройка [5]. Данные преимущества приводят к сокращению времени разработки приложения.

Среди преимуществ данных инструментов разработки выделяют декларативный код, скорость разработки и развитое сообщество (техническая поддержка, полная актуальная документация, активные обсуждения на форумах). Для выбора инструмента стоит сравнить технические характеристики. Для сравнения производительности веб-фреймворков используются результаты измерений продолжительности различных операций с большой таблицей данных.

#### Показатели продолжительности выполнения операций (мс)

Фреймворк	Создание строк: время создания 1000 строк после загрузки страницы	Выбор строки: время выделения строки в ответ на щелчок по строке	Перемещение строки: время изменения места 2 строк в таблице с 1000 строк	Удаление строки: время удаления строки
vue-v2.5.16	182.1	10.6	20.0	54.2
angular-v6.1.0	185.2	7.9	105.8	47.1
react-v16.4.1	180.5	10.3	106.5	49.6

Измерения скорости показывают, что все фреймворки выполняют операции с примерно одинаковой продолжительностью, но есть операции, где разность в производительности значительная, а именно длительность выполнения перемещения строк. В результате фреймворк Vue.js выполняет данную операцию в пять раз быстрее.

#### Заключение

В данной работе описаны основные цели системы для автомобилистов, представлена архитектура информационной системы, описан каждый компонент: БД, серверная часть, веб клиент, мобильный клиент; проведен сравнительный анализ инструментов для разработки веб приложений. Использование реализованной системы может решить бизнес-задачи для владельцев автомоек и предоставить приложение с актуальным функционалом для клиентов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

#### Библиографический список

1. Официальный сайт mongoDB [Электронный ресурс] // [Офиц. сайт] mongoDB – URL: <https://www.mongodb.com/nosql-explained> (дата обращения 02.03.2020).
2. Официальный сайт Microsoft: SQL Server 2019 [Электронный ресурс] // [Офиц. сайт] Microsoft: SQL Server 2019 – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/sql/sql-server/what-s-new-in-sql-server-ver15?view=sql-server-ver15> (дата обращения 02.03.2020).

3. Официальный сайт Microsoft: ASP.NET Core [Электронный ресурс] // [Официальный сайт] Microsoft: ASP.NET Core – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/?view=aspnetcore-3.1> (дата обращения 02.03.2020).
4. Официальный сайт DeveloperApple: SwiftUI [Электронный ресурс] // [Официальный сайт] DeveloperApple: SwiftUI – URL: <https://developer.apple.com/xcode/swiftui/> (дата обращения 02.03.2020).
5. Официальный сайт Vue.js [Электронный ресурс] // [Официальный сайт] Vue.js – URL: <https://vuejs.org/v2/guide/> (дата обращения 02.03.2020).

**A.O. Boykova, M.A. Stepanenko, M.B. Bagirov**

## **THE DEVELOPMENT OF INFORMATION RECOMMENDATION AGGREGATION SYSTEM FOR DRIVERS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The developed information system aggregates car wash companies. The system includes two client applications: a mobile native application for customers and a web tool for car wash companies. This article presents the architecture of the system, describes the tools for development, considers tables from the information model of the database.

**Keywords:** aggregator, information system for drivers, client-server architecture, mobile application, web-application

Р. С. Машенькин, М. А. Степаненко

## AGILE-МЕТОДОЛОГИЯ КАК ЧАСТЬ СОВРЕМЕННОГО МИРА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В работе рассмотрены описания нескольких подходов Agile-методологии в рамках разработки программного обеспечения. Сформулирована главная цель, которая достигается за счет методологии. Показана возможность применения ряда положений методологии с помощью инструментов для разработчиков программного обеспечения.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, рабочий процесс, задачи, Agile-методология, подходы к методологии, Kanban, Scrum.

### Введение

Разработка программного обеспечения (ПО) — это сложный и трудоемкий процесс. На сегодняшний день создается, развивается или просто поддерживается огромное число проектов, что можно увидеть на примере публичных репозиторий (без учета закрытых для общего доступа) на таких популярнейших хостингах как GitHub, GitLab и Bitbucket. Развитие продуктов для конечного пользователя происходит параллельно с постоянным увеличением качества вспомогательных инструментов, которые могут использоваться в различных решениях. Помимо этого, крайне тяжело реализовывать серьезный проект без должного внимания к организации процесса разработки и его планированию на определенный срок. Также нельзя не учитывать, насколько важна продуктивность каждого специалиста в своей области внутри рабочей группы. Поэтому для достижения максимальной производительности всей команды прибегают к различным практикам. Их основные идеи дают возможность выстроить план по развитию разрабатываемого продукта.

Одной из таких практик является Agile-методология. Она была сформулирована в 2001 году благодаря желанию IT-сообщества найти универсальный подход к проблеме ведения рабочего процесса для успешного развития любого проекта. Уже сейчас можно с уверенностью сказать, что данная практика имеет большую популярность далеко за пределами области информационных технологий. Так, нередко можно встретить примеры адаптации основных положений методологии в различных сферах деятельности, где требуются большие вложения сил и энергии в процесс, а в конечном итоге ожидается достижение высокого качества выполняемой работы. Подобная практика применяется людьми в их собственной жизни вне работы.

### Определение понятий Agile-методологии и ее подходов

Представим обычную ситуацию: стену, на которую повесим простую деревянную досочку. Ее целью является отображение информации о делах и задачах, которые еще только предстоит сделать («Todo») или которые уже в процессе, но не были завершены («InProgress») или которые были сделаны, но ожидают одобрения со стороны других людей («Inreview») или которые полностью можно считать завершенными («Done»). Разделим та-

кую досочку на 4 колонки и несколько строк и заполним в нужных ячейках бумажными стикерами все свои задачи, как это представлено на рис. 1.

To do	In progress	In review	Done
Task	Task	Task	Task
Task	Task	Task	Task
Task			Task
Task			

**Рисунок 1. Схематичное изображение доски с распределенными по состоянию выполнения задачи**

Стоит отметить, что цвет стикеров позволяет определить степень важности каждой задачи – ее приоритет. Так, например, оранжевый цвет показывает высокую важность задачи, что необходимо разрешить как можно раньше, желтый – среднюю важность, эти задачи рассматриваются при отсутствии других более важных задач, зеленый – низкую важность, когда задачи выполняются в последнюю очередь.

Agile с английского переводится как «гибкий», «проворный». За этим словом стоит «семейство» подходов в разработке программного обеспечения для ведения рабочего процесса через 4 основополагающих утверждения, которые были описаны в манифесте методологии [1]:

- люди и взаимодействие важнее процессов и инструментов;
- работающий продукт важнее исчерпывающей документации;
- сотрудничество с заказчиком важнее согласования условий контракта;
- готовность к изменениям важнее следования первоначальному плану.

«Семейство» Agile включает в себя два наиболее популярных подхода, упрощенное описание которых можно рассмотреть следующим образом:

1. Kanban – подход непрерывного и сбалансированного развития:

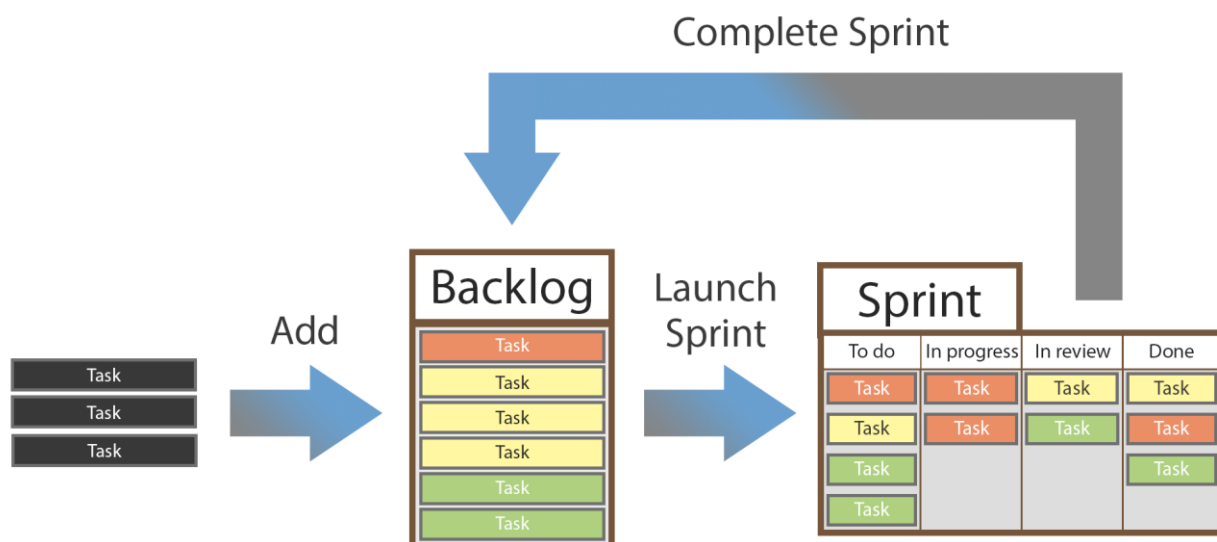
- Состав участников: команда разработчиков;
- описание процесса: при создании новые задачи перемещаются на доске в колонку «Todo». Бизнес-процесс построен на показателе эффективности: если задача выполнена быстро через этапы планировки, разработки, просмотра кода разработчиками, тестирования, завершения и т.д., то тогда считается, что команда успешно прошла все этапы, процесс идет в правильную сторону, если задача не выполняется быстро, то тогда считается, что команда должна выяснить причины задержек, чтобы найти способы решить их. Задачи выбираются в зависимости от приоритетов – если появилась новая задача более высокого приоритета, чем у текущих «Inprogress», то команда должна как можно скорее переключиться на эту новую задачу.

2. Scrum – структурированный подход:

- состав участников: команда разработчиков, владелец продукта, который способствует коммуникации между командой и заказчиком, участвует в развитии проекта, scrum-мастер,

который выстраивает бизнес-процесс (инициирует собрания, контролирует решение проблем, мотивирует команду);

- описание процесса: разработка делится на временные периоды – спринты. Их длительность обычно варьируется от 1 недели до месяца. Есть несколько способов оценки задач: во времени выполнения задачи и в условных единицах, которые определены на основе сложности задач (самая легкая задача – эквивалент 1 условной единицы). Перед началом спринта команда устраивает планирование, где определяет приблизительное время или условные единицы каждой новой задачи (при системе оценки временем разработчик оценивает свое теоретически необходимое ему время на задачу, условными единицами – команда оценивает в среднем, опираясь на каждого участника команды), после чего каждый разработчик набирает несколько задач на спринт, причем суммарное их время или число условных единиц не должно превышать время самого спринта или заранее оговоренное предельное число условных единиц. При создании новые задачи попадают в некий буфер, что называется «backlog». Его суть заключается в том, что задачи из буфера уже не могут попасть в текущий спринт, поскольку командой было выполнено планирование на спринт и выбрано определенное количество задач. Каждое новое планирование включает задачи из предыдущего спринта, которые были не завершены, их приоритет становится выше новых задач, выбранных из «backlog». Схема работы подхода отражена на рис. 2.



**Рисунок 2. Схематичное изображение работы Scrum**

Существует вариация, когда характерные особенности Kanban и Scrum подходов объединяют в комбинированную стратегию. Это способствует урегулированию резких перепадов по задачам: если появляется много новых задач с высоким приоритетом, то команда переходит на Kanban, если ситуация стабилизируется, то команда может перейти на Scrum для возможности грамотного планирования задач на короткий срок.

По опыту большинства команд разработчиков ни при одном из подходов на первых порах не получалось достигать максимального результата, поскольку команда не успевала приспособиться к рабочему процессу. С течением времени прогресс начинает расти, когда команда находит взаимопонимание между разработчиками, и когда каждый ее участник набирает компетенцию в области выполняемой разработки.

## Преимущества и недостатки использования Agile-методологии

Основной идеей Agile является отказ от письменной документации в пользу прямого общения с клиентом. Следовательно, сокращается время на формирование списка задач, который включает в себя описание требований, приоритеты по выполнению, а также время, которое может быть потрачено на работу и т.д. Впоследствии это может привести к уменьшению затрат на выяснение проблем и их разрешение. Отсутствие дополнительных барьеров позволит тем самым достичь грамотно выстроенного рабочего процесса и положительного эффекта, как для разработчиков, так и для клиента. Таким образом, методология предоставляет возможность быстрого запуска проекта и своевременной реакции на любые изменения в течение жизни продукта.

В то же время существуют ситуации, когда методология приводит к отрицательным результатам и даже серьезным убыткам. В определенный момент жизни проекта Agile может мотивировать разработчиков прибегать к неосновательным подходам и решениям, что в будущем, может приводить к значительной переработке кода. Зачастую разработчики пренебрегают вопросами тестирования продукта (например: юнит-тестирование, интеграционное тестирование) в пользу быстрой реализации. Не каждый менеджер способен корректно интерпретировать принципы методологии, чем может повлиять на развитие разрабатываемого продукта. Такие обстоятельства обесценивают все преимущества подхода.

Человеческий опыт и история развития IT-сферы подсказывают, что абсолютно универсальных решений не существует, людям свойственно воспринимать одну и ту же идею по-своему, а хорошую мысль подвергать критике. Положительные и негативные примеры из реальных проектов, где применялся Agile, расширяют знание о «хороших» и «плохих» случаях на конкретных примерах. Анализ таких результатов дает потенциал к качественному развитию команды и наращиванию так называемой экспертизы одновременно с разработкой ПО. Создаются приложения для автоматизации некоторых процессов. Компания Atlassian, например, предоставляет такие продукты [2], как Bitbucket (хостинг репозитория), JiraSoftware (система отслеживания ошибок), Confluence (единая вики-система). Перечисленные сервисы в совокупности образуют единую платформу, которая потенциально позволяет оптимизировать рабочий процесс команды, при этом необязательно использовать все сразу. Но данные продукты имеют и ряд недостатков:

- цена для российского потребителя является достаточно высокой (для команд, где более 10 разработчиков, ориентация на enterprise-разработку);
- первичная настройка платформы и последующая поддержка работоспособности требует определенных умений и знаний, из чего следует, что потребуется персонал для технической поддержки платформы;
- деградация платформы при росте количества проектов, а также при высокой активности пользователей на единицу времени;
- расширение функциональности возможно с помощью плагинов, цена которых может быть также достаточно высокой, а их интеграция происходит на уровне определенного сервиса, но не всей платформы, что со временем может добавить ограничений как с производительностью, так и с невозможностью более качественного развития инструмента.

Продукты компании Atlassian на данный момент времени оправданно заслуживают особого внимания со стороны IT-сообщества, но эти решения не являются идеальными из-за наличия ряда нюансов.

Не менее популярными аналогами являются решения компаний GitLab [3] и GitHub [4]. Несмотря на то, что эти компании не имеют отношения друг к другу, идеологический подход к ведению проекта и набор инструментов у них очень схожи. Стабильность работы у обоих

вариантов выше, чем у продуктов компании Atlassian. Изначально сервисы позиционируются как хостинги репозитория. Инструменты, такие как системы отслеживания ошибок и вики-системы, прямо интегрированы в платформы, но их можно включить или отключить по желанию, что не приводит к особым накладкам. Доступ к внешним сервисам может осуществляться посредством HTTPAPI и webhooks. Приятным фактом является наличие адекватно сформированной тарифной линейки, которая более понятна российскому потребителю. К недостаткам можно отнести следующее:

- простая система отслеживания ошибок по сравнению с JiraSoftware, позволяющая максимально гибко работать с описанием заявки;
- GitHub более ориентирован на opensource разработку, что практически не требует затрат, GitLab предлагает воспользоваться enterprise решением, которое имеет значительно более развитый функционал по сравнению с opensource решением;
- GitHub – удаленный хостинг репозитория, в котором отсутствует версия для локального хранения, в отличие от GitLab.

Еще одним примером является компания JetBrains, которая в начале декабря 2019 представила сервис под названием Spase, включающий все тот же набор инструментов (как ожидается после официального запуска продукта) [5]. Компания заявляет, что посредством HTTPAPI, webhooks или ClientSDK можно интегрироваться с внешними системами, что можно также положительно оценить. Тарифы сформированы также адекватно. Так как данную платформу пока можно попробовать по открытой программе раннего доступа к сервису, оценить потенциал в полную силу не представляется возможным. Из недостатков выделить что-то объективное сложно, ожидания невероятно высоки, но стоит отметить, что:

- вики-система еще не включена в сервис на ранних стадиях, хотя и ожидается в ближайших релизах;
- по статистике первые официальные релизы страдают своей нестабильностью, из-за чего этот сервис пока не может рассматриваться как полноценное решение на текущий момент;
- почти все решения платформы реализованы на языке Kotlin, который был также спроектирован компанией JetBrains, что может наложить ряд ограничений со временем при использовании сервиса.

В дополнение к описанным решениям стоит добавить, что инструменты для ведения проектов по Agile-методологии крайне востребованы. Крупные компании нередко создают собственные проприетарные системы для создания слаженной внутренней экосистемы разработки, а это значит, что в данном вопросе еще есть большой потенциал к дальнейшему развитию рынка. Существует мнение, что Agile пришел из области деятельности, в которой априори подразумевается повседневное общение с клиентами, при этом считается, что программисты не способны вести диалог с заказчиками из-за желания иметь явные требования для реализации задачи, поэтому Agile не может применяться продуктивно, как того ожидается. Данное утверждение небезосновательно, но суть методологии в гибком подходе к разработке, соответственно, команда не ограничена в своих возможностях, в том числе и способах организации ведения реализации продукта. Член команды проекта — хоть рабочая единица, но важный «механизм» этой системы, его роль определяется как командой, так и управляющим персоналом. Каким образом его потенциал будет использоваться, в конечном счете, зависит только от самой команды, а не от методологии.



## Заключение

В данной работе рассмотрены описания трех подходов Agile-методологии в рамках разработки программного обеспечения (Kanban, Scrum и их комбинация), сформулирована главная цель, которая достигается за счет практического применения методологии, плюсы и минусы «семейства» гибких подходов в целом, а также показана возможность применения ряда положений методологии с помощью инструментов для разработчиков программного обеспечения на примере решений компаний Atlassian, GitHub, GitLab и JetBrains.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-20720.*

## Библиографический список

1. Бек, К. Agile-манифест разработки программного обеспечения [Электронный ресурс] // The Agile Manifest for Software Development. URL: <https://agilemanifesto.org/iso/ru/manifesto.html> (дата обращения: 01.02.2020).
2. Atlassian. Products for teams, from startup to enterprise [Электронный ресурс] // Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/software> (дата обращения: 03.02.2020).
3. GitLab. The entire DevOps lifecycle in one application [Электронный ресурс] // GitLab. URL: <https://about.gitlab.com/stages-devops-lifecycle> (дата обращения: 03.02.2020).
4. GitHub, Inc. Git Hubishow peoplebuild software [Электронный ресурс] // GitHub. URL: <https://github.com/about> (дата обращения: 03.02.2020).
5. JetBrains. Space: The integrated team environment [Электронный ресурс] // JetBrains. URL: <https://www.jetbrains.com/space/> (дата обращения: 03.02.2020).

**R.S. Mashenkin, M.A. Stepanenko**

## AGILE-METHODOLOGY IS AS A PART OF MODERN LIFE OF SOFTWARE DEVELOPMENT

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The descriptions of the several approaches of Agile-methodology were investigated. The main purpose which may be achieved through the methodology was defined. The possibility of applying a number of the methodology points using special tools for software developers was demonstrated.

**Keywords:** software, workflow, tasks, Agile-methodology, approaches to methodology, Kanban, Scrum.

О.П. Тимофеева, М.М. Гордеев, А.Н. Райцын, А.А. Дмитриев,  
А.Д. Тряскова, М.Б. Багиров

## ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПОИСКА ТОВАРОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается задача обработки больших данных, принадлежащих к сфере товаров, предлагающихся интернет-магазинами по продаже одежды. Описывается процесс создания приложения для поиска интересующего товара по изображению с использованием алгоритмов глубокого обучения и кластеризации на основе результатов анализа собранных и прошедших векторизацию данных.

**Ключевые слова:** большие данные, поиск товара по фотографии, система агрегирования, задача кластеризации, нейронная сеть векторизации данных.

### Введение

Одним из стремительно развивающихся направлений информационных технологий являются большие данные (BigData). Интерес к большим данным обусловлен высоким темпом увеличения степени встраиваемости средств информационных технологий в различные сферы современного общества. В связи с этим повышаются требования к применимости информационных технологий для выполнения новых, и новых задач, в том числе задач, предполагающих огромные объемы данных. Использование, а точнее обработка, больших данных в настоящее время применяется в различных прикладных областях: военной отрасли, в банковском деле, в торговле, в сфере коммуникаций, страховании и пр.

Данная работа посвящена обработке больших данных в сфере организации торговли в сети интернет. В настоящее время существует ряд возможных способов построения систем поиска товаров, которые требуют разработки новых алгоритмов, специфических для этого класса систем. В работе предлагается организация поиска товара в интернет-магазинах по изображению, полученному с фотокамеры телефона.

Реализация системы поиска товаров по изображению выполнена в виде Android – приложения, которое позволило установить работоспособность системы и оценить точность полученного решения.

### Постановка задачи

Задачи поиска товара по изображению включает в себя следующие этапы (рис.1):

- 1) сбор больших данных с интернет-магазинов в общую базу данных;
- 2) обработка данных, поступивших на вход системы, с целью унификации;
- 3) обучение нейронной сети с целью выделения признаков на изображении;
- 4) кластеризация данных;
- 5) формирование системы поиска товаров.



Рисунок 1. Общая схема решения задачи

### Сбор и обработка больших данных

Для реализации системы поиска товаров на первом этапе необходимо осуществить сбор данных с интернет-магазинов. Несмотря на то, что система строится только для поиска товаров, являющихся предметами одежды, количество данных в сети огромно, в связи с этим в работе используются технологии так называемых больших данных.

Большими данными называются плохо структурированные данные больших объемов, эффективно обрабатываемые горизонтально масштабируемыми программными инструментами. Основные отличия больших данных от традиционных баз данных представлены в таблице.

Сравнение традиционной БД и БД больших данных

Признак	Традиционная БД	База больших данных
Структурированность данных	Структурирована	Плохо структурирована
Взаимосвязь данных	Сильная	Слабая
Модель хранения данных	Вертикальная	Горизонтальная

Сбор информации о товарах, в том числе их фотографий, осуществлялся с web-сайтов магазинов Cropp, Wildberries, Lamoda. Для его реализации была применена техника парсинга map/reduce с учетом ограничений сервера, в том числе блокировок.

Для дальнейшего использования собранные данные следует предварительно обработать. Необходимость в этом возникает в связи с тем, что один и тот же товар в различных магазинах может иметь разное наименование. Например, «Костюм спортивный SPORTSWEAR-TRACKSUIT» мог быть найден как «Спорт костюм Nike SPORTSWEAR» или «Костюм спортивный SPORTSWEAR Nike for girls». Среди наиболее часто встречающихся различий в наименованиях товаров можно выделить:

- пропуск качественных прилагательных;
- различие регистров отдельных слов;
- наличие прописных букв в названии;
- транслитерация (одно и то же слово может быть транслитерировано по-разному).

Для унификации наименований товаров, из данных были удалены знаки препинания. Чтобы установить правильную связь слов в наименовании и избежать возникновения дополнительных ошибок, было принято решение не применять лемматизацию слов и приведение к единому регистру. Для дальнейшей обработки применялся алгоритм, который на основании синтагматических отношений находил семантическую близость наименований по порогу, заданному вручную (0,8 – 0,85). Причем, чем ниже выставлялся порог, тем больше слова не коррелировали друг с другом. После этого производилось сопоставление единообразных на-

именований, в процессе которого из названий удалялись неинформативные слова, сокращения были приведены к полной форме, производилось приведение имен собственных к стандартному виду – строчная буква заменялась на прописную. Оставшиеся данные подвергались ручной обработке.

Товары с единообразными названиями заносились в базу данных как один и тот же товар, при этом сохранялась информация о магазинах, в котором данный товар можно купить и информация о его стоимости.

### Выделение признаков товара на изображении

Целью данного этапа работы являлась разработка алгоритма глубокого обучения для выделения признаков товара и его векторизации на их основе. Векторизация данных выполняется с помощью искусственной нейронной сети.

В качестве исходных данных используются данные о товарах, собранные из интернет-магазинов. Так как поиск предполагается проводить по фотографиям, то под данными в рамках рассматриваемой задачи будем подразумевать изображения товаров. Для осуществления кластеризации необходимо выделить ряд признаков и поставить в соответствие каждому изображению точку в  $n$ -мерном пространстве, где  $n$  – количество выделяемых признаков. В качестве признаков можно рассматривать разные характеристики товара, например, цвет, фактуру и т.п. Тогда, если выбранные признаки достаточно репрезентативны и инвариантны относительно множества всех возможных изображений данного товара, то используя заданный классификатор можно находить товары, наиболее схожие к фотографии, поданной на вход системы.

В целях экономии вычислительных и временных ресурсов для обучения нейронной сети применялась технология Transfer Learning [1], которая позволяет использовать опыт, накопленный при решении одной задачи, для решения другой, что становится возможным за счет применения в качестве основы предварительно обученной нейронной сети. В качестве исходной предобученной сети было решено использовать сверточную нейронную сеть ResNet-50[3], обученную на наборе данных ImageNet. На вход сети подаются цветные изображения товара размером 224x224 пикселя. На выходе сети получаем вектор признаков из 512 значений от 0 до 1, которые отражают вероятность присутствия соответствующего признака на входном изображении.

Для Transfer Learning обучения использовался свободно распространяемый набор данных Deep Fashion v1, содержащий около 200 000 фотографий одежды с информацией о ее категориях и признаках. Сеть была реализована на Python 3 с использованием библиотеки PyTorch.

В качестве функции потерь в работе использовалась сумма значений бинарной кросс энтропии для каждого выхода (1), т.к. в данном случае происходит multi-label классификация, то есть каждый выход определяет вероятность того, что рассматриваемый объект обладает соответствующим признаком, при этом каждый объект может обладать более, чем одним признаком.

$$Loss = -(y_i \log(q_i) + (1 - y_i) \log(1 - q_i)), \quad (1)$$

где  $y_i$  –  $i$ -я составляющая вектора размерности  $N$ , полученного на выходе нейронной сети;  $q_i$  –  $i$ -я составляющая вектора размерности  $N$  истинных выходных значений,  $i$  – номер выхода.

Обучение происходило на протяжении 53 эпох. В результате была получена обученная нейронная сеть для выделения вектора признаков одежды по изображению, подаваемому на

вход сети. Оценка качества работы алгоритма выделения признаков – точность – рассчитывалась на основе расстояния Хэмминга (2) и составила 67 %.

$$Hamming Loss = \frac{\sum_{j=1}^{len(data)} \sum_{i=1}^N XOR(y_i^j, q_i^j)}{|N| * |len(data)|}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество признаков,  $len(data)$  – размер тестовой выборки,  $i$  – номер выхода,  $j$  – номер составляющей вектора признаков.

### Кластеризация данных

Для реализации классификации товара в работе использовалась технология кластеризации на основе алгоритма  $k$ -средних.

Векторизованные на предыдущем этапе данные были разбиты на 50 кластеров.

В основе  $k$ -средних лежит суммарное квадратичное отклонение центров масс кластера от точек (3):

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} (x - \mu_i)^2, \quad (3)$$

где  $k$  – количество кластеров,  $S_i$  –  $i$ -й кластер,  $x$  – точка кластера,  $\mu_i$  – центр масс  $i$ -го кластера.

Алгоритм  $k$ -средних итеративно стремится минимизировать данную функцию, для этого на каждом шаге выбирается среднее между всеми точками кластера, куда помещается центр масс. На следующем шаге все точки поровну делятся между кластерами и снова пересчитываются центры. На некотором конечном шаге суммарное квадратичное отклонение центров масс кластеров перестанет изменяться, что будет означать, что кластеры сформированы [2].

Кластеры позволяют не рассчитывать расстояния от точки, представляющей товар, поданный на вход системы до всех остальных точек, представляющих товары в нашей БД в пространстве признаков, а работать лишь в рамках одного кластера.

### Построение системы поиска товаров по фотографии

На основе полученного набора кластеров и сети для выделения признаков была разработана система поиска товаров в базе данных по изображению. Пользователь на вход системы подает фотографию некоторого предмета одежды, система векторизует (выделяя признаки) фотографию и по евклидовому расстоянию между полученной точкой в пространстве признаков и координатами центров кластеров выбирает наиболее близкий кластер. Внутри кластера система находит 5 наиболее похожих фотографий одежды (по евклидовому расстоянию) и выдает на выходе их изображения, цены, описание и ссылки на магазин, где можно приобрести соответствующие товары (каждая фотография в кластере связана с записью в БД).

Стоит так же учитывать, что на вход системы могут быть поданы фотографии, на которых содержатся сразу несколько товаров. В этом случае для отделения одного товара от другого была использована предобученная нейронная сеть YOLO [4] (обучалась на том же наборе данных DeepFashion), которая на выходе выдает координаты прямоугольников, содержащих изображения одежды, расположенные в разных частях фотографии (например, в верхней и нижней). Каждое из этих изображений поочередно поступает на вход системы поиска.

На рис. 2 показан пример поиска товара «худи» по базе данных. Модуль показателя *Score* указывает на близость между двумя изображениями товара – оригинальным (подаваемым на вход сети) и изображением из базы данных. Как видно, в качестве наиболее схожего варианта (имеет наименьший модуль показателя *Score*) сеть выдала фотографию того же самого товара, остальные выбранные товары также принадлежат к классу «худи».

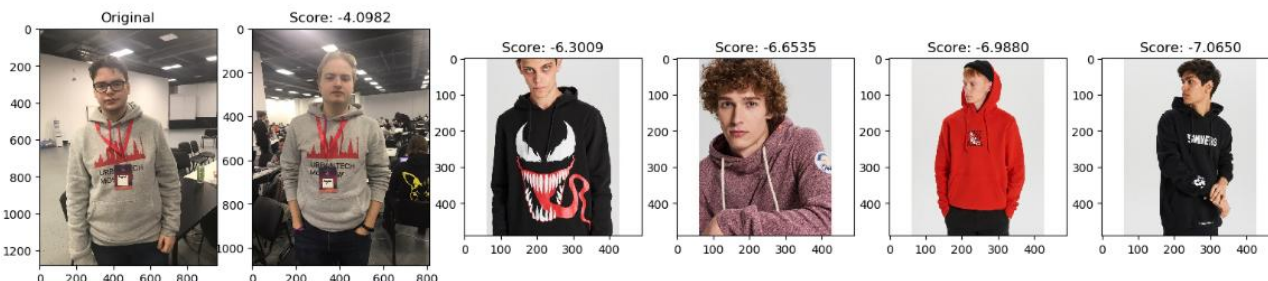


Рисунок 2. Пример поиска схожих товаров по изображению

### Практическая реализация

На основе разработанных подходов было реализовано приложение для операционной системы Android, позволяющее пользователю загружать фотографии одежды и делать поиск похожих товаров по базе данных, находя наилучшие соответствия. В качестве результата работы программа выдает список магазинов, в которых данный товар можно приобрести. Пример работы программы представлен на рис. 3.

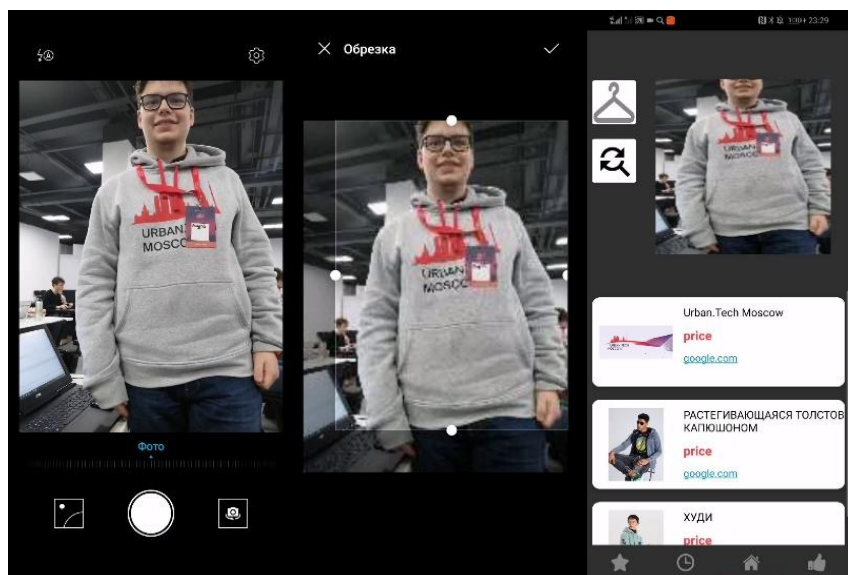


Рисунок 3. Пример работы Android-приложения

### Выводы

Таким образом, к настоящему времени разработана система, позволяющая находить наиболее похожий товар в интернет-магазине по загруженному изображению. Система реализована в виде Android-приложения. В качестве исходной предобученной сети использовалась сверточная нейронная сеть ResNet-50, обученная на наборе данных ImageNet. Для Transfer

Learning обучения применялся набор данных DeepFashion1, содержащий около 200 000 фотографий одежды с информацией о ее категориях и признаках. Поиск товара с изображения осуществлялся в интернет-магазинах Cropp, Wildberries, Lamoda. Точность работы алгоритма выделения признаков товара на изображении составила 67%. В качестве одного из направлений дальнейшей работы планируется улучшение данного показателя.

Кроме того, одним из направлений работы будет создание рекомендательной системы товаров, где после загрузки изображения, помимо наиболее подходящей вещи, пользователю будут предлагаться предметы, которые часто покупают в дополнение к выбранной вещи и те, которые будут сочетаться с ней.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

### **Библиографический список**

1. Jason Brownlee. A Gentle Introduction to Transfer Learning for Deep Learning // machine-learningmastery.com URL: <https://machinelearningmastery.com/transfer-learning-for-deep-learning/> (датаобращения: 14.11.2019).
2. Michael Grabade. Understanding K-means Clustering in Machine Learning // TowardsDataScienceURL: <https://towardsdatascience.com/understanding-k-means-clustering-in-machine-learning-6a6e67336aa1> (датаобращения: 21.11.2019)
3. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun Deep Residual Learning for Image Recognition // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016.
4. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016.

**O.P. Timofeeva, M.M. Gordeev, A.N. Raitsin, A.A. Dmitriev,  
A.D. Tryaskova, M.B. Bagirov**

### **CREATION OF PRODUCT SEARCH SYSTEM BY IMAGE BASED ON BIG DATA PROCESSING**

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva

In present work, the task of big data processing is considered. The big data in the current paper belong to the field of goods offered by online shops, which is selling clothes. Also, there is described the process of application creation which is aimed to search user thing by its image. To achieve this goal deep learning algorithms and clustering based on results of collected and vectorized data analysis are used.

**Keywords:** Big data, product search by image, aggregation system, clustering task, neural network data vectorization.

П.А. Шагалова, А.Д. Ерофеева, Ю.С. Чистякова, Э.С. Соколова

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА И АНАЛИЗА ОБЪЕКТОВ НА БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Исследовано применение алгоритмов поиска объектов на биомедицинских изображениях. Разработано программное обеспечение для распознавания объектов на медицинских изображениях, позволяющее выполнить поиск объектов и рассчитать для них численные параметры.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, разработка программного обеспечения, биомедицинские изображения

### Введение

Поиск объектов на биомедицинских изображениях является сложной задачей, решение которой играет важную роль при разработке медицинского оборудования и программного обеспечения для анализа медицинских снимков. В данной работе рассмотрены алгоритмы поиска объектов и разработано программное обеспечение с пользовательским интерфейсом для распознавания и обработки объектов на медицинских изображениях.

### Разработка программного обеспечения для поиска объектов на биомедицинских изображениях

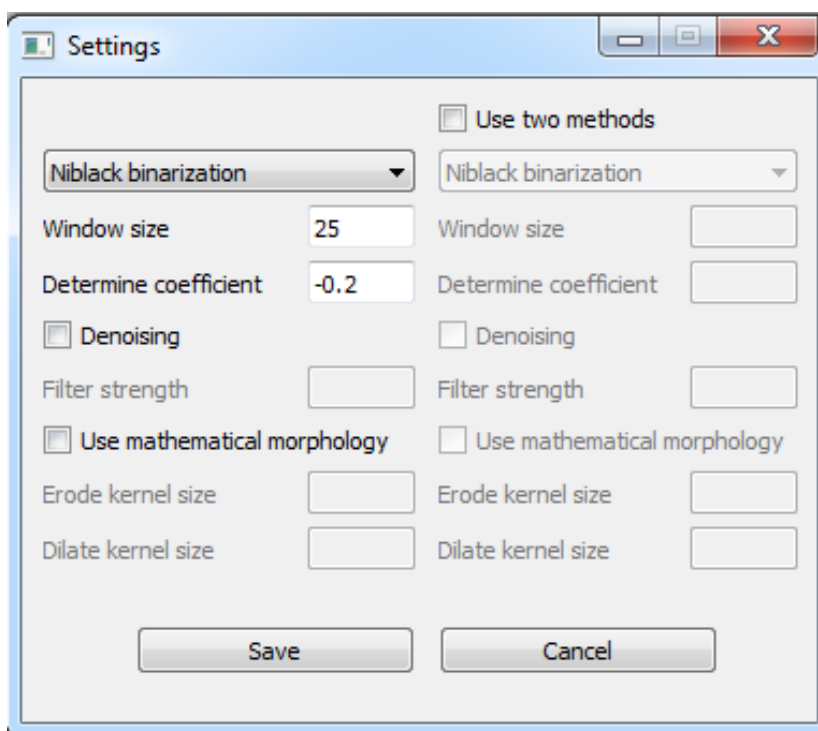
Входными изображениями, используемыми в данном исследовании, являются снимки, полученные с устройства для деформации эритроцитов [1], а искомыми объектами – деформированные эритроциты. Для поиска объектов интереса выполнены предобработка изображения, бинаризация изображения, поиск и аппроксимация эллипсом контуров объектов, полученных в результате бинаризации. При реализации решения была использована библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Параметры для каждого метода были подобраны эмпирически.

В результате проведенного исследования было выяснено, что для устранения шума на исследуемых изображениях наиболее эффективно использовать методы математической морфологии [2]: наращивание и эрозию. Применение сначала эрозии, а затем наращивания позволяет отсеять все объекты, меньшие по размеру, чем ядро операции, и помогает избежать сильного уменьшения размера объектов.

Для бинаризации изображения [3] в ходе работы были реализованы и апробированы алгоритм Ниблэка, алгоритм Оцу, алгоритм Бернсена и алгоритм Зака. Каждый из этих алгоритмов имеет сильные и слабые стороны, и в графическом интерфейсе приложения есть возможность выбрать нужный метод для обработки изображения. На рис. 1 представлено окно настроек параметров разработанной программы. Кроме выбора алгоритма бинаризации есть



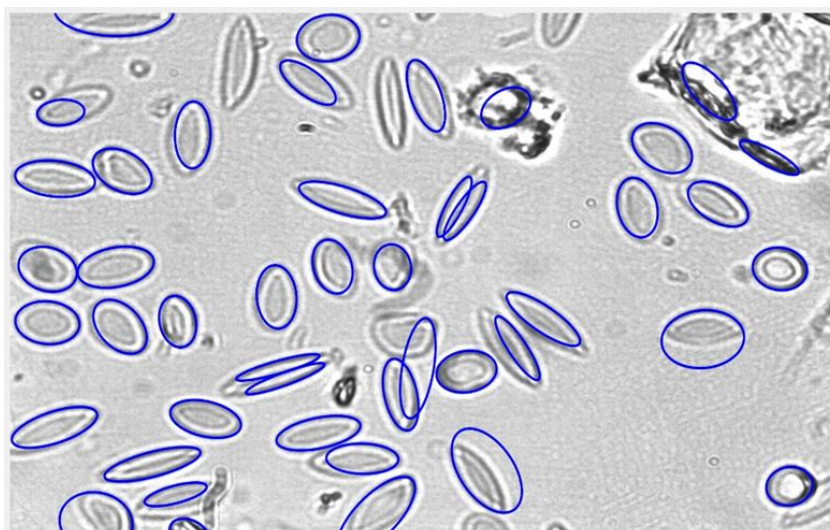
возможность выбрать алгоритм шумоподавления, а также использовать совместно два алгоритма бинаризации.



**Рисунок 1. Окно выбора алгоритма и настройки параметров**

После бинаризации выполняется поиск контуров объектов на изображении. Для поиска использовалась функция Open CV find Contours, которая извлекает контуры из бинаризованного изображения.

Для аппроксимации каждого из контуров найденных объектов эллипсом использовалась функция Open CV fit Ellipse. Следует отметить, что функция fit Ellipse может быть использована только для тех контуров, которые содержат минимум 5 точек (это ограничение накладывает метод наименьших квадратов, реализованный в данной функции). Пример работы программы на этом шаге представлен на рис.2.



**Рисунок 2. Результат поиска объектов на изображении**

После того, как искомые объекты были найдены, производится обработка полученных данных. Основной рассчитываемой величиной при этом является коэффициент деформируемости – метрика, рассчитываемая для каждого найденного объекта как отношение большой оси эллипса к малой. Кроме того, реализованная программа рассчитывает такие метрики, как среднее значение коэффициента деформируемости, дисперсия и коэффициент асимметрии для всего пула объектов на изображении. На рис. 3 можно видеть, что рассчитанные значения коэффициентов деформируемости эритроцитов выводятся прямо на исходном изображении в главном окне программы (около соответствующих эритроцитов), а среднее значение, дисперсия и коэффициент асимметрии выводятся в окне вывода графика распределения эритроцитов по деформируемости.

Для реализации данного проекта был выбран язык программирования C++, среда разработки QtCreator, библиотека QCustomPlot, система контроля версий git и OpenCV.

Программа содержит два основных класса:

- Класс `Binarization` содержит четыре метода бинаризации и один вспомогательный метод для зеркального отображения краев изображения.
- Класс `Ellipse Approximation` содержит методы для поиска контуров объектов, аппроксимации их эллипсами, удаления повторяющихся эллипсов и отрисовки полученных эллипсов на изображении.

Также программа имеет три формы и три связанных с ними класса:

- Форма `mainwindow` представляет главное окно приложения. На ней есть кнопки для загрузки изображения, смены настроек, кнопка для поиска объектов и кнопка для вывода гистограммы. Также она имеет поле для вывода загруженного изображения, в котором после процедуры поиска объектов будут отображены результаты.
- Форма `settings` содержит поля для ввода различных пользовательских настроек, таких, как количество методов бинаризации, их тип, включение и отключение шумоподавления, сила шумоподавления, включение и отключение методов эрозии дилатации и размер ядра для каждого из них.
- Форма `histogram` имеет поля для вывода гистограммы и соответствующих данных по ней.

Разработанная программа предоставляет пользователю возможность загрузить изображение и выбрать подходящие настройки для его обработки, либо воспользоваться настройками по умолчанию. После выбора изображения и необходимых настроек происходит поиск объектов на изображении. Результат распознавания в виде контуров найденных объектов рисуется поверх исходного изображения. Также пользователь имеет возможность построить гистограмму по данным, полученным после распознавания объектов на изображении. Пример работы программы представлен на рис. 3.

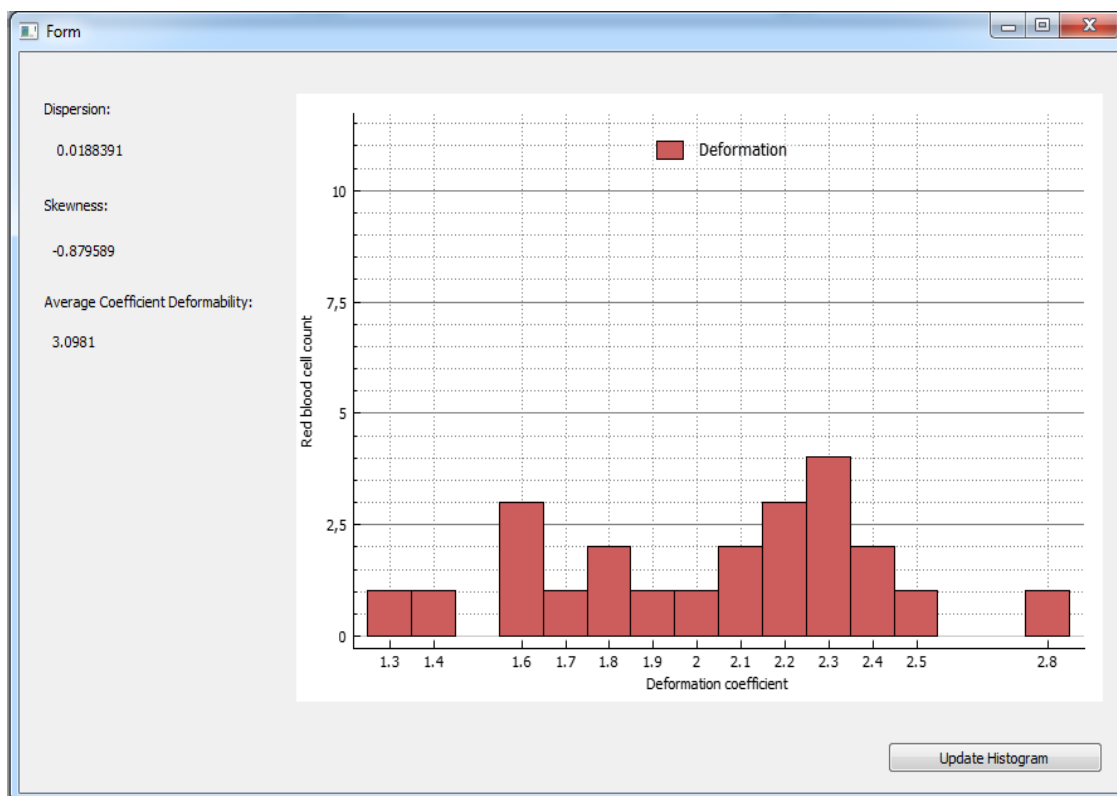
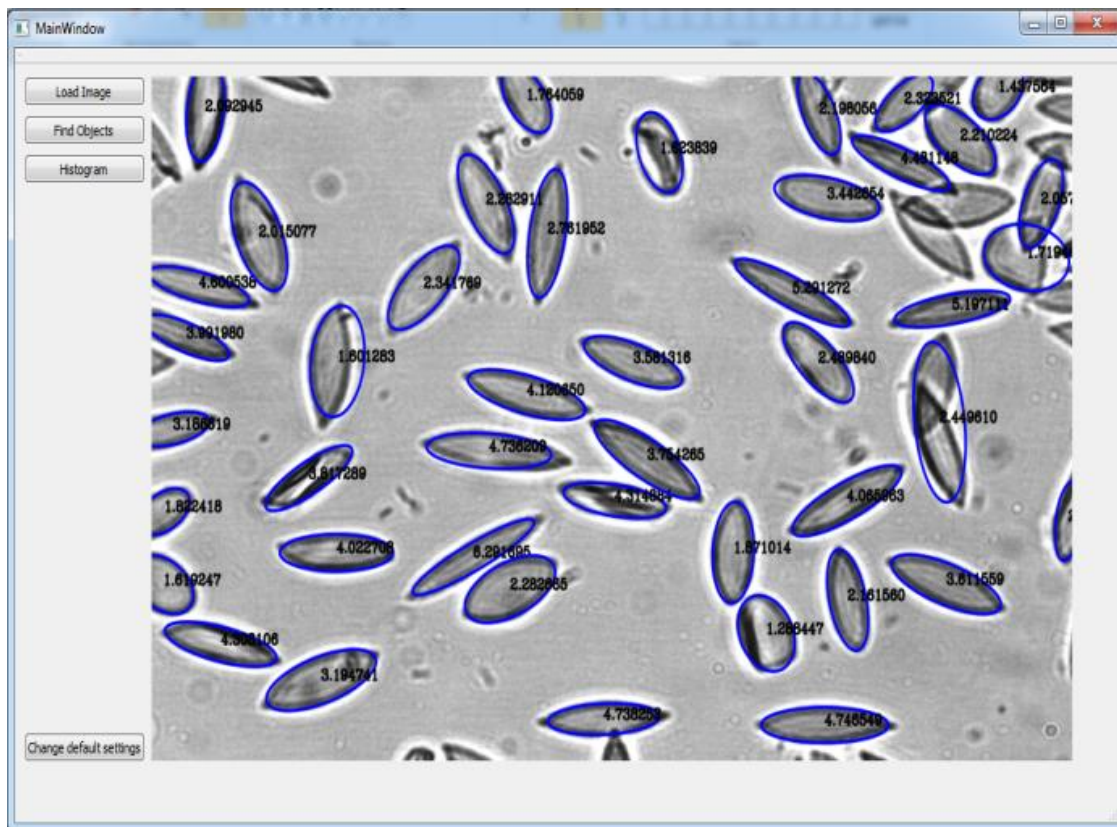


Рисунок 3. Результат работы программы

### Выводы

В рамках работы была реализована автоматизированная система распознавания объектов на медицинских изображениях с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Произведена

обработка полученных результатов, рассчитаны численные параметры для найденных объектов. Разработанный графический интерфейс позволяет наглядно представить полученные результаты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-00543.*

### **Библиографический список**

1. А. С. № 1363065 россия, мки j01n 33/14. устройство для деформации эритроцитов в сдвиговом потоке / Левин Г.Я., Яхно В.Г., Царевский Н.Н., Котяева Н.П.; опубл. 30.12.1987. бюл. № 48 (заявка № 3954988/28-14 от 16.09.1085).
2. Prince S.J.D. Computer vision: models, learning, and inference. Cambridgeuniversitypress. 2012. p. 598
3. Forsyth D.A, Ponce J. Computer vision: a modern approach (2nd edition).2011. p. 800

**A.D. Erofeeva, Y. S. Chistyakova, P.A. Shagalova, E.S.Sokolova**

### **AUTOMATION OF SEARCH AND ANALYSIS OF OBJECTS ON BIOMEDICAL IMAGES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseeva

The problem of the using of object detection algorithms for biomedical image analysis is concerned here. Objects recognition software was developed, which allows detecting objects in biomedical images and calculating the parameters for the found objects.

**Keywords:** computer vision, software development, biomedical images

П.А. Шагалова, А.Ю. Захарова, В.С. Коротаев, Э.С. Соколова

## АНАЛИЗ СЕРИИ МЕДИЦИНСКИХ СНИМКОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

В работе рассматривается предобработка и выделение значимых объектов на серии медицинских снимков. Проведены исследования в области выбора метода бинаризации для обработки снимков, разработаны алгоритмы для расчета оптимальных параметров методов, реализован графический интерфейс пользователя для выполнения исследований.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, бинаризация, микроскопия.

### Введение

С активным развитием информационных технологий и алгоритмов компьютерного зрения появилась возможность автоматизировать процесс обработки медицинских снимков. Автоматизация процесса анализа медицинских изображений позволит значительно уменьшить время выявления патологических состояний, а также повышается точность, достоверность и надежность постановки медицинского диагноза.

### Исследование применения алгоритмов компьютерного зрения для анализа медицинских снимков

В данной работе в качестве входных данных были использованы серии медицинских снимков, полученных с агрегометра [1]. На данных снимках представлен процесс агрегации тромбоцитов, то есть процесс склеивания тромбоцитов между собой. На каждом снимке можно наблюдать темные пятна (агрегаты) на светлом поле (поле зрения микроскопа). Пример входного изображения для применения алгоритмов компьютерного зрения представлен на рис.1, а.

Поставим задачу обработки снимков с целью нахождения на снимках агрегатов, расчета их количества, общей площади всех агрегатов, а также определения их плотности для постановки медицинских диагнозов.

Для проведения экспериментальной части и разработки прототипа программы анализа снимков был выбран высокоуровневый язык и среда разработки и моделирования MatLab, разработка программного обеспечения была выполнена на языке C++ с использованием библиотек OpenCV и QCustomPlot.

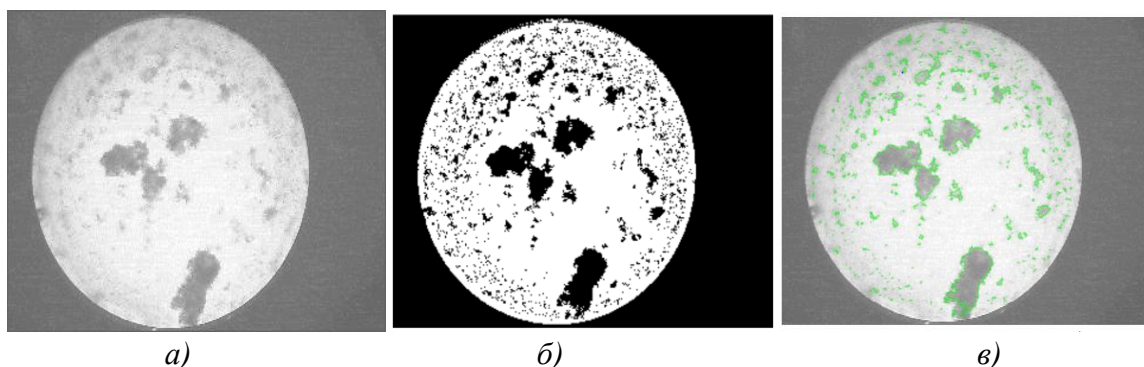
Для поиска агрегатов необходимо выполнить следующие этапы: предобработка изображения для снижения уровня шума, бинаризация изображения для поиска объектов интереса, поиск контуров объектов, полученных в результате бинаризации (для дальнейшей обработки и представления полученных результатов).

В результате проведенного исследования определено, что для предобработки входных изображений наилучшим образом подходит медианный фильтр, для реализации которого использована функция «medfilt2» в среде MatLab. В результате настройки медианного

фильтра получено, что наилучший результат достигается при двукратном применении фильтра, с различным последовательным значением «окон» – 0,55 и 0,08.

Основным этапом обработки изображения, от которого в большей степени зависит результат распознавания объектов, является бинаризация. Бинаризация представляет собой процесс перехода от цветного изображения к двухцветному черно-белому изображению. В процессе исследований различных алгоритмов бинаризации для решения поставленной задачи был выбран алгоритм Брэдли [2], в котором выбор черного или белого цвета пикселя зависит от величины назначенного порога  $t$  и размера окна. Было определено, что бинаризация с большим значением размера окна позволяет лучше найти крупные агрегаты, а бинаризация с малыми значениями окна позволяет выделить мелкие агрегаты. В этой связи принято решение бинаризации изображения два раза – первый раз с окном, равным  $15 \times 15$  пикселей, второй раз – с окном  $50 \times 50$  пикселей. После этого для первого и второго полученных бинаризованных изображений была выполнена конъюнкция значений пикселей, и, таким образом, получено результирующее бинаризованное изображение. Значение порога  $t$  при этом было выбрано равным 6%. Результирующий пример бинаризованного изображения представлен на рис. 1, б).

Далее решается задача поиска по бинаризованному изображению контуров всех агрегатов. Для нахождения контуров таких объектов предложено использовать встроенную функцию MatLab – «`bwboundaries`». Пример выделения контуров найденных объектов на изображении представлен на рис. 1, в).



**Рисунок 1. а) пример входного изображения; б) результат бинаризации; в) пример выделения контуров найденных объектов**

По полученным результатам можно рассчитать искомые параметры: количество объектов на снимке, суммарную площадь всех агрегатов, средневзвешенную плотность всех агрегатов. При этом площадь одного агрегата рассчитывается как количество пикселей, которые занимает на изображении этот агрегат, а плотность одного агрегата рассчитывается как среднее значение яркости пикселей этого агрегата. Для наглядного представления динамики изменения рассчитываемых величин построены графики зависимости рассчитанных параметров от времени (серия полученных снимков была обработана в хронологическом порядке).

После разработки прототипа программы в MatLab была разработана программа на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV. Интерфейс пользователя для проведения исследований разработан с использованием фреймворка Qt [3] с использованием IDE Qt Creator. Следует отметить, что время работы программы, реализованной на языке C++, значительно уменьшилось при обработке серии снимков по сравнению с временем работы прототипа, написанного на языке Matlab.



Разработанная программа имеет понятный графический интерфейс пользователя. Окно программы (рис. 2) содержит четыре кнопки: кнопка загрузки обрабатываемых изображений, кнопка запуска обработки всех загруженных изображений, кнопка вывода графиков зависимости рассчитанных параметров от времени и кнопка выхода из приложения. Также в основном окне программы находятся: поле вывода текущего изображения, текстовые поля, в которых выводятся значения параметров, рассчитанных для текущего изображения, кнопки перемещения между изображениями. Графики выводятся в отдельном окне (рис. 3). Все результаты по всем снимкам записываются в электронную таблицу формата xls.

При написании кода был выбран объектно-ориентированный подход. Программа содержит два основных класса: класс Image - реализует основную логику программы, класс Object - реализует обработку отдельного агрегата. Графический интерфейс пользователя представлен двумя формами и соответствующими классами (форма MainWindow и форма graphs ).

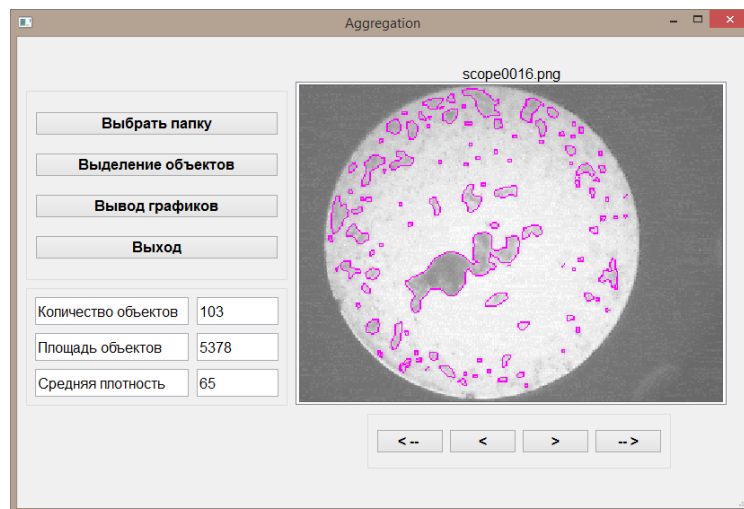


Рисунок 2. Графический интерфейс программы

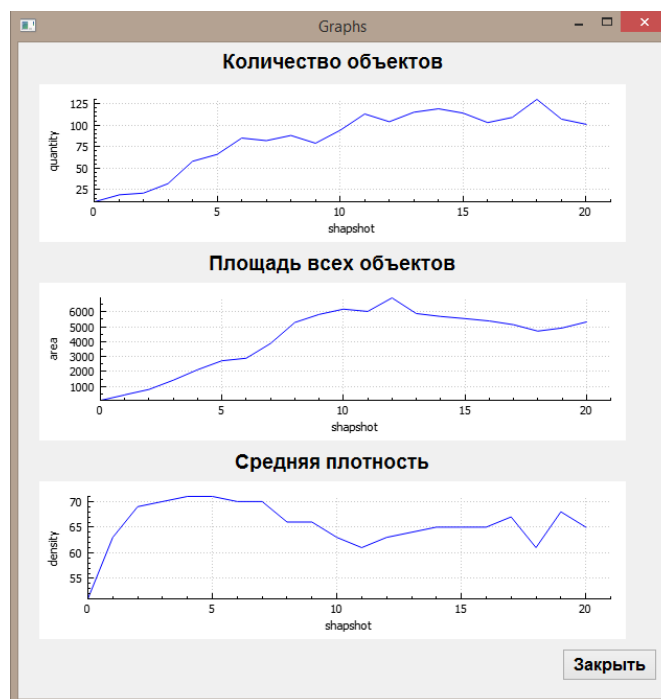


Рисунок 3. Динамика изменения рассчитываемых параметров на серии снимков

## Выводы

В ходе проделанной работы изучены особенности применения алгоритмов компьютерного зрения для обработки медицинских изображений. Исследовано использование алгоритмов предобработки и бинаризации изображений для поиска объектов. Подобраны параметры алгоритмов предобработки и бинаризации, используемых при решении задачи исследования агрегаций тромбоцитов. Разработан программный продукт, который реализует поиск объектов на медицинских снимках, обрабатывает и наглядно отображает и сохраняет полученные результаты, а также включает удобный графический интерфейс пользователя для проведения исследований медицинских изображений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. Пат. 2278381 Рос. Федерация : МПК G 01N 33/48. Устройство для исследования агрегации тромбоцитов / Левин Г.Я., Модин А.П., Кудрицкий С.Ю., Соснина Л.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное учреждение "Нижегородский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии Министерства здравоохранения Российской Федерации", заявл. 11.01.2005; опубл. 20.06.2006, Бюл. № 17
2. **Bradley, D., G.** Roth Adapting Thresholding Using the Integral Image. *Journal of Graphics Tools*. 2007. №2(12). P. 13–21
3. **Шлее, М.** Qt 4.8 Профессиональное программирование на C++. — СПб.: «БХВ-Петербург», 2012. - с.912

**Shagalova P.A, Zakharova A.Y, Korotaev V.S., E.S.Sokolova**

## **ANALYSIS OF A SERIES OF MEDICAL PICTURES USING COMPUTER VISION ALGORITHMS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva

This article covers the preprocessing and detecting of significant objects in a series of medical images. The experiments were carried out to definition of the binarization algorithm, calculating the parameters, as well as graphical user interface development.

**Keywords:** computer vision, binarization, microscopy.



Д.С. Шibaев, В.В. Вычужанин, Н.О. Шibaева

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАННЫХ СЕТЕВОГО ТРАФИКА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одесский национальный политехнический университет

Целью статьи является управление потоками данных, поступающих при диагностике сложных технических систем, и оценки состояния их компонентов в реальном времени. В статье приведены результаты применения разработанного метода распределения потоков данных с последующей реализацией в программном модуле. Основой метода распределения потоков данных является перехват сетевых пакетов с использованием алгоритма перебора сетевых пакетов, выявления системы-отправителя и дальнейшей сверки полученной информации с сформированным файлом-распределителем. Применение метода распределения пакетов данных при диагностике состояния сложной технической системы позволяет определить наиболее вероятные подсистемы, выход из строя которых может существенным образом повлиять на работу всей сложной технической системы.

**Ключевые слова:** управление данными; реляционные и нереляционные базы данных; сложные технические системы; диагностика; прогнозирование.

### Введение

Растущая степень насыщенности компонентами сложных технических систем (СТС) требует развития известных и разработки новых методов обеспечения надежности таких систем. Несмотря на широкие возможности современных методов оценки надежности СТС в них не в полной мере используются результаты разработок в области информационных технологий для диагностики и прогнозирования работоспособности систем [1-3].

Диагностики и прогнозирования состояния СТС осложняется ростом числа диагностических данных, собираемых системами оценки технического состояния СТС в процессе их эксплуатации. Автоматизация обработки данных требует повышенную вычислительную мощность систем оценки технического состояния СТС. Каналы передачи данных должны обладать высоким быстродействием при передаче данных от СТС к средствам их анализа и обработки [4-6].

Традиционно данные о техническом состоянии систем для анализа и обработки поступают от информационно-измерительных устройств (ИИС), устанавливаемых, например, как дополнительные модули в СТС [7,8]. Такие устройства позволяют в реальном времени контролировать техническое состояние СТС. Однако качество работы ИИС существенно влияет на достоверность обрабатываемой информации при диагностике и прогнозировании состояния СТС. Подобная роль ИИС существенно влияет на ограничение исходной базы диагностических данных и приводит к снижению уровня достоверности принимаемых решений при прогнозировании состояния СТС.

Исходя из изложенного, по-прежнему актуальной является необходимость разработки новых методов передачи данных, направленных на дальнейшую автоматизацию процедур диагностирования состояния СТС.

## Анализ сетевого трафика и распределение данных при диагностике состояния сложных технических систем

В целях повышения качества передачи данных при автоматизации процедур диагностирования состояния СТС разработан метод распределения диагностических данных по разноструктурным хранилищам данных с применением концепций Big Data и Data Mining [8,9].

Часто для передачи данных используют локально-вычислительные сети (ЛВС), способные передавать большие объемы данных в ИИС с масштабированием при необходимости.

Основой предлагаемого метода распределения данных является применение логического программного модуля способного автоматизировать процедуру распределения данных по разным типам их хранилищ.

Программный модуль распределяет потоки данных, передаваемых по ЛВС в реальном времени, и использует для их распределения набор специализированных условий (parse list) формируемый для каждого типа СТС.

Метод распределения потоков данных основан на перехвате сетевого трафика и сравнении идентификатора ИИС с принятым PL (parse list), а также дальнейшем распределением в соответствующее хранилище данных [10-12]. Для уменьшения времени прогнозирования состояния СТС рекомендуется использовать для хранения диагностических данных баз данных реляционного и нереляционного типов. Программный модуль перехватывает пакеты и выделяет идентификаторы ИИС до транспортного уровня модели OSI, что позволяет с высокой точностью определить источник передаваемых данных.

Для прогнозирования состояния СТС по данным диагностики предлагается использовать наиболее стратегически важные данных, хранящиеся в нереляционной базе данных. Нереляционная структура базы упрощает и ускоряет обработку данных, позволяет взаимодействовать с отдельными выборками без перебора всей реляции. В нереляционную базу данных распределяются данные от подсистем СТС, напрямую обеспечивающие нормальное функционирование СТС в различных режимах эксплуатации. Остальные данные для более детального анализа распределяются в реляционное хранилище данных.

ЛВС основывается на сетевой передаче данных с применением протокола TCP (*протокол управления передачей*). Такое решение позволяет согласовать данные, передаваемые по сети и обеспечить их единство. Основой разработанной системы диагностирования выступает система анализа сетевого трафика, передаваемого от ИИС к центральному серверу-обработчику. Анализ сетевого трафика заключается в последовательном выполнении операций распознавания и перебора данных. Так как сетевые протоколы существенно отличаются по своим архитектурным особенностям один от другого, то согласованность и единство данных является приоритетной задачей, решение которой позволяет повысить точность прогнозирования состояния СТС.

Используемый сетевой анализатор состоит из системы распознавания входных данных с дальнейшим разбором и восстановлением высокоуровневых потоков данных. Учет высокоуровневых данных повышает качество проводимого анализа по причине персональной семантики, используемой при восстановлении потоков данных. Чем выше уровень представления данных, тем большая точность восстановления.

Сетевое взаимодействие учитывает упорядоченный набор сетевых соединений. Каждое соединение передает последовательность пакетов между логическими объектами одного уровня (рис.1).

Пусть логическое соединение на  $M$ -м уровне ( $M = \overline{1, N}$ ) реализуется посредством протокола  $Protocol^M$  и содержит  $K_M$  пакетов. Все протоколы формируют множество допустимых

форматов пакетов  $\{F_j\}$ . В качестве форматов выступает разделение последовательности байт пакета на именованные поля и ограничения на значения некоторых полей. При этом пакет протокола  $Protocol^M$  выступает в качестве кортежа, который состоит из совокупности полей с управляющей информацией и полезной нагрузкой:

$$Protocol^M = \langle Control^M, Payload^M \rangle, \quad (1)$$

где  $Control^M$  - управляющая информация;  $Payload^M$  - полезная нагрузка.

Алгоритм работы сетевого анализатора базируется на восстановлении и группировки последовательности пакетов данных для всех логических соединений на всех уровнях модели OSI.

Для группировки пакетов данных необходимо выделять необходимые пакеты протокола  $Protocol^M$ , передаваемые на разных уровнях и использующих для собственной передачи различные логические соединения. В протоколе используется управляющая информация, хранящая в себе персональную информацию для каждого сетевого пакета. Это позволяет построить персональную ассоциацию искомого трафика, передаваемого во всем логическим сетям:

$$f(id_t^m) = key^m(Control_t^M), t = \overline{1, K_M}, \quad (2)$$

где  $f(id_t^m)$  - функция получения идентификатора логического соединения в рамках протокола уровня  $M$ .

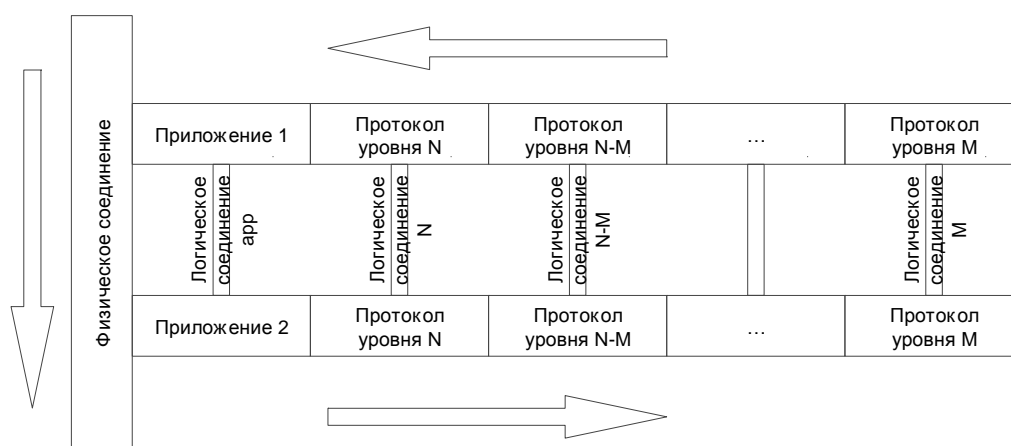
Структура логического соединения в рамках протокола уровня  $M$  позволяет организовывать внутри себя несколько логических соединений уровня  $M + L$ . С целью сохранения уникальности идентификатора логического соединения, необходимо дополнить его всеми идентификаторами применимыми на нижних уровнях:

$$uid_t^M = \{id_t^j\}, j = \overline{1, M}. \quad (3)$$

При использовании разноструктурной сети с применением различных сетевых протоколов необходимо дополнительно хранить идентификаторы протоколов:

$$uid_t^{P^M} = \{ \langle P_t^j, id_t^{P^M} \rangle \}, j = \overline{1, M}. \quad (4)$$

Существенным является учет фрагментации при пересылке пакетов в разбросанном порядке отправления и получения их на основе использования управляющей информации пакета, а также обеспечение переупорядочивания пакетов в случаях анализа пакетов вышестоящих логических соединений.



**Представление сетевого взаимодействия между приложениями**

Отобранный сетевой трафик подвергается процедуре извлечения данных, передаваемых в пакете, используемых для прогнозирования состояния СТС. Для извлечения данных необходимо распаковать перехваченный сетевой пакет, проанализировать составляющие его данные, отобрать необходимые значения и запаковать пакет для дальнейшей передачи по сети. Выполнение таких действий в реальном времени затруднено из-за искусственной задержки передачи данных по сети, а также необходимости в использовании сложного аппаратного обеспечения, которое проблемно интегрировать в соответствующие подсистемы СТС.

В результате, наиболее верным решением является перераспределение сетевого трафика для хранения его данных в разноструктурных хранилищах данных. Алгоритм распределения данных работает по принципу:

- система анализа трафика распаковывает сетевой пакет и получает информацию о передатчике;
- программный модуль выполняет сравнение идентификатора отправителя с заранее сформированным PL;
- согласно установленным правилам распределения данных для СТС выполняется логическое распределение между итоговыми местами хранения данных;
- к идентификатору приемника добавляется значение итогового хранилища данных согласно PL и выполняется передача пакета по сети.

Таким образом, предложенный метод распределения потоков данных в реальном времени позволяет осуществить перехват сетевого трафика и сравнение идентификатора ИИС с PL. Реализация разработанного метода распределения потоков данных предполагает использование соответствующего программного модуля для перехвата пакетов и выделения идентификаторов ИИС, выполняющейся до транспортного уровня модели OSI. Это позволит с высокой степенью точности определить источник передаваемых данных и выполнить процедуру их распределения согласно установленным коэффициентам критичности состояний подсистем СТС в соответствующие хранилища данных.

## **Заключение**

Применение разработанного метода распределения пакетов данных при диагностике состояния СТС позволяет осуществить перехват сетевых пакетов с использованием алгоритма перебора сетевых пакетов. Выявить системы-отправителя и осуществить дальнейшую сверку полученной информации с сформированным файлом-распределителем.

Использование метода распределения пакетов данных при диагностике состояния СТС позволяет определить подсистемы, выход из строя которых существенно влияет на работу всей сложной технической системы.

## **Библиографический список**

4. **Вычужанин, В.В.** Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем. Монография/ В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко. – Одесса, Из-во Экология, 2019. – 178 с.
5. **Цветков, В.Я.** Сложные технические системы / В.Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии, 2017. – №3(20). – С. 86-92.

6. **Vychuzhanin, V.V.** *Assessment of risks structurally and functionally complex technical systems* / V.V. Vychuzhanin, N.D. Rudnichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014. – Vol.1. – №2. – С. 18-22.
7. **Arasu, A.** Efficient exact set-similarity joins / A. Arasu, V. Ganti, R. Kaushik // Proceedings of the 32nd international conference on Very large data bases. VLDB '06. VLDB Endowment, 2006. – P. 918-929.
8. **Кудрявцев, К.Я.** Методы повышения скорости поиска информации в базах данных / К.Я. Кудрявцев, А.Е. Коротков // LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 84с.
9. **Jon C. R.,** Bennett Packet reordering is not pathological network behavior / Jon C. R. Bennett, Craig Partridge, Nicholas Shectman. // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) archive, Volume 7 Issue 6, Dec. 1999. – P. 789-798.
10. **Barbara D.** Fractal Mining — Self Similarity-based Clustering and its Applications / D. Barbara, P. Chen // Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, 2010. – P. 573–589.
11. **Барсегян, А.А.** Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко. БХВ-Петербург, 2007. – 384 с.
12. **Shybaiev, D.S.** Data control in the diagnostics and forecasting the state of complex technical system / N.D. Rudnichenko, D.S. Shybaiev , V.V. Vychuzhanin, T.V. Otradskaya, N.O. Shybaieva // Herald of Advanced Information Technology, 2019. –Vol.2. – No.3 . – 183–196.
13. **Шибяев, Д.С.** Оптимизация отбора и анализа информации в разноструктурных хранилищах данных / Д.С. Шибяев, Н.О. Шибяева, В.В. Вычужанин // Информатика и математические методы в моделировании, 2017. – №4. – С. 318 – 324.
14. **Шибяев, Д.С.** Оптимизация методов прогнозирования, обработки и анализа информации в разноструктурных хранилищах данных / Д.С. Шибяев, Н.О. Шибяева, Н.Д. Рудниченко // Информатика и математические методы в моделировании, 2018. – №1. – С. 78 – 85.
15. **Вычужанин В.В.** Распределенный программный комплекс на базе фреймворка apache spark для обработки потоковых big data от сложных технических систем / В.В. Вычужанин // Информатика и математические методы в моделировании, 2018. – №2. – С. 146 –153.

**D.S. Shibaev, V.V. Vychuzhanin, N.O. Shibaeva**

## **DISTRIBUTION OF NETWORK TRAFFIC DATA AT DIAGNOSTICS OF THE STATE OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS**

Odessa National Polytechnic University

Purpose of the article is to control the flow of data coming in the diagnosis of complex technical systems, and to assess the state of their components in real time. The article presents the results of applying the developed method for distributing data streams with subsequent implementation in a software module. The basis of the method of distributing data streams is to intercept network packets using an algorithm for sorting network packets, identifying the sending system and further reconciling the received information with the generated distribution file. The use of the method of distributing data packets in diagnosing the state of a complex technical system allows us to determine the most probable subsystems whose failure can significantly affect the operation of the entire complex technical system.

**Keywords:** data management; relational and non-relational databases; complex technical systems; diagnostics; forecasting.

С.Н. Данилин, С.А. Щаников, И.А. Борданов, А.Д. Зуев

## ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМНОГО КРИТЕРИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ МЕМРИСТОРОВ

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Целью работы является синтез системного критерия отказоустойчивости искусственных нейронных сетей на базе мемристоров (ИНСМ). Для достижения цели авторами сформулированы и обоснованы требования к критерию и представлен новый вариант его аналитического описания. Данный критерий является компонентом авторского общего подхода к исследованию и проектированию ИНСМ, основанного на теории систем и системного анализа, математического и имитационного моделирования, планирования экспериментов, современного представления об информации и общей теории искусственных нейронных сетей. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-01215.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, критерии отказоустойчивости, мемристоры, нейрокомпьютеры, инженерное проектирование, точность, отказоустойчивость, надежность.

### Введение

Анализ значительного числа научно-технических публикаций, в том числе обзорно-аналитических [1, 2, 3, 4], посвященных проблеме обеспечения высокой отказоустойчивости (ОУ) и надежности ИНС с произвольной платформой реализации, позволяет сделать вывод, что в настоящее время поставлены, рассмотрены и решены многие задачи в этой области. Показано, что работы по повышению устойчивости ИНС проводятся длительное время многими исследователями.

Достаточное для практики универсальное решение задачи еще не найдено. Оно является проблемой сложной, многогранной, с возрастающей размерностью при масштабировании вычислительных структур, и поэтому решается медленно и фрагментарно, требуя привлечения дополнительных ресурсов всех типов. Реализация ИНС на базе массивов мемристоров усложняет рассматриваемую задачу во много раз [5, 6, 7].

В работе [1] показана и неоднократно подчеркнута необходимость системного универсального количественного критерия ОУ, позволяющего измерять, сравнивать контролировать данное свойство ИНС различной структуры, типа, сложности и назначения. Критерий ОУ с подобными свойствами в рассмотренных работах не предлагается.

### 1. Общий подход к инженерному проектированию ИНСМ с заданной отказоустойчивостью функционирования

Для достижения цели работы авторы применили ранее разработанный общий подход [8, 9, 10] к инженерному проектированию, производству, исследованию и эксплуатации ИНСМ (в том числе всех составных частей: мемристоров, классических электронных комплектующих элементов, мемристивных матриц и чипов, нейронов и их компонентов, подсистем настрой-

ки, управления и контроля) основанный на теории системного подхода и анализа [11], математического [12, 13] и имитационного моделирования и планирования экспериментов [14], общей теории ИНС [15, 16], представления об информации и ее свойствах [17], позволяющее более последовательно и эффективно решать имеющийся комплекс проблем [18, 19], а также в соответствии с концепцией, построения перспективных ИНСМ, разработанной А.И. Галушкиным [20].

## 2. Уточнение терминологии в области отказоустойчивости и надежности ИНСМ

Автор монографии [15] обратил особое внимание на важность унификации и стандартизации терминов и определений в области теории и практики ИНС для однозначного их понимания и адекватного применения всеми исследователями, разработчиками, производителями и пользователями.

Проведенный обзор основополагающих нормативных документов [21, 22, 23, 24] показал принципиальное совпадение в определении понятий «надежность», «отказоустойчивость», «отказ» в стандартах Межгосударственных и Российских. Однако они носят обобщенный характер, не отражают структурно-функциональных особенностей ИНСМ, что вызывает неоднозначность их прикладного трактования и применения, в частности, для составления количественного критерия ОУ ИНСМ с нужными свойствами, методов, алгоритмов, технических средств обеспечения заданного уровня ОУ и надежности.

## 3. Обоснование требований к критерию отказоустойчивости

Для достижения цели работы, авторы раскрыли и акцентировали положения и допущения, являющиеся первичными в общем подходе п.1.

*Основная аксиоматика теории нейронных сетей, характерная для российской научной школы [25]:*

- а) вероятностная модель мира;
- б) нейронная сеть – логический базис решения любых научно-практических задач;
- в) нейронная сеть – частный вид многомерного нелинейного динамического объекта управления;
- г) любой вариант нейросетевого алгоритма должен быть ориентирован на эффективную техническую реализацию в соответствие с современными или перспективными технологиями;
- д) любая идея в части нейросетевых технологий не эффективна и содержит ошибочные положения, если не может быть перенесена из одно- или двумерной версии на многомерную версию.

*Ключевые принципы теории систем и системного анализа [11]:*

- а) совокупность элементов системы – это единое целое, а не простое объединение элементов;
- б) свойства системы — не просто сумма свойств ее элементов. Система, как правило, обладает свойствами, которых нет у отдельных элементов;
- в) работа системы организуется для получения максимальной эффективности (как правило, по экономическому критерию);
- г) систему запрещено рассматривать в отрыве от ее среды окружения – как автономную, обособленную;
- д) исходную систему можно и (или) необходимо делить на части;

е) система должна рассматриваться на всех этапах жизненного цикла: проектирование, производство, эксплуатация, утилизация.

Практика применения авторами перечисленных положений и принципов в составе общего подхода (п.1) показала возможность успешного решения задач в области ИНСМ.

*Метрики отказоустойчивости ИНСМ.*

Для оценки точности функционирования ИНС при возникновении отказов применяются известные статистические критерии: средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error), сумма квадратов ошибок SSE (Sum of Squared Errors), среднеквадратическая ошибка MSE (Mean Squared Error) или квадратный корень из неё RMSE (Root MSE), коэффициент детерминации  $R^2$ , функция ошибки Хьюбера (Huber loss), средняя относительная погрешность MAPE (Mean Absolute Percent Error), симметричный средний процент отклонения SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error), среднее отношение ошибок MRAE (Mean Relative Absolute Error), чувствительность S и другие [1,2].

Все перечисленные метрики обладают рядом недостатков: не сопоставимы между собой, являются косвенными метриками ОУ, не позволяют сравнивать ОУ ИНСМ разных типов и назначений, не согласованы с действующими стандартами по надежности информационных систем (ИС), информационно-технических комплексов (ИТК). Не содержат в своем составе значений допусков на оцениваемые параметры и характеристики, что не позволяет определять в какой зоне интервала допустимых значений находится оцениваемый параметр и определять по их значениям надежность ИНСМ.

В работе [26] авторы впервые предложили в качестве базы сравнения относительных метрик применять поле допустимых значений (допуск) параметров и характеристик ИНС и получили универсальный количественный критерий оценки ОУ U [28], позволяющий строить схемы надежности ИНС с последующим расчетом стандартных характеристик надежности. К нему можно применять все известные методологии математической статистики, вычислительной математики и метрологии.

Анализ положений международного стандарта ISO 5725 [27] показал полное соответствие свойств относительного критерия ОУ ИНС U его требованиям. Технология применения критерия U составлена также в полном соответствии с положениями данного стандарта. Изучение работ, посвященных технической реализации ИНСМ [6, 29, 30] и собственные исследования авторов [31] позволили составить список требований к критерию ОУ ИНСМ, модифицировать разработанный ранее критерий U и создать новую технологию его применения [32].

#### **4. Требования к критерию отказоустойчивости**

Системность и количественность. Выполнение данного требования позволяет определять ОУ ИНСМ, как на физических, так и на информационных структурно-функциональных уровнях с учетом алгоритмов работы подсистем настройки, управления, контроля, активной ОУ, присутствующих ИНСМ нынешнего поколения, взаимное влияние которых на качество функционирования неразрывно связано [11, 31, 32].

Инвариантность к типу, структуре и параметрам ИНСМ. Выполнение данного требования позволяет определять и сравнивать ОУ ИНСМ произвольных типов, структур и назначения.

Согласованность со стандартами в области проектирования технических объектов. В соответствии со стандартами в области проектирования программно-технических объектов, техническая реализация ИНСМ предполагает создание проекта (модели) ИНСМ с указанием значений функциональных параметров, как всей системы, так и ее составных элементов и



определением их допустимых пределов – допусков. На основании вышеизложенного, необходимо включить допуски в состав критерия ОУ ИНСМ.

Согласованность со стандартами в области надежности технических объектов. Численные значения ОУ позволяют составить схемы надежности, определить и оптимизировать основные показатели надежности ИНСМ в соответствии с действующими российскими и межгосударственными стандартами.

Зависимость от наработки (динамичность критерия). Выполнение данного требования позволяет определять уровень ОУ динамических ИНСМ (в том числе, нейросетевых систем автоматического управления (САУ)), а также по значениям ОУ определять все основные стандартные показатели их надежности. Нарботка, согласно стандарту [24], это продолжительность или объем выполненной работы. Основные стандартные показатели надежности технических объектов зависят от наработки.

На основе рассмотренных уточненных и дополненных положений общего подхода к созданию, производству и эксплуатации ИНСМ, авторы сформулировали развернутое определение ОУ ИНСМ, их компонентов и элементов как «свойство физическо-информационных элементов, компонентов и ИНС на их основе сохранять на всех этапах работы качество (точность) функциональных параметров в пределах допустимых значений (допусков) при любых вариациях параметров элементов и структур, сигналов всех типов и назначений, входной информации, математического, алгоритмического и программного обеспечения при воздействии внутренних и (или) внешних физических и (или) информационных факторов».

## 5. Новый вариант системного многомерного критерия U для возможных режимов функционирования и состояний ИНСМ, его компонентов и элементов

Системный, многомерный, динамический вариант количественного критерия ОУ ИНСМ -  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$ , применимый на любом уровне структурно-функциональной иерархии (системы, подсистем, функциональных звеньев, схемных элементов, ИО, АО, МО и ПО) при установленных значениях функциональных допусков, инвариантный к структуре и типу решаемых ИНСМ задач, режиму их функционирования можно записать следующим образом (1,2):

$$U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}(t,v) = 1 - \frac{X^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}(t,v) - X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on}}{X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on} - X^{n,a,b}(t,v)_{\partial oc}}, \quad (1)$$

при  $X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on} > X^{n,a,b}(t,v)_{\partial oc}$

$$U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}(t,v) = 1 - \frac{X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on} - X^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}(t,v)}{X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on} - X^{n,a,b}(t,v)_{\partial oc}}, \quad (2)$$

при  $X^{n,a,b}(t,v)_{\partial oc} < X^{n,a,b}(t,v)_{\partial on}$

где  $X^{n,a,b}$  – n-й ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) показатель качества работы ИНСМ a-го уровня структурно-функциональной иерархии ( $a = 1, 2, \dots, A$ ), в-го ( $b = 1, 2, \dots, B^a$ ) режима функционирования;

$X^{n,a,b}_{\partial on}$  – допускаемое значение (допуск) показателя качества работы ИНСМ;

$X^{n,a,b}_{\partial oc}$  – значение показателя качества работы ИНСМ, достигнутое при обучении;

$X^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  – значение показателя качества работы ИНСМ, при вариации параметров i-ой структуры ( $i = 1, 2, \dots, I$ ), j-го нейрона ( $j = 1, 2, \dots, J$ ), k-го элемента нейрона ( $k = 1, 2, \dots, K$ ), l-ой характеристики ИО ( $l = 1, 2, \dots, L$ ), p-го критерия качества МО ( $p = 1, 2, \dots, P$ ), r-го параметра АО ( $r$

= 1, 2, ..., R), s-го параметра ПО (s = 1, 2, ..., S), f-го параметра шумов и помех от номинального значения (f = 1, 2, ..., F).

Критерий  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  является безразмерной величиной и может иметь значения от  $-\infty$  до 1. Диапазон изменения  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  от 0 до 1 характеризует запас качества (точности) до достижения границы поля допуска. Если значение показателя  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  при каких-либо изменениях параметров ИНСМ становится ниже допустимого уровня (границы поля допуска), то она не является работоспособной. В этом случае критерий  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  становится отрицательным и его абсолютное значение, увеличенное на единицу, показывает во сколько раз изменение значения показателя качества (точности) работы ИНСМ при вариации параметра соответствующего элемента превышает допустимое изменение (границу поля допуска). Чем ближе значение коэффициента  $U^{n,a,b}_{i,j,k,l,p,r,s,f}$  к 1, тем более высока ОУ ИНСМ.

В порядке реализации требований и принципов, обоснованных в п.2,3,4 синтезирован универсальный вариант системного многомерного критерия U для возможных режимов функционирования и состояний ИНСМ, его компонентов и элементов. Определение ОУ элементов, компонентов, при разных режимах и состояниях функционирования на любом структурно-функциональном уровне производится путём подстановки в аналитические выражения (1,2) соответствующих решаемой задаче параметров и факторов.

### Заключение

Проведенная работа позволяет создавать и применять новые оригинальные пассивные, активные, гибридные подходы, методы и алгоритмы различных категорий обеспечения ОУ ИНСМ в научно-практической деятельности, в том числе для определения и обеспечения необходимого уровня надежности в каждом из режимов работы технических средств их реализации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-01215.*

### Библиографический список

1. **Torres-Huitzil C., Girau B.** Fault and error tolerance in neural networks: A review. // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 17322-17341.
2. **Yeung D.S., Cloete I., Shi D., Ng W.W.Y.** Sensitivity Analysis for Neural Networks. – Heidelberg: Springer, 2010. 89 p.
3. Новейшие технологии нейроморфных вычислений приведут к развитию искусственного интеллекта. Экспресс-информация по зарубежной электронной технике. Выпуск 23 (6697) от 21 ноября 2019 г. С.14-18.
4. **Данилин, С.Н.** Состояние исследований в области инженерного проектирования и производства нейрокомпьютеров / С.Н. Данилин [и др.] //Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2019. № 1(39). С. 14-45.
5. **Mikhaylov, A.N.** et. al. One-Board Design and Simulation of Double-Layer Perceptron Based on Metal-Oxide Memristive Nanostructures // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. 2018. V. 2, № 5. P.371-379.
6. **Nikiruy, K.E., Emelyanov A.V., Rylkov V.V., Sitnikov A.V., Demin V.A.** Adaptive Properties of Spiking Neuromorphic Networks with Synapses Based on Memristive Elements // Technical Physics Letters. 2019. V. 45. P. 386-390.
7. **Данилин, С.Н.** Особенности обеспечения отказоустойчивости нейронных сетей на базе мемристоров на схемотехническом структурно-функциональном уровне / С.Н. Данилин, А.Д. Зуев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4(36). С. 32-43.

8. **Данилин, С.Н.** Проблемы проектирования искусственных нейронных сетей на базе мемристоров с заданной точностью функционирования / С.Н. Данилин, С.А. Щаников // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2016. № 1(34). С. 3-11.
9. **Данилин, С.Н.** Исследование точности функционирования нейросетевых компонентов ртс на основе мемристоров / С.Н. Данилин, С.А. Щаников // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 1(17). С. 39-48.
10. **Галушкин, А.И.** Нейросетевой контроль точности функционирования технических средств на основе мемристоров / А.И. Галушкин [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 2(22). С. 44-51.
11. **Кулик, С.Д.** Элементы системного анализа для студентов старших курсов университета // Естественные и технические науки. 2018. № 11(125). С. 373-377.
12. **Chua, L.** Five non-volatile memristor enigmas solved // Applied Physics. 2018. V. 124. P. 563-606.
13. **Хранилов, В.П.** Методология и технологии интерактивного управления ресурсами технических систем при проектировании. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Нижегородский государственный технический университет. Нижний Новгород, 2007. – 355 с.
14. **Данилин, С.Н.** Применение методов имитационного моделирования при определении надежности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / С.Н. Данилин [и др.] // Нейрокомпьютеры и их применение XVII Всероссийская научная конференция. Тезисы докладов. 2019. С. 199-203.
15. **Галушкин, А.И.** Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013 – 496 с.
16. **Милов, В.Р.** Структурно-параметрический синтез нейросетевых систем обработки информации. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Нижегородский государственный технический университет. Нижний Новгород, 2003. – 310 с.
17. **Данилин, С.Н.** Современное представление об информации // Информационные системы и технологии. 2012. № 4. С. 138-146.
18. **Данилин, С.Н.** Применение имитационного моделирования при инженерном проектировании искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / С.Н. Данилин [и др.] // Информационные системы и технологии – 2019. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 459-467.
19. **Данилин, С.Н.** Проектирование искусственных нейронных сетей на основе мемристоров с заданной отказоустойчивостью / С.Н. Данилин [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 2(34). С. 41-50.
20. **Галушкин, А.И.** Стратегия развития современных супернейрокомпьютеров на пути к эксафлопным вычислениям // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2012. № 2. 32 с.
21. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М: Стандартинформ, 2016. 28 с
22. Details for IEV number 192-01-22: "dependability" [Электронный ресурс] // IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-01-22> (Дата обращения: 23.01.2019).
23. Details for IEV number 192-10-09: "fault tolerance" [Электронный ресурс] // IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-10-09>( Дата обращения: 23.01.2019).

24. ГОСТ Р 27.301–2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. – М: Стандартинформ, 2013. 19 с.
25. **Галушкин, А.И.** Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники // Информационные технологии. 2015. №2. С. 146-156.
26. **Данилин, С.Н.** Алгоритм контроля отказоустойчивости нейронных сетей. // Информационные технологии. 2013. №1, С.67-70.
27. Danilin S.N., Shchanikov S.A., Sakulin A.E., Bordanov I.A. Determining the Fault Tolerance of Memristors-Based Neural Network Using Simulation and Design of Experiments // 2018 Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT). 2018. P. 205-209.
28. ISO 5725. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results [Электронный ресурс] URL: <https://www.iso.org/ru/standard/11833.html> (Дата обращения: 23.01.2019).
29. **Kataeva, I. et. al.** Towards the development of analog neuromorphic chip prototype with 2.4m integrated memristors // 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2019. P. 1-51.
30. **Антонов, И.Н., Белов А.И., Михайлов А.Н., Морозов О.А., Овчинников П. Е.** Формирование весовых коэффициентов искусственной нейронной сети на основе мемристивного эффекта в наноструктурах “металл–оксид–металл” / И.Н. Антонов и др.] // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 8. С.880-888.
31. **Данилин, С.Н.** Схемотехнические решения при реализации искусственных нейронных сетей на базе мемристоров / С.Н. Данилин [и др.] // Нейрокомпьютеры и их применение XVII Всероссийская научная конференция. Тезисы докладов. 2019. С. 207-210.
32. **Danilin, S.N., Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D.** Quantitative determination of fault tolerance of memristor-based artificial neural networks // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1333.
33. **Danilin, S.N., Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D.** Quantitative determination of fault tolerance of memristor-based artificial neural networks (Количественное определение отказоустойчивости искусственных нейронных сетей на базе мемристоров) // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1333.

**S.N. Danilin, S.A. Shchanikov, I.A. Bordanov, A.D. Zuev**

## **DEVELOPMENT OF A SYSTEMS CRITERION FOR ASSESSING THE FAULT TOLERANCE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS BASED ON MEMRISTORS**

Murom Institute (branch) Federal state budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich  
and Nickolay Grigoryevich Stoletovs"

The aim of the work is the synthesis of the systems criterion of fault tolerance of artificial neural networks based on memristors (ANNM). To achieve the goal, the criteria requirements are substantiated and formulated and a new version of its analytical description is presented. The work is based on the author's general approach based on systems theory and system analysis, mathematical and simulation modeling and experimental design, a modern understanding of information, and the general theory of artificial neural networks (ANNs). This work was supported by the RFBR grant No. 19-07-01215.

**Keywords:** artificial neural networks, fault tolerance criteria, memristors, neurocomputers, engineering design, accuracy, fault tolerance, reliability.

## 5.2. Интеллектуальные системы управления

УДК 519.175.1, 621.3.049.771.14

Д.А. Галашов, А.А. Штанюк

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОВЕРКИ ИЗОМОРФИЗМА ГИПЕРГРАФОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ GDSII И DEF-ФАЙЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

В статье рассматриваются проблемы, возникающие в процессе верификации процесса проектирования топологии сверхбольших интегральных схем (СБИС), кратко описываются форматы GDSII и DEF, ставится задача верификации топологии с использованием понятия изоморфизма гиперграфов, описывающих элементы топологии СБИС.

**Ключевые слова:** сверхбольшая интегральная схема, топология, GDSII, DEF, граф, гиперграф, верификация, LVS

Разработка интегральных схем (ИС) представляет собой сложный процесс, требующий решения разнообразных научно-технических проблем. В этом процессе, который разбит на множество этапов, используются различные программные средства проектирования, задействовано множество форматов файлов.

Основной задачей при проектировании всех ИС является разработка топологического чертежа, который дает необходимую информацию непосредственно перед технологическими этапами создания микросхемы. При разработке топологии проектируют схему различного расположения элементов разрабатываемой ИС, рассчитывают их геометрические размеры, выбирают форму, komponуют пленочные и навесные компоненты и вычеркивают их размещение на подложке в увеличенном масштабе.

Объект топологического проектирования в общем случае можно представить сложной иерархической структурой. На каждом из уровней иерархии определяются топологические характеристики, которые можно описать с помощью понятий связности, замкнутости и упорядоченности отдельных частей объекта. Топология каждого уровня иерархии может быть представлена объектом, к которому применимы общие методы дискретной математики, при наличии ограничений.

Для решения задач проектирования используют различные математические модели: графовые эквиваленты коммутационных схем соединений отдельных частей объекта (мультиграфы, гиперграфы, ультраграфы); графы пересечений для отображения взаимного расположения соединений; неориентированный топологический граф решетки для задания метрического пространства.

Термин СБИС введен уже более трех десятков лет, со времен размещения на кремниевой подложке или кристалле десятки тысяч транзисторов. В настоящее время это количество приближается к миллиарду. Прежде чем выпустить устройство, проектировщик должен убедиться в соблюдении всех правил построения [1].

С увеличением сложности проекта увеличивается опасность появления ошибок, и затрудняется процесс их поиска. Более того, насколько удовлетворяет разрабатываемая БИС

предъявляемым к ней требованиям, становится ясно только в самом конце процесса проектирования. Ошибки, обнаруженные в конце той или иной стадии проектирования, ведут к повторному ее выполнению, что в ряде случаев влечет неоднократный выпуск прототипов значительно замедляя сроки выполнения проекта и резко повышая его стоимость[2].

На разных этапах процесса проектирования и производства СБИС используются различные методы верификации, позволяющие выявить типовые ошибки. В данной работе обсуждается корректность преобразования макета схемы и списка цепей (соединений) в топологическое изображение СБИС, что на языке проектировщиков носит название LayoutVersusSchematic. Успешная проверка гарантирует, что макет схемы соответствует разработанным правилам изготовления.

Пример типичных ошибок, выявляемых при LVS:

- компоненты, которые должны быть соединены, соединены частично или совсем не имеют связи;
- использование компонента неправильного типа;
- отсутствие компонента.

Важнейшим этапом проверки при LVS является проверка связей между компонентами схемы. На математическом языке это проверка изоморфности двух гиперграфов, один из которых строится на основе списка цепей (netlist) и компонентов исходного проекта, а другой является результатом обработки топологического изображения схемы, хранящегося в файле формата GDSII. Сложность задачи вызвана как трудоемкостью алгоритмов проверки изоморфности для гиперграфов, состоящих из огромного числа ребер и вершин, так и необходимостью разработки эффективного алгоритма построения гиперграфа в результате анализа изображения, состоящего из большого количества полигонов.

## Формат GDSII

GDS II (GDSII, GDS, Graphic Data base System) — формат файлов баз данных, являющийся промышленным стандартом для обмена данными по интегральным схемам и их топологиям. Данный формат описывает плоские геометрические формы, текстовые метки и иную информацию в иерархической форме. Данные могут использоваться для обмена между различными САПР или для создания фотошаблонов.

Уже более 40 лет GDSII является отраслевой стандартной базой данных для макета интегральных схем. Несмотря на то, что разрабатываются новые форматы для замены устаревшего GDSII, на сегодняшний день он остается основным способом описания физической компоновки масок, используемых для построения чипа.

Официального обновления спецификации GDSII с 1989 года не было. Компьютеры и процессоры прошли долгий путь с тех пор; спецификация имеет некоторые ограничения, которые, вероятно, были основаны как на ограничениях компьютеров эпохи 80-х годов, так и на убеждениях разработчиков, что чипы будут примерно такой же сложности в представляемом ими будущем. К счастью, то, как была создана база данных, позволило пользователям расширить многие из ограничений, сохраняя при этом совместимость с фактической архитектурной основой. В какой-то степени долголетие GDSII объясняется как его элегантной архитектурой, так и простотой. Элегантная архитектура позволяет ему поддерживать современные чипы с их миллиардами полигонов, в то время как простота позволяет программистам писать код для манипулирования GDSII. Эта огромная база унаследованного кода, вероятно, замедляет переход к альтернативным форматам.

Фрагмент содержания файла формата GDSII приведен на рис. 1[3].

```

? FPRINT
Source File Name: EXAMPLE.SF
Format (Octal): HEX
Output File: $TTO
000 0006 0002 0258 001C 0102 0055 0009 0003
008 0000 0000 0000 0055 0009 0003 000A 0010
010 0000 0006 3902 0028 000A 3B02 0003 0005
018 0007 000E 0206 4558 414D 504C 452E 4442
020 005C 1F06 4744 5349 493A 5245 4631 2E44
028 4200 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
030 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
****
048 0000 0000 0000 0000 0000 0000 00B4 2006
050 4744 5349 493A 4341 4C4D 4146 4F4E 542E
058 5458 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
060 0000 0000 0000 0000 0000 0000 4744 5349
068 493A 5445 5854 2E54 5800 0000 0000 0000
070 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
078 0000 0000 0000 0000 4744 5349 493A 464F
080 4E54 2E54 5800 0000 0000 0000 0000 0000
088 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
090 0000 0000 4744 5349 493A 5047 464F 4E54
098 2E54 5800 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0A0 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0A8 0012 2306 4744 5349 493A 4154 5452 532E

```

Рисунок 1. Фрагмент содержания файла формата GDSII

Также существуют инструменты, представляющие GDSII в графическом виде. Пример такого представления в программе Owl Vision GDSII Viewer показан на рис. 2.

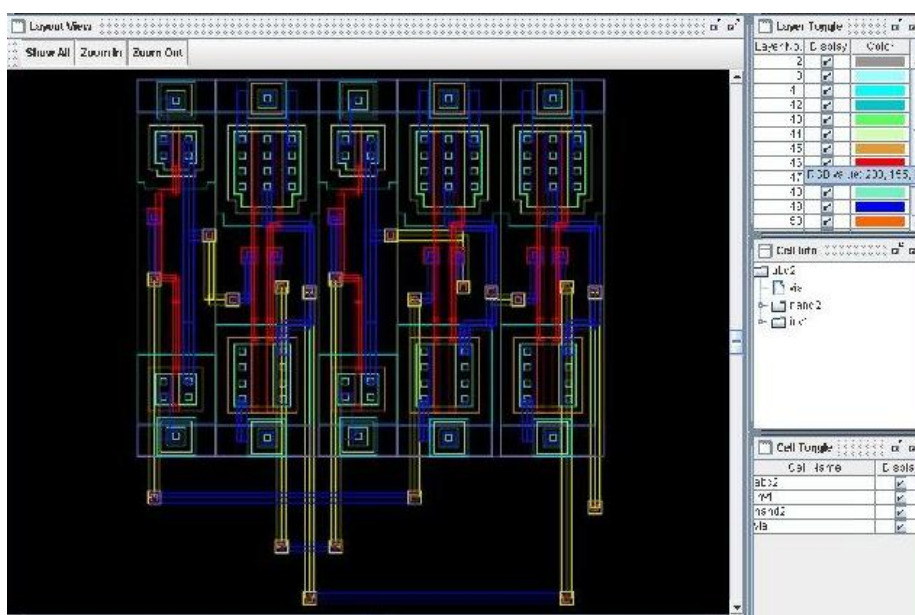


Рисунок 2. Графическое представление GDSII

### Формат DEF

Design Exchange Format (DEF) - это открытая спецификация для представления физической схемы интегральной схемы в формате ASCII. Он представляет список соединений, размещения компонентов и информацию о маршрутизации. Но он не содержит никакой инфор-

мации об используемых компонентах. Для этой информации обычно используется в сочетании с LEF. Подключение огромного количества компонентов является основным направлением разработки формата файла DEF.

Формат файла DEF тесно связан с форматом файла LEF. Таким образом, оба файла необходимы для правильного отображения физического проекта.

Файлы DEF обычно создаются инструментами определения местоположения и маршрута. Используются в качестве входных данных для инструментов последующего анализа, таких как инструменты извлечения или инструменты анализа мощности.

Файл DEF используется для описания всех аспектов проекта, включая:

1. Размер плашки.
2. Связи.
3. Физическое расположение ячеек и макросов на чипе.

Содержит информацию о планировке:

1. Стандарт ячеек и групп.
2. Размещение и маршрутизация блокировок.
3. Ограничения размещения.

Фрагмент сетевого списка проекта в формате DEF приведен на рис 3[4].

```
DESIGN DEMO4CHIP ;
  TECHNOLOGY DEMO4CHIP ;
  ARRAY DEMO4 ;
  UNITS DISTANCE MICRONS 100 ;
  COMPONENTS 243 ;

- CORNER1 CORNER ; - CORNER2 CORNER ; - CORNER3 CORNER ;
- CORNER4 CORNER ; - C01 IN1X ; - C02 IN1Y ; - C04 IN1X ;
- C05 IN1X ; - C06 IN1Y ;
- C07 IN1Y ; - C08 IN1Y ; - C09 IN1Y ; - C10 IN1X ; - C11 IN1X ;
- C13 BIDIR1Y ; - C14 INV ; - C15 BUF ; - C16 BUF ; - C17 BUF ;
- C19 BIDIR1Y ; - C20 INV ; - C21 BUF ; - C22 BUF ; - C23 BUF ;
- C25 BIDIR1Y ; - C26 INV ; - C27 BUF ; - C28 BUF ; - C29 BUF ;
- C31 BIDIR1Y ; - C32 INV ; - C33 BUF ; - C34 BUF ; - C35 BUF ;
- C37 BIDIR1X ; - C39 INV ; - C40 BUF ; - C41 BUF ; - C42 BUF ;
```

**Рисунок 3. Фрагмент сетевого списка в формате DEF**

### **Способ проверки корректности перевода информации из файла формата DEF в GDSII**

Наиболее эффективным решением будет являться моделирование структуры микросхемы с помощью графовых моделей. Если не рассматривать содержательную сторону структурных схем, а учитывать только наличие элементов и связей между ними, то получаемая схема называется графом. В общем случае любой граф состоит из множества элементов любой природы, называемых вершинами, и обозначений связи между ними, называемых ребрами (или дугами)[6].

Если представить файлы DEF и GDSII в виде графов, то задача проверки корректности перевода сводится к проверке изоморфности этих графов.



## Проблема изоморфизма графов

Если два некоторых графа являются изоморфными, они имеют одинаковую структуру. Можно говорить о том, что изоморфные графы отличаются лишь нумерацией (или обозначениями) вершин[7].

Имеют место следующие утверждения:

1. Необходимым условием изоморфности графов  $A$  и  $B$  является одинаковое число вершин и одинаковое число ребер.
2. Графы изоморфны в том и только в том случае, если изоморфны их дополнительные графы.
3. Отношение изоморфности на множестве графов является отношением эквивалентности.

Проблема изоморфизма состоит в построении эффективного алгоритма установления изоморфности двух заданных графов. Решение проблемы важно для многих практических приложений. Ни один из известных алгоритмов установления изоморфности не является полиномиальным по времени выполнения[8].

Так как в файлах формата DEF и GDSII хранится информация о СБИС, следовательно, число элементов (вершин) велико и нас интересует вычислительная сложность выявления изоморфности.

Задача распознавания изоморфизма графов принадлежит классу NP и неизвестно, является ли она NP-полной или принадлежит классу P (при условии, что  $P \neq NP$ ). При этом задача поиска изоморфного подграфа в графе является NP-полной. Современные исследования направлены на разработку быстрых алгоритмов решения как общей задачи изоморфизма произвольных графов, так и графов специального вида [9].

### Подходы к решению задачи распознавания изоморфизма

Можно показать, что отношение изоморфизма между графами является отношением эквивалентности, то есть оно симметрично, транзитивно и рефлексивно. Следовательно, оно разбивает класс всех графов на непустые и попарно непересекающиеся подклассы, называемые классами изоморфизма или классами изоморфных графов. Два произвольных графа принадлежат одному и тому же классу изоморфизма тогда и только тогда, когда они изоморфны друг другу.

Вопрос о том, изоморфны ли два данных графа, в общем случае оказывается сложным.

Для изоморфизма двух  $n$ -вершинных графов само определение этого отношения дает теоретически безукоризненный способ проверки: надо просмотреть все  $n!$  взаимно однозначных соответствий между множествами вершин и установить, совмещаются ли полностью ребра графа хотя бы при одном соответствии. Однако даже весьма грубая оценка показывает, что такое решение задачи практически непригодно.

Для решения практических задач часто используется подход сведения задачи распознавания изоморфизма к задаче поиска подграфа графа  $G$ , изоморфного графу  $H$ . Самый популярный алгоритм ее решения – это алгоритм Ульмана перебор с отсечениями.

Алгоритм О.В. Расина основанный на работах Лакса и Ульмана заключается в построении вспомогательного цветного графа и нахождение порождающего множества групп его автоморфизмов.

С исследованиями графов связано понятие инварианта, позволяющее эффективно выявлять изоморфность.

Инвариантом графа  $G$  называют число, связанное с  $G$ , которое принимает одно и то же значение на любом графе, изоморфном  $G$ . Таким образом, инварианты графов в некоторых случаях позволяют убедиться, что два графа неизоморфны: если инвариант принимает на двух графах разные значения, то эти два графа не могут быть изоморфными. В общем случае, проверка изоморфности может потребовать использования суперкомпьютерных технологий и эффективного распараллеливания [10]. Поиск наиболее подходящих и эффективных алгоритмов составляет одну из важнейших задач при разработке современных систем проектирования.

### Вывод

Таким образом, эффективное решение задачи верификации топологии интегральной схемы на этапе проверки соответствия исходного проекта топологическому изображению, непосредственно связано с построением двух гиперграфов, соответствующих исходному проекту и конечному изображению и анализом этих графов на изоморфность.

### Библиографический список

1. **Палташев, Т.** Введение в проблему разработки и производства СБИС / Т. Палташев. - Gatchina Nanoelectronics, Phoenix, Arizona, 2009.
2. **Денисенко, В.** Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии, №4, 2002. - с.100-104.
3. Calma Company GDSII™ Stream Format Manual, 1987. URL: [http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/calma/GDS\\_II\\_Stream\\_Format\\_Manual\\_6.0\\_Feb87.pdf](http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/calma/GDS_II_Stream_Format_Manual_6.0_Feb87.pdf) (Дата обращения 05.02.2020).
4. LEF/DEF Language Reference Product Version 5.7, 2015. URL: <http://www.ispd.cc/contests/18/lefdefref.pdf> (Дата обращения 5.02.2020).
5. **Rishabn A.** An insight into layout versus schematic, 2013. URL: <https://www.edn.com/an-insight-into-layout-versus-schematic/> (Дата обращения 2.02.2020).
6. **Моргунова Н. А., Конорева Н. А.** Граф как математическая модель структуры // Юго-Западный государственный университет, 2017.
7. **Назаров, М. Н.** Альтернативные подходы к описанию классов изоморфных графов // ПДМ, 2014, № 3(25), 86–97.
8. **Пономаренко, И.Н.** Проблема изоморфизма графов: Алгоритмические аспекты // Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова, 2010.
9. **Карелин, В.П.** Задача распознавания изоморфизма графов. Прикладное значение и подходы к решению // Вестник Таганрогского института управления и экономики. – 2015. – No 1. – С. 102–106.
10. **Старостин, Н.В.** Многоуровневые алгоритмы на графовых структурах с приложениями в области суперкомпьютерного моделирования и систем принятия решений // Общероссийский семинар "Информатика, управление и системный анализ" - Москва, 2016.

**D.A. Galashov, A.A. Shtanyuk**

**THE NOTES ON THE PROBLEM OF ALGORITHMS FOR CHECKING  
HYPERGRAPHS ISOMORPHISM RESEARCH IN THE ANALYSIS  
OF THE INTEGRATED CIRCUITS TOPOLOGY BASED ON GDSII AND DEF FILES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article discusses the problems that arise during the verification process of designing the topology of super-large integrated circuits (VLSI), briefly describes the GDSII and DEF formats, sets the task of verifying the topology using the concept of isomorphism of hypergraphs describing elements of the VLSI topology.

**Keywords:** ultra-large integrated circuit, topology, GDSII, DEF, graph, hypergraph, verification, LVS

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО МНОЖЕСТВА КЛАССОВ

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

<sup>2</sup> ОАО «ИнфоТекС», г. Москва

Рассматривается задача классификации образов в условиях динамического изменения классов. Такие задачи возникают, например, при диагностике режимов работы нестационарных объектов управления, а также при динамической классификации образов в системах обнаружения компьютерных атак. Сформулированы основные проблемы, возникающие при классификации образов нестационарных классов. Предлагается оригинальный подход, сочетающий традиционную классификацию с анализом новизны для проверки достоверности ответа классификатора и выявлением необходимости дообучения классификатора. Приведены требования к методике экспериментальной апробации подхода с использованием искусственных нейронных сетей для классификации и анализа новизны классифицируемых данных.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, автокодировщик, обнаружение аномалий, новизна, динамическая классификация, нестационарная модель.

### Введение

В большинстве задач классификации обычно предполагается, что свойства и характеристики классов, к которым относятся анализируемые данные, не подвержены существенным изменениям во времени. Тогда как, строго говоря, в природе не существует полностью стационарных процессов, какими они обычно представлены в учебной литературе. В большинстве технических и информационных систем происходит постепенный износ, либо накопление незначительных изменений, что остается незаметным на протяжении длительного времени. Тем не менее, процессы изменения режимов и характеристик функционирования в некоторых случаях могут быть значительными. Также на режимы работы технических систем оказывают влияние внешние возмущающие факторы. В информационных системах нестационарность характеристик может быть обусловлена вмешательством человека-оператора, ошибками в реализации систем, изменением конфигурации программного и аппаратного обеспечения, а также деструктивными действиями вредоносных программ. Разработка классификаторов для систем с изменяющимися характеристиками представляется сложной задачей. Традиционные подходы к классификации векторных образов подразумевают стационарность границ классов, а модели нестационарных процессов, как правило, оперируют скалярными временными рядами. Поскольку результаты классификации часто используются для мониторинга, управления или принятия решений, то эффективная классификация в условиях нестационарности может существенно повысить уровень автоматизации и качество решения целевой задачи, что имеет большое практическое значение.

Применение нейросетевых классификаторов для решения задач классификации в настоящее время пользуется большой популярностью. Однако при классификации образов, динамически меняющихся во времени, возникает проблема, которая заключается в некорректно-

сти отнесения изменившихся или неизвестных образов к известным классам при использовании статического классификатора. Рассмотрим задачу классификации образов, представленных в виде многомерного временного ряда, в условиях нестационарности классов. Под многомерным временным рядом понимается вектор, элементы которого представляют собой различные характеристики образа, которые влияют на принятие решения о том, к какому классу можно отнести данный образ. Примеров, когда в исходной постановке задачи предполагается наличие ограниченного числа известных классов, а с течением времени число классов возрастает, более чем достаточно.

Такие ситуации могут возникать, например, когда классификатор системы обнаружения вторжений, обученный на векторных представлениях событий нормального типа и событий, возникающих при известных типах атак, выдаёт метку класса нормы или метку класса известного типа атаки на событие, вызванное совершенно новым типом атаки. Вследствие ошибочной классификации может быть пропущено вторжение в систему вредоносного программного обеспечения или могут быть предприняты меры, предотвращающие вредоносное действие другого типа атаки, что никак не мешает сценарию атаки нового типа. Также, например, в системе медицинской диагностики может использоваться классификатор, обученный диагностировать заболевание по вектор-представлению данных из медицинской карты пациента. Вполне возможен случай появления нового заболевания, вектор-представление которого будет ошибочно отнесено классификатором к одному из известных, что означает неверное определение экспертной системой диагноза и назначение неподходящего лечения. Кроме того, часто нейронные сети используют для классификации текстов на естественном языке. Рассмотрим классификатор, относящий поданный на его вход вектор-представление текста к одной из определенных рубрик. Поскольку количество публикаций в интернете стремительно растет, то классификатор, сформированный на устаревшей выборке текстов, с большой вероятностью будет классифицировать публикации на новую тему с ошибкой. Во всех приведённых случаях ошибки вызваны тем, что классификатор не способен определить, что поданный образ принадлежит не к одному из известных ему классов, а к новому классу.

Другой проблемой является эффект кажущейся нестационарности классов, вызванный тем, что обучающая выборка имеет ограниченный размер и некоторые образы могли в неё не попасть. При обычной классификации такие образы могут быть не отнесены к своему классу. Для корректного разрешения данной ситуации необходимо опознавать такие образы и включать их в обучающую выборку для уточнения классификатора.

В данной работе рассматривается задача оценки достоверности нейросетевой классификации нестационарных данных, предлагается метод динамической классификации с использованием автокодировщиков для определения новизны данных и принадлежности их к новому классу, а также разрабатываются требования к модели для апробации предлагаемого подхода.

## Обзор литературы

Теме классификации нестационарных данных в литературе уделяется крайне мало внимания, что объясняется рядом сложностей.

Например, в работе [1] для классификации нестационарных сигналов, полученных при помощи многоканальной электрокардиограммы (ЭКГ), используются самоорганизующиеся карты Кохонена, до применения которых сигналы обрабатываются с помощью обобщенного алгоритма Хебба – нейросетевого аналога алгоритма главных компонент, для выделения существенных признаков в анализируемых сигналах. Самоорганизующиеся карты Кохонена

преобразуют входные сигналы в пространство низкой размерности, впоследствии каждый кластер имеет свой обособленный участок на карте. Стоит отметить, что предлагаемая в работе нейросетевая модель была достаточно успешно апробирована для классификации сердечно-сосудистых заболеваний. Однако существенным недостатком предлагаемой модели является необходимость знания числа кластеров, что не позволяет избежать проблемы появления в классифицируемых данных образов нового класса.

Использование для классификации нестационарных данных алгоритмов кластеризации, не требующих знания о числе кластеров (классов), приводит к сложностям с интерпретацией результатов кластеризации при выявлении большого числа классов в данных.

В работе [2] для классификации нестационарных данных предлагается использовать сеть теории адаптивного резонанса, ARTMAP. Привлекательной особенностью нейронных сетей с адаптивным резонансом является то, что они сохраняют гибкость при запоминании новых образов, и, в то же время, предотвращают модификацию памяти с уже запомненными образами. Нейросеть может быть обучена как с учителем, так и в режиме кластеризации. Также, имеется внутренний детектор новизны – тест на сравнение предъявленного образа с содержимым памяти. Классификация нестационарных данных с помощью сети ARTMAP осуществляется в режиме кластеризации, недостатки которой уже были отмечены ранее. К сожалению, подтверждения успешного практического применения сети ARTMAP в задачах классификации нестационарных данных в статье не представлено. Кроме того, исходя из теоретического материала, изложенного в статье, можно выявить следующие ограничения. Принцип работы предлагаемой сети заключается в предсказании выходного вектора для произвольного входа с опорой на обучающую выборку. При этом нет никаких оснований говорить о высокой точности предлагаемого подхода. Наряду с этим, данные сети всегда выдают положительный результат при классификации, то есть не обладают способностью отделить новые образы от искаженных или зашумленных версий старых образов. Всё это препятствует использованию сетей такого типа для решения задачи достоверной классификации в условиях динамически изменяющегося множества классов и для обнаружения аномалий.

Похожая задача решается в ряде работ при классификации динамически изменяющихся текстовых данных, основанных на использовании нейронных сетей[3][4][5].

Авторами статьи [6] решается задача классификации потока системных ошибок с помощью гибридной модификации нейронной сети Ванга-Менделя, состоящей из модуля извлечения семантики и модуля классификации. Предложенная нейронная сеть обладает способностью решать не только задачу классификации, но и задачу кластеризации множества входных данных на основе самоорганизации. Особенность классифицируемых сообщений состоит в том, что они практически не повторяются и изменяются во времени. В рассматриваемой задаче заранее известно, что поток сообщений имеет пять классов, при этом тестовое множество включало сообщения, не входившие в обучающую выборку и представляющие новый класс. В результате тестирования было выявлено несколько сообщений в обучающей выборке, которые получают некорректные значения классов, даже после полного обучения. Стоит отметить, что использование предложенной модели не позволило достичь точности выше 71%. К ограничениям предложенной модели следует отнести невозможность суждения о природе нового образа: насколько он похож на предыдущие, является ли выбросом или аномалией. Из-за этого модель может пропустить образ, свидетельствующий о неисправности. Кроме того, метод не предусматривает дообучения, которое позволило бы адаптировать модель к распознаванию новых сообщений входного потока.

В большинстве случаев применение алгоритма дообучения сопряжено со сложностью определения момента времени, когда он становится необходим. В некоторых случаях даже при

непосредственном участии человека в мониторинге процессов системы, некоторые изменения могут быть скрытыми или казаться незначительными. Большое прикладное значение имел бы метод, реализующий сбор данных для дообучения классификатора.

Еще одним известным способом решения проблемы изменяющихся данных является онлайн обучение. Следует подчеркнуть, что использование такого подхода к обучению крайне нежелательно для систем, в которых выявляются неисправности, диагностируются аварийные и предаварийные ситуации, а также для систем обнаружения компьютерных атак. В таком случае высока вероятность обучения на «отравленных» данных, содержащих невыявленные неисправности, атаки и тому подобное, что приведет к невозможности обнаружения классификатором этих событий в будущем.

Для классификации нестационарных данных в работе [7] предложена модификация алгоритма случайного леса, позволяющая повысить точность классификации состояния путем взвешивания ответов отдельных классификаторов композиции. Опираясь на метод Accuracy Weighted Ensemble (AWE), взвешивание производится в соответствии с оценкой ошибки каждого классификатора на новых данных. Такая оценка производится с использованием метода K-ближайших соседей и внутренней структуры случайного леса. В качестве стратегии обновления композиции используется замена классификаторов с низкой точностью на новых данных. Стоит отметить, что метод был протестирован на наборе данных об изменении лесного покрова. К тому же, сами авторы отмечают, что предлагаемый ими подход эффективен только при постепенном и последовательном изменении в данных, однако такие ситуации встречаются далеко не всегда. Также отмечается сложность настройки параметров алгоритма.

Обзор литературы показал, что существующие методы классификации многомерных динамически изменяющихся временных рядов обладают рядом недостатков. Статические классификаторы не могут справиться с классификацией в условиях нестационарности классов, а недостаточное доверие к результатам классификации далеко не всегда допустимо. Таким образом, проблема создания методики корректной классификации нестационарных временных рядов представляется актуальной.

Достаточно перспективным подходом к решению задач такого типа является обнаружение аномалий, однако был обнаружен дефицит публикаций, посвященных применению обнаружения аномалий для классификации нестационарных данных.

Для устранения недостатков существующих подходов была предложена оригинальная методика классификации, основанная на использовании комплекса нейронных сетей, позволяющего оценивать близость входных образов к классам, известным классификатору, а также необходимость дообучения классификатора.

## Метод

Рассмотрим задачу классификации образов в условиях нестационарности, что характеризуется следующими особенностями:

- 1) образ может некорректно классифицироваться, но при этом принадлежать к известному классу;
- 2) образ может представлять новый класс;
- 3) образ может являться аномалией.

Как видим, кроме собственно классификации необходимо реализовать выявление образов, близких к известным классам, но не относимых к ним, а также новых классов и аномалий. Это возможно сделать с помощью оценки близости поступающего образа к уже известным

классификатору образам. Для решения поставленной задачи предлагается методика классификации, основанная на использовании комплекса нейронных сетей.

В основе методики лежит алгоритм обнаружения новизны в данных с помощью автокодировщика – нейронной сети специальной архитектуры, позволяющей применять обучение без учителя и имеющей свойство автоассоциативной памяти. Особенность архитектуры заключается в том, что выходной слой автокодировщика должен содержать столько же нейронов, сколько и входной слой, при этом промежуточный слой должен содержать меньшее количество нейронов. Это необходимое условие, поскольку автокодировщик обучается воспроизводить на выходе данные, наиболее близкие к входным. При обучении нейросети выявляется избыточность в поступающих на вход данных, что обеспечивает их сжатие промежуточном слое. Условно архитектура автокодировщика состоит из кодера и декодера. Кодер снижает размерность входного вектора для представления его в пространстве скрытого слоя, оставляя лишь основные закономерности вектора в «узком горле», которые позволяют декодеру из закодированного представления восстановить входной вектор на выходе. Восстановленные на выходе автокодировщика данные называются реконструкцией.

Рассмотрим принцип метода обнаружения новизны в данных, который схематично изображен на рис. 1.

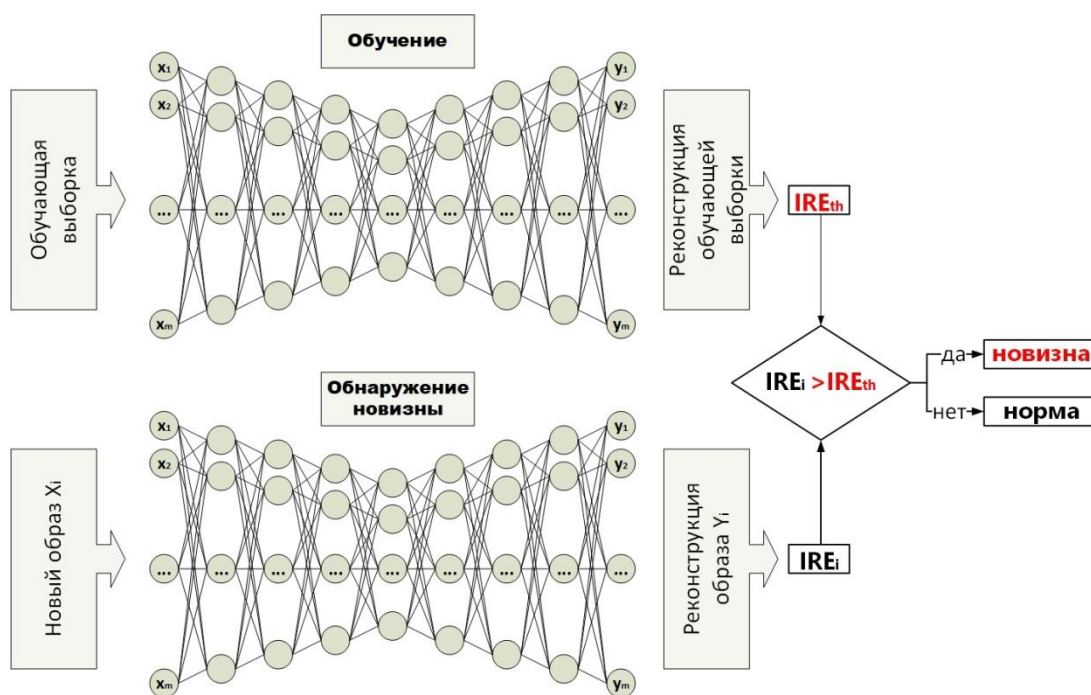


Рисунок 1. Схема метода обнаружения новизны с помощью автокодировщика

Метод реализуется в два этапа: обучение автокодировщика и обнаружение с его помощью новизны. Пусть имеется обучающая выборка образов – набор векторов. Для обнаружения новизны в последующих наборах данных необходимо обучить автокодировщик.

На первом этапе обучающая выборка подаётся на вход автокодировщика и он обучается восстанавливать её на выходном слое. Обучение автокодировщика продолжается до тех пор, пока он не настроится воспроизводить образы обучающей выборки с приемлемой точностью, которая определяется величиной среднеквадратичной ошибки (Mean Squared Error, MSE). После обучения автокодировщик можно использовать для распознавания образов похожих на образы из обучающей выборки. Степень похожести поданного на вход автокоди-



ровщика образа на те, по которым он обучался, или точность, с которой автокодировщик опознает входной образ как известный, определяется величиной мгновенной ошибки реконструкции (Immediate Reconstructon Error, IRE). Мгновенная ошибка реконструкции входного вектора  $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$  длины  $m$  рассчитывается по формуле:  $IRE_X = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}$ , где  $Y(y_1, y_2, \dots, y_m)$  – восстановленный на выходе автокодировщика вектор. Малость величины мгновенной ошибки реконструкции означает близость поданного на вход образа к примерам обучающей выборки. Для обнаружения новизны в данных для величины мгновенной ошибки реконструкции устанавливается пороговое значение  $IRE_{th}$ . Пороговое значение в данной работе выбирается как максимальное значение среди ошибок реконструкции, рассчитанных для примеров из обучающего набора.

На втором этапе обученный автокодировщик и пороговое значение ошибки реконструкции используются для обнаружения образов, отклоняющихся от нормальных. Для этого для каждого нового образа  $X$ , поданного на вход обученного автокодировщика, рассчитывается мгновенная ошибка реконструкции  $IRE$ . Превышение установленного порогового значения  $IRE_{th}$  мгновенной ошибкой реконструкции  $IRE$  свидетельствует о том, что образ  $X$  не входит в множество обучающих образов данного автокодировщика и даже не похож на них. Это может рассматриваться как признак новизны (аномалия), хотя тот же самый эффект может быть следствием искажений входного вектора. В случае если ошибка реконструкции  $IRE$  для нового образа оказалась ниже порогового значения  $IRE_{th}$ , значит, образ принадлежит классу данных, на которых был обучен автокодировщик. Экспериментальное подтверждение работоспособности метода обнаружения аномалий с помощью автокодировщика уже было получено ранее [8].

Теперь рассмотрим задачу классификации нестационарных данных. Пусть изначально данные были разделены на  $n$  классов. Пусть имеется обучающая выборка, содержащая пары «образ-класс», для обучения статического нейросетевого классификатора. Представим имеющиеся образы обучающей выборки, сгруппированные по известным классам  $(C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$ , в пространстве классов, как на рис. 2. Назовём область, охватывающую образы всех известных классов, областью  $C$ , не конкретизируя, насколько плотным является такой охват. Допустим, на вход классификатора поступает новый образ  $X$ . Изобразим на рис. 2 возможные типичные положения проверяемого образа  $X$  в пространстве классов, отметив их точками и пронумеровав.

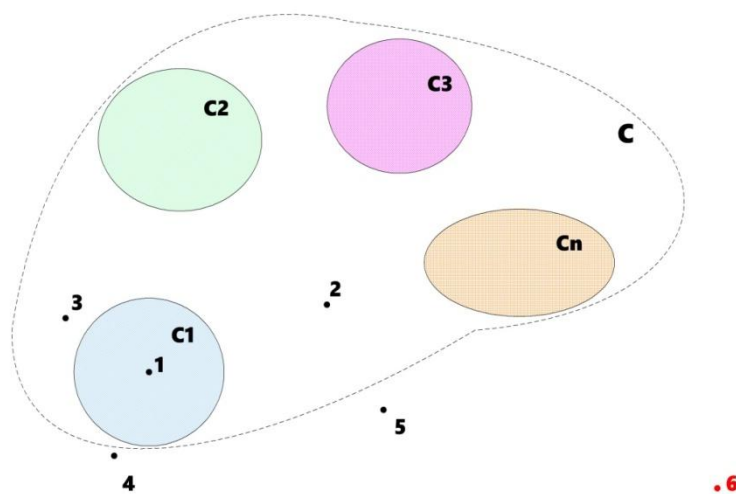


Рисунок 2. Возможные местоположения нового образа в пространстве известных классов

Выделим и опишем типичные ситуации расположения проверяемого образа в пространстве классов и около них, для удобства ссылаясь на номера точек с рис. 2:

**Точка 1** может находиться в любой точке внутри любого из известных классов.

**Точка 2** может находиться в любой достаточно удаленной от границ известных классов точке области  $S$ .

**Точка 3** может находиться в любой точке вблизи границ известных классов внутри области  $S$ .

**Точка 4** может находиться в любой точке вблизи границ любого из известных классов вне области  $S$ .

**Точка 5** может находиться в любой точке за пределами области  $S$  вблизи от её границ.

**Точка 6** может находиться в любой значительно удаленной от границ области  $S$  точке.

Рассмотрим каждый случай в отдельности. В первом случае, когда новый образ однозначно принадлежит области одного из известных классов, классификатор с большой вероятностью определит класс верно.

Во втором случае, когда образ  $X$  равноудален от всех известных классов, результат работы статического классификатора может быть непредсказуем и, в любом случае, окажется неверным, поскольку в данном случае  $X$  является представителем нового класса. Однако статический классификатор, обученный на образах только  $n$  классов, будет продолжать относить поступающие образы нового класса к известным ему классам. После обнаружения такого случая становится необходимым дообучение классификатора парами «образ-новый класс».

В третьем случае, образ  $X$  может быть, как искаженным или зашумленным образом известного класса, так и новым образом известного класса, который расширяет его. В данном случае, для последующей достоверной классификации таких образов необходимо дообучение статического классификатора.

В четвертом случае, образ  $X$  также может быть, как видоизмененным образом известного класса, так и новым образом, расширяющим границы известного класса. Как и в предыдущем случае, для последующей достоверной классификации таких образов необходимо дообучение классификатора.

В пятом случае, образ  $X$  является образом нового, несуществующего в исходной постановке задачи класса. Поскольку образ  $X$  не похож ни на один из образов известных классов и лежит вне области известных классов, ответ статического классификатора снова будет непредсказуем и априори ошибочен. Для обеспечения последующей достоверной классификации таких образов требуется дообучение классификатора примерами нового класса.

В последнем случае, образ  $X$  является аномальным по отношению ко всей области известных классов, поскольку лежит далеко от границ области  $S$ , что говорит о ярко выраженном отличии образа от классифицируемых данных. При обнаружении такого случая рекомендуется привлечь эксперта для расследования причин, вызвавших появление такого образа. В зависимости от области применения, аномалия может быть охарактеризована как авария, неисправность, ошибка функционирования или компьютерная атака.

Таким образом, можно выделить два основных типа ошибки статического классификатора, которых необходимо избежать при построении метода классификации нестационарных данных – отнесение образа нового класса к старому классу, и отнесение аномального, подозрительного образа, к одному из известных классов.

Предлагаемая методика классификации, основанная на обнаружении новизны с помощью автокодировщика, позволяет отнести проверяемые входные образы к одному из перечисленных выше случаев, обеспечив достоверную классификацию нестационарных данных, а также определить необходимость дообучения в автоматическом режиме.

Для детектирования каждого из шести вышеописанных случаев предлагается построить комплекс классификации на основе нейронных сетей. Комплекс состоит из параллельно соединённых статического классификатора и  $n+1$  автокодировщиков (рис. 3).

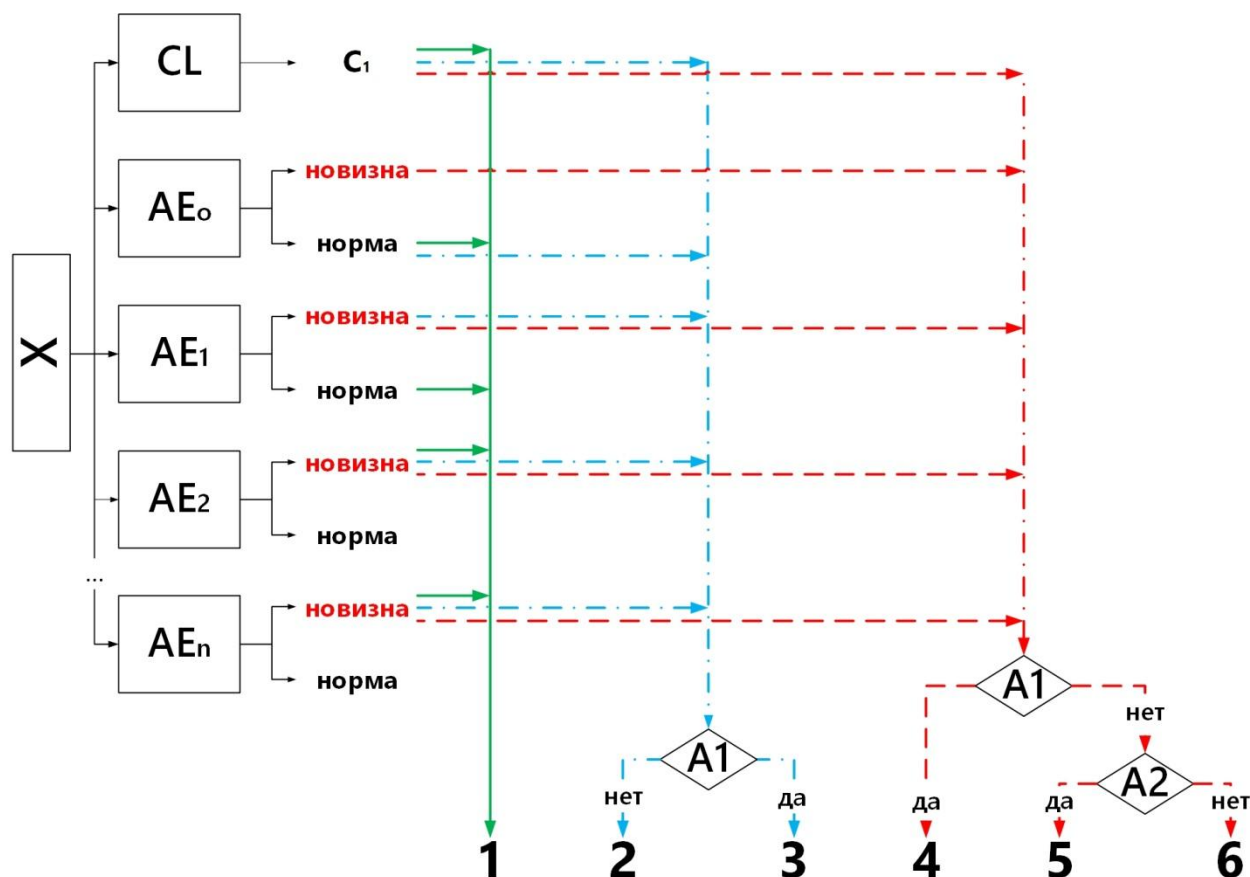


Рисунок 3. Структура комплекса классификации

В качестве статического классификатора ( $CL$ ) может выступать любой классификатор, в том числе, нейросетевой. Он должен обучаться с учителем и относить поступающий на его вход образ к одному из известных классов. Каждый из  $n$  автокодировщиков ( $AE_1, AE_2, \dots, AE_n$ ) должен быть обучен без учителя воспроизводить на выходе максимально точную реконструкцию образов одного из известных классов ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ). То есть автокодировщик  $AE_1$  обучается распознавать образы первого класса  $C_1$ , второй автокодировщик  $AE_2$  обучается распознавать образы второго класса  $C_2$  и т.д. Общий автокодировщик ( $AE_0$ ) обучается на всех образах известных классов ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ) из обучающей выборки. Алгоритм имеет следующие числовые параметры, которые определяются на этапе обучения и влияют на принятие решений об отнесении входного образа к тому или иному случаю:

- $IRE_{th\_AE_j}$  – пороговое значение автокодировщиков отдельных классов ( $AE_{j=1..n}$ );
- $IRE_{th\_AE_0}$  – пороговое значение общего автокодировщика ( $AE_0$ );
- $k$  – коэффициент пропорционального расширения границ классов, формируемых автокодировщиками.

Рассмотрим алгоритм работы комплекса классификации нестационарных данных. Будем считать, что статический классификатор и все автокодировщики заранее обучены. Проверяемый образ  $X$  поступает одновременно на вход классификатора и всех автокодировщиков. Комбинация полученных результатов обеспечивает принятие решения о местоположении

текущего образа относительно известных классов и общей области  $C$ , что позволяет осуществить достоверную классификацию входного образа.

Рассмотрим шесть возможных случаев при классификации нового образа  $X$ , детектируемых с помощью предложенной системы классификации.

Итак, если статический классификатор  $CL$  отнёс входной образ  $X$  к одному из известных классов  $C_{j=1..n}$ ; при этом общий автокодировщик  $AE_o$ , обученный на образах всех известных классов, подтвердил принадлежность образа к области  $C$ ; а также автокодировщик  $AE_j$ , обученный на образах соответствующего класса  $C_j$ , подтвердил, что образ  $X$  принадлежит классу  $C_j$ , то в этом случае поступивший образ  $X$  классифицируется комплексом как образ класса  $C_j$ . Это вариант классификации «1» на рис. 3.

В случае, если статический классификатор  $CL$  отнёс входной образ  $X$  к одному из известных классов  $C_{j=1..n}$ ; при этом общий автокодировщик  $AE_o$ , обученный на образах всех известных классов, подтвердил принадлежность образа к области  $C$ ; а все остальные автокодировщики  $AE_{j=1..n}$ , настроенные на распознавание образа своего класса, сочли образ  $X$  неизвестным; и условие  $A1: IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$  не выполняется, то в этом случае поступивший образ  $X$  классифицируется системой как образ нового класса  $C_{n+1(in)}$  внутри области  $C$ . При этом необходимо создать новый автокодировщик, который должен быть обучен распознавать образы нового класса, а также дообучить статический классификатор и общий автокодировщик распознавать  $n+1$  класс. Это вариант классификации «2» на рис. 3.

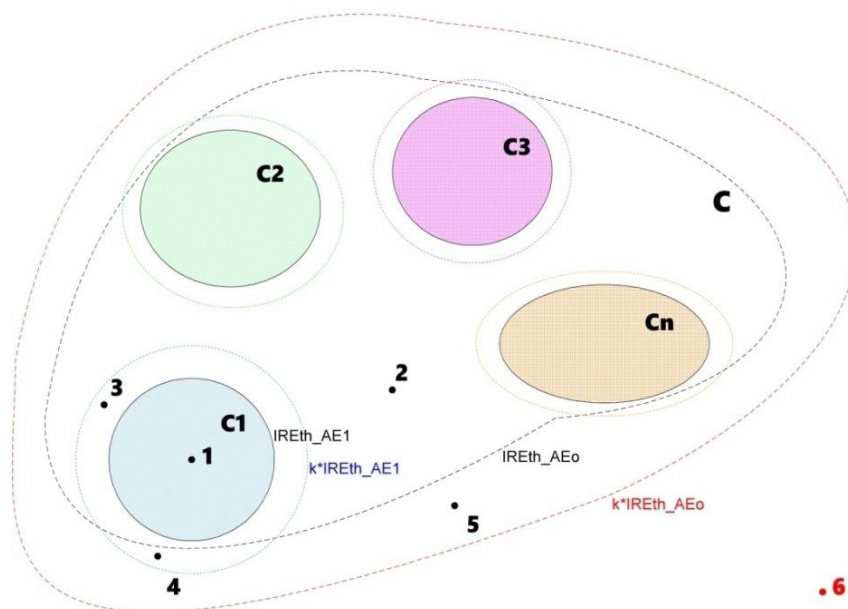
Если статический классификатор  $CL$  отнёс входной образ  $X$  к одному из известных классов  $C_{j=1..n}$ ; при этом общий автокодировщик  $AE_o$ , обученный на образах всех известных классов, подтвердил принадлежность образа к области  $C$ ; а все остальные автокодировщики  $AE_{j=1..n}$ , настроенные на распознавание образа своего класса, сочли образ  $X$  неизвестным; и условие  $A1: IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$  выполняется, то в этом случае поступивший образ  $X$  классифицируется системой как видоизменённый образ известного класса  $C_j$ , который необходимо расширить до  $C_{jM(in)}$  путём дообучения соответствующего автокодировщика  $AE_j$ , общего автокодировщика  $AE_o$  и классификатора  $CL$ . Это вариант классификации «3» на рис. 3.

В том случае, когда статический классификатор  $CL$  отнёс входной образ  $X$  к одному из известных классов  $C_{j=1..n}$ ; при этом общий автокодировщик  $AE_o$ , обученный на образах всех известных классов, также, как и все остальные автокодировщики, не распознал образ  $X$ ; и при этом выполнилось условие  $A1: IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$ , то в этом случае поступивший образ  $X$  классифицируется системой как видоизменённый образ известного класса  $C_j$ , который необходимо расширить до  $C_{jM(out)}$  путём дообучения соответствующего автокодировщика  $AE_j$ , общего автокодировщика  $AE_o$ , а также статического классификатора  $CL$ . Это вариант классификации «4» на рис. 3.

В ситуации, аналогичной рассмотренной за исключением выполнения условия  $A1$  возможно два варианта: либо образ  $X$  образует новый класс вне текущей области  $C$  и тогда необходимо дообучение всех классификаторов для распознавания образов нового класса, либо образ  $X$  является аномалией. Отделить два этих случая можно с помощью проверки ещё одного условия –  $A2: IRE_{AE_o}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_o}$ . Если условие  $A2$  выполняется, то образ образует новый класс – это вариант «5» на рис. 3. Если условие  $A2$  не выполняется, то обнаружена аномалия и этот случай отмечен на рис. 3, как вариант «6».

Проверку условий  $A1$  и  $A2$  удобно проиллюстрировать графически на рис. 4. Пороговое значение ошибки реконструкции, выбранное для каждого автокодировщика, можно интерпретировать как границу класса, если это автокодировщик, обученный на образах этого класса, и как границу области  $C$ , если говорить об общем автокодировщике, обученном на образах всех известных классов. Таким образом, если ошибка реконструкции для образа

Х превышает установленный для автокодировщика порог распознавания, то это означает, что точка, соответствующая данному образу в пространстве классов, находится за пределами области, известной автокодировщику. Считая, что чем больше ошибка реконструкции для образа превышает порог, тем дальше образ находится от границ области, известной автокодировщику, был выдвинут ещё один пороговый критерий, позволяющий очертить область большего «радиуса», границей которой является  $k \cdot IRE_{th}$ . Это обеспечит более точное определение местоположения нового образа в пространстве классов.



**Рисунок 4. Детектирование местоположения нового образа в пространстве известных классов с помощью автокодировщика**

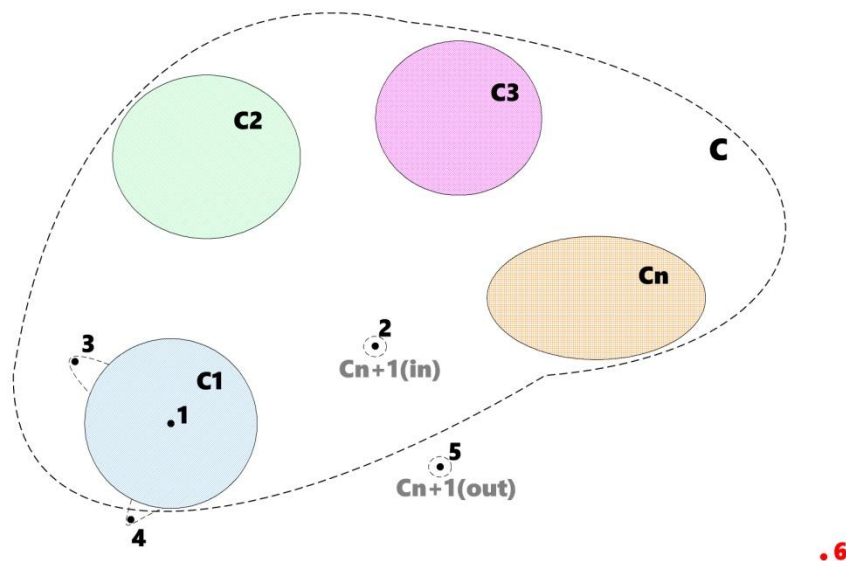
Исходная граница области  $C$  показана на рис. 4 черной пунктирной линией, ей соответствует пороговое значение  $IRE_{th\_AE0}$ , рассчитанное для общего автокодировщика  $AE_0$ , обученного на образах всех известных классов. Увеличение порогового значения на коэффициент  $k$  означает пропорциональное расширение границ исходной области. Дополнительная граница для области  $C$  отображена на рисунке красной пунктирной линией и ей соответствует значение  $k \cdot IRE_{th\_AE0}$ . Такая граница аналогичным образом может быть проведена для каждого известного класса. Коэффициент пропорциональности  $k$  должен быть положительным числом больше единицы и может быть выбран эмпирическим путём. Таким образом, критерий  $A1$  позволяет определить, насколько новый образ близок к границе класса, и тем самым позволяет разграничить положение 2 и 3, а также положение 4 от положений 5 и 6. Критерий  $A2$  позволяет отличить случай 6, когда образ является аномалией, от случая 5, когда образ является представителем нового класса. Кроме того, отличить случай 5 от случая 6 можно не только на основе степени превышения порога, но и на основе частоты повторного появления рассматриваемого образа. Исходя из предположения о том, что для образцов нового класса степень превышения порога будет меньше, чем для аномальных образцов, и о том, что образцы нового класса будут встречаться чаще, чем аномалии, можно разработать двумерный критерий обнаружения аномалий, который будет учитывать несколько параметров.

Иначе говоря, условие  $A1: IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$  позволяет проверить, меньше ли значение ошибки, с которой автокодировщик  $AE_j$  восстанавливает новый образ  $X_i$ , чем пороговое значение ошибки реконструкции, установленное для автокодировщика  $AE_j$ , увеличен-

ное на коэффициент пропорциональности  $k$ , расширяющий границы класса  $C_j$ . Если значение ошибки реконструкции образа  $X(IRE_{AE_j}(X))$  меньше, чем пороговое значение ошибки реконструкции, увеличенное на коэффициент пропорциональности  $k$ , то образ  $X$  находится вблизи границ известного класса. А условие  $A2: IRE_{AE_o}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_o}$  позволяет проверить, меньше ли значение ошибки, с которой общий автокодировщик  $AE_o$  восстанавливает новый образ  $X$  чем пороговое значение ошибки реконструкции, установленное для общего автокодировщика  $AE_o$ , увеличенное на коэффициент пропорциональности  $k$ , расширяющий границы области  $C$ . При этом, если значение ошибки реконструкции образа  $X(IRE_{AE_o}(X))$  меньше, чем пороговое значение ошибки реконструкции, увеличенное на коэффициент пропорциональности  $k$ , то образ  $X$  находится далеко за пределами границ области известных классов  $C$ .

Таким образом, комплекс обеспечивает распознавание и принятие решения по следующим случаям:

1. Образ  $X$  принадлежит к одному из известных классов, например, к  $C_1$ ;
2. Образ  $X$  принадлежит новому классу  $C_{n+1(in)}$  внутри области  $C$ ;
3. Образ  $X$  – новый образ известного класса и принадлежит расширенному в пределах области  $C$  классу  $C_1$ ;
4. Образ  $X$  – новый образ известного класса и принадлежит расширенному за пределы области  $C$  классу  $C_1$ ;
5. Образ  $X$  принадлежит новому классу  $C_{n+1(out)}$  вне области  $C$ ;
6. Образ  $X$  – аномалия.



**Рисунок 5. Варианты классификации нового образа в пространстве известных классов**

Предлагаемая модель обеспечивает определение различных изменений в классифицируемых данных и осуществляет достоверную классификацию нестационарных данных в условиях появления новых классов и аномалий на основе ответов каждой нейронной сети комплекса. Решения комплекса классификации формально можно представить в виде правил, относящих входной образ  $X$  к одному из шести случаев результата классификации в зависимости от ответа каждого классификатора. Для компактности записи правила ответ классифи-

каторов о принадлежности образа к тому или иному классу представлен в виде: «Имя классификатора: ответ». Правила классификации комплекса выглядят следующим образом:

- 1) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \in C$  и  $AE_j: X \in C_j$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}/\{j\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}/\{j\}}$ , то  $X \in C_j$ ;
- 2) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \in C$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}}$  и  $IRE_{AE_j}(X) > k \cdot IRE_{th\_AE_j}$ , то  $X \in C_{n+1(in)}$  внутри области  $C$ ;
- 3) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \in C$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}}$  и  $IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$ , то  $X \in C_{jM(in)}$ , где  $C_{jM(in)}$  – расширенный в пределах области  $C$  класс  $C_j$ ;
- 4) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \notin C$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}}$  и  $IRE_{AE_j}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_j}$ , то  $X \in C_{jM(out)}$ , где  $C_{jM(out)}$  – расширенный за пределы области  $C$  класс  $C_j$ ;
- 5) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \notin C$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}}$  и  $IRE_{AE_j}(X) > k \cdot IRE_{th\_AE_j}$  и  $IRE_{AE_o}(X) < k \cdot IRE_{th\_AE_o}$ , то  $X \in C_{n+1(out)}$ , где  $C_{n+1(out)}$  – новый класс вне области  $C$ ;
- 6) если  $CL: X \in C_j$  и  $AE_o: X \notin C$  и  $AE_{\{1, \dots, n\}}: X \notin C_{\{1, \dots, n\}}$  и  $IRE_{AE_j}(X) > k \cdot IRE_{th\_AE_j}$  и  $IRE_{AE_o}(X) > k \cdot IRE_{th\_AE_o}$ , то  $X$  – аномалия.

Алгоритм классификации образов в условии нестационарности классов реализуется в два этапа, представленных далее.

#### *Этап подготовки комплекса классификации*

- Шаг 1. Подготовка обучающей выборки для настройки распознавания образов  $n$  известных классов статическим классификатором  $CL$ ;
- Шаг 2. Обучение статического классификатора  $CL$  с учителем;
- Шаг 3. Обучение каждого автокодировщика  $AE_j$  без учителя на образах класса  $C_j$ ;
- Шаг 4. Расчёт порогового значения распознавания образов для каждого автокодировщика  $IRE_{th\_AE_j}$ ;
- Шаг 5. Обучение общего автокодировщика  $AE_o$  без учителя на образах всех известных классов  $C_{j=1..n}$ ;
- Шаг 6. Расчёт порогового значения распознавания образов для общего автокодировщика  $IRE_{th\_AE_o}$ .

#### *Этап классификации с использованием комплекса*

- Шаг 1. Предъявление нового образа  $X$  на вход комплекса, состоящего из параллельно соединённых нейронных сетей:  $CL$ ,  $AE_o$  и  $AE_{j=1..n}$ ;
- Шаг 2. Если результат классификации образа равен «1», то переходим к следующему шагу. Если результат классификации «2», «3», «4», «5», то переходим к шагу 4. Если результат классификации «6», то переходим к шагу 5.
- Шаг 3. Результат классификации  $CL$  верен, новизны в данных не обнаружено.
- Шаг 4. Адаптация к изменениям и дообучение классификаторов, а именно:
  - а) В случае «2» для распознавания образов нового класса  $C_{n+1(in)}$ , образовавшегося в пределах области  $C$ , создается и обучается новый автокодировщик  $AE_{n+1}$ , дообучается общий автокодировщик  $AE_o$  и статический классификатор  $CL$ ;
  - б) В случае «3» для распознавания новых образов известного класса  $C_j$ , расширенного в пределах области  $C$ , дообучается общий автокодировщик  $AE_o$ , автокодировщик  $AE_j$  и статический классификатор  $CL$ ;
  - в) В случае «4» для распознавания новых образов известного класса  $C_j$ , расширенного за пределы области  $C$ , дообучается общий автокодировщик  $AE_o$ , автокодировщик  $AE_j$  и статический классификатор  $CL$ ;



г) В случае «5» для распознавания образов нового класса  $C_{n+1(out)}$ , образовавшегося за пределами области  $C$ , создается и обучается новый автокодировщик  $AE_{n+1}$ , дообучается общий автокодировщик  $AE_o$  и статический классификатор  $CL$ .

Шаг 5. Входной образ  $X$  является аномалией и не может быть обработан в рамках изложенной системы правил.

Описанный алгоритм позволяет не только классифицировать поступающий на вход комплекса образ, но и динамически корректировать поведение классификатора, расширяя границу классов и даже определяя новые классы.

Предполагается, что предложенный метод сделает возможной достоверную классификацию образов в условиях нестационарности классов, расширив сферу применения нейросетевых классификаторов на сложные задачи, касающиеся интеллектуальных систем диагностики, обнаружения аномалий и выявления компьютерных атак.

Для изучения свойств предложенного метода в рамках будущих исследований необходимо провести экспериментальную апробацию. Методика такой апробации может быть основана на синтетических данных малой размерности (например, 2 или 3), что позволит удобно визуализировать как сами образы в виде точек на плоскости, так и области классов подобно тому, как это изображено на рис. 2 и рис. 4. Для моделирования рассмотренных ситуаций в рамках экспериментальной методики должны быть многократно проверены все шесть рассмотренных случаев.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к методике апробации подхода:

- 1) исходные данные должны быть визуализируемы в двумерном или трёхмерном пространстве;
- 2) необходим большой набор синтетических данных для тестирования;
- 3) необходимо получить подтверждение достоверной классификации при многократном рассмотрении всех шести случаев.

### Обсуждение

Для предложенного подхода характерна большая ресурсоемкость на этапе подготовки комплекса и его дообучения, однако это необходимо для обеспечения динамической и достоверной классификации новых образов. Достоверность классификации обеспечивается за счёт оценки близости классифицируемых данных к границам известных классов и обнаружения новизны в данных с помощью автокодировщиков. Метод позволяет определить природу нового образа и различать представителей нового класса от не вошедших в обучающую выборку образов известного класса и аномалий, требующих внимания эксперта. Обнаружение новизны в данных позволяет своевременно применить алгоритм дообучения и не только избежать ошибок при классификации, но и достичь высокой точности классификации на неизвестных данных.

Особенность подхода состоит в прямой взаимосвязи между количеством классов и количеством автокодировщиков, что может затруднить применение подхода в задачах со значительным и постоянно растущим числом классов. Также стоит отметить, что в данной работе не рассматривался случай близко расположенных классов и пересекающихся областей притяжения, формируемых коэффициентом  $k$ .

К объективным недостаткам подхода можно отнести следующие:

- 1) свойства границ, формируемых автокодировщиками, слабо изучены;



2) ресурсоемкость, обусловленная применением нейросетей и их обучением в процессе работы комплекса;

3) появление новых классов приводит к добавлению новых автокодировщиков и усложнению архитектуры комплекса.

При этом предлагаемый подход обладает рядом достоинств:

1) устранение ошибок классификатора на новых данных;

2) отнесение входного образа к известному классу возможно даже в случае, когда статический классификатор не распознаёт образ;

3) возможность обнаружения аномалий;

4) параметров алгоритма классификации немного, и они имеют понятный смысл;

5) дообучение комплекса осуществляется только по необходимости.

### Заключение

В работе предложен новый метод динамической классификации в условиях нестационарности классов, обеспечивающий выявление новизны в данных и необходимости дообучения для адаптации классификатора к распознаванию новых данных. Сформулированы требования к модели для апробации метода. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальное подтверждение эффективности предложенного метода на примере классификации синтетических данных в условиях нестационарности классов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### Библиографический список

1. **Лукьянова, Н.В.** Обработка и классификация нестационарных сигналов при помощи самоорганизующихся нейросетей / Н.В. Лукьянова, И.П. Полякова // Вестник Брянского Государственного Технического Университета, т. 1(25), pp. 77-83, 2010.

2. **Кирвас, А.В.** Алгоритм обучения нейронной сети для классификации нестационарных данных в режиме реального времени. 2006. [В Интернете]. Available: [www.hups.ml.gov.ua/perodc-app/artcle/4846/so\\_2006\\_1\\_15.pdf](http://www.hups.ml.gov.ua/perodc-app/artcle/4846/so_2006_1_15.pdf). [Дата обращения: 20 Января 2020].

3. **Харламов, А.А.** Автоматический структурный анализ текстов // Открытые системы, № 10, pp. 62-65, 2002.

4. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс. 2-е ред., Издательский дом “Вильямс”, 2006, p. 1104.

5. **Поляков, П.Ю.** Российский семинар по оценке методов информационного поиска // П.Ю. Поляков, В.В. Плешко, А.Е. Ермаков // Труды РОМИП 2009.

6. **Солдатова, О.П.** Классификация потока системных ошибок с помощью гибридной модификации нейронной сети Ванга-Менделя / О.П. Солдатова, Е.М. Пудикова // Известия Самарского научного центра РАН, № 4-2, 2014.

7. **Жуков, А.В.** Модификация алгоритма случайного леса для классификации нестационарных потоковых данных / А.В. Жуков, Д.Н. Сидоров // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование, № 4, 2016.

8. **A. Gurina, V. Eliseev,** Anomaly-Based Method for Detecting Multiple Classes of Network Attacks. Information, № 10(3):84, 2019.

**NEURAL NETWORK METHOD OF CLASSIFICATION FOR  
NON-STATIONARY SET OF CLASSES**

The problem of classifying samples under dynamic changes in classes is considered. Such problems arise, for example, during diagnosing the operation modes of non-stationary control objects and dynamically classifying events in computer intrusion detection systems. The main problems which arise during classifying samples of non-stationary classes are formulated. An original approach is proposed to combine a traditional classification with novelty analysis to verify the reliability of the classifier's response and identify the need for additional training of the classifier. This approach uses artificial neural networks to classify and analyze the novelty of the input data. The requirements for the experimental evaluation method of the proposed approach are formulated.

**Keywords:** artificial neural networks, autoencoder, anomaly detection, novelty detection, dynamic classification, non-stationary model.

М.А. Ивлев, В.П. Хранилов

## ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассмотрены принципы, концепции и конкретные требования эргономики, направленные на разработку радиоэлектронных средств с высокими эргономическими показателями качества. На основе системного подхода сформулировано концептуальное представление внешнего интерфейса радиоэлектронных средств как важного компонента активной системы – человеко-ориентированного комплекса, – компонента, обеспечивающего его эффективное функционирование. Показана роль эргономического подхода к разработке внешнего интерфейса. Приведены примеры эргономических требований, предъявляемых к интерфейсам радиоэлектронных средств и основанных на антропометрических, физиологических и психологических особенностях человека. Их выполнение целенаправленно обеспечит длительную, безошибочную, неутомляемую работу оператора в частности, и всей человеко-машинной системы в целом.

**Ключевые слова:** эргономическое проектирование, внешний интерфейс, человеко-машинные системы, антропометрические, физиологические и психологические особенности оператора радиоэлектронного оборудования.

### **Введение. Концепция интерфейсов «человек – радиоэлектронные средства»**

Концепция внешних интерфейсов радиоэлектронных средств развивает традиционное представление интерфейсов технических систем на область активных систем, в которых главным «компонентом» является человек [1-4]. Проектирование взаимодействия человек – радиоэлектронные средства (РЭС) должно базироваться на предварительном анализе условий применения РЭС, видов и особенностей операций пользователей, специфики задач и результатов их выполнения. Такой анализ позволит результативно решить первую задачу проектирования внешнего интерфейса – задачу распределения функций и задач между человеком–оператором и изделиями РЭС.

Проект внешнего интерфейса человеко-машинной системы должен включать структурированное описание того, как пользователи будут выполнять производственные задания с использованием изделий РЭС, а не только того, что представляют собой радиоэлектронные средства.

Следующими задачами проектирования внешнего интерфейса являются выбор и обоснование: способа представления человеку информации о режимах работы РЭС (например, звуковой, зрительной и тактильной), выбор формы представления информации, например в виде текста или графики, диалоговых окон или других программных инструментов. Кроме того, необходимо выполнить обоснование и определение механических, электронных или виртуальных органов управления, а также вспомогательных установочных элементов (например, средств ввода информации в изделие РЭС).

Применяемые при проектировании внешних интерфейсов РЭС стандарты человеко-ориентированного проектирования [4] устанавливают рассмотренные далее семь основных эргономических принципов создания интерактивных систем в общем виде (то есть без привязки к расположению системы, окружающей среде и технологии изготовления) и служит основой для применения этих принципов при проведении анализа, проектировании и оценке таких систем.

Принципами, которые применяются при проектировании и оценке интерактивных систем и рассматриваются как набор общих целей при проектировании и критериев оценки диалога, установлены [5-7]:

- *Приемлемость организации диалога для выполнения производственного задания*

Интерактивная система соответствует производственному заданию, если она помогает пользователю выполнять производственное задание, то есть функциональность и диалог основаны на особенностях производственного задания, а не на выборе метода выполнения производственного задания.

В процессе диалога пользователю должна быть предоставлена информация об успешном завершении производственного задания. Предоставление избыточной информации может привести к снижению производительности и излишней умственной нагрузке при выполнении производственного задания. Формат ввода и вывода должен соответствовать производственному заданию. Если для выполнения производственного задания требуются типовые настройки, то значения таких настроек должны устанавливаться в автоматическом режиме как значения по умолчанию.

- *Информативность*

Информация, представленная пользователю на любом шаге диалога с машиной, должна способствовать завершению диалога. Информация включает руководящие указания, обратную связь, информацию о состоянии диалога и т. д.

При проведении диалога необходимость в обращении к руководству пользователя и использовании другой внешней информации должна быть сведена к минимуму. Диалоги должны быть разработаны так, чтобы взаимодействие с интерактивной системой было понятным пользователю. Интерактивная система должна предоставить пользователю информацию об используемых форматах и единицах измерения.

- *Соответствие ожиданиям пользователей*

Диалог соответствует ожиданиям пользователей, если он соответствует предсказуемым, зависящим от области применения требованиям пользователя и обычно принимаемым соглашениям.

Если реальное время реакции системы на действия пользователя значительно отклоняется от времени, ожидаемого пользователем, то пользователь должен быть проинформирован об этом. Тип и объем обратной связи или пояснений должны соответствовать потребностям пользователей.

- *Пригодность для обучения*

Диалог является пригодным для обучения, если он помогает пользователю изучать инструкции по использованию системы.

Пользователю должна быть оказана соответствующая поддержка при его ознакомлении с диалогом (меню, подсказки). Обратная связь или пояснения должны помочь пользователю в формировании понимания интерактивной системы.

- *Контролируемость (управляемость)*

Диалог является контролируемым, если пользователь имеет возможность инициировать и контролировать направление и темп диалогового взаимодействия до того момента, пока цель не достигнута.

Темп взаимодействия между пользователем и системой должен определяться пользователем. Он должен иметь возможность выбора вариантов продолжения диалога. Если операции производственного задания являются обратимыми, то пользователь должен иметь возможность отменить, по крайней мере, последний этап диалога.

- *Устойчивость к ошибкам*

Диалог является устойчивым к ошибкам, если, несмотря на очевидные ошибки на входе, предполагаемый результат может быть достигнут или без корректирующих воздействий, или с минимальными корректирующими воздействиями пользователя.

Интерактивная система должна помогать пользователю в обнаружении и предупреждении ошибок на входе. Интерактивная система должна предупреждать любые действия пользователя, которые могут привести к возникновению неопределенных состояний интерактивной системы (зависания) или ее отказу.

Если ошибка произошла, то ее происхождение должно быть объяснено пользователю для облегчения исправления. Должна быть предусмотрена активная системная поддержка исправления типовых ошибок.

- *Адаптируемость к индивидуальным особенностям пользователя.*

Диалог является адаптируемым к индивидуальным особенностям применения, если пользователи могут внести изменения в формат взаимодействия с системой и в формы представления информации для того, чтобы удовлетворить свои индивидуальные возможности и потребности. Адаптируемость диалога должна быть реверсивной и должна позволять пользователю возвращаться к первоначальным параметрам настройки (первоначальному режиму функционирования системы).

### ***Эргономический подход в проектировании внешних интерфейсов РЭС***

При эргономическом проектировании внешних интерфейсов РЭС необходимо учитывать следующие факторы:

- назначение системы, продукции или услуги;
- характеристики предполагаемой совокупности пользователей;
- цели, которые должны быть достигнуты и задачи, которые предстоит выполнить;
- существующие ограничения (например, устаревшее оборудование);
- факторы физической, организационной и социальной среды;
- жизненный цикл и любые динамические изменения в нем.

На рис. 1 приведен пример факторов, которые должны быть учтены при эргономическом подходе к проектированию. Деятельность человека показана как центральный элемент функциональности системы. В определенных условиях проектирования могут существовать дополнительные факторы.

Эргономический подход к проектированию должен быть ориентирован на человека. Это означает, что все проектируемые компоненты системы, продукции или услуги приводят в соответствие с характеристиками предполагаемых пользователей, операторов или работников, а не наоборот – не проводят отбор и/или адаптацию людей, чтобы их характеристики соответствовали системе, продукции или услуге.

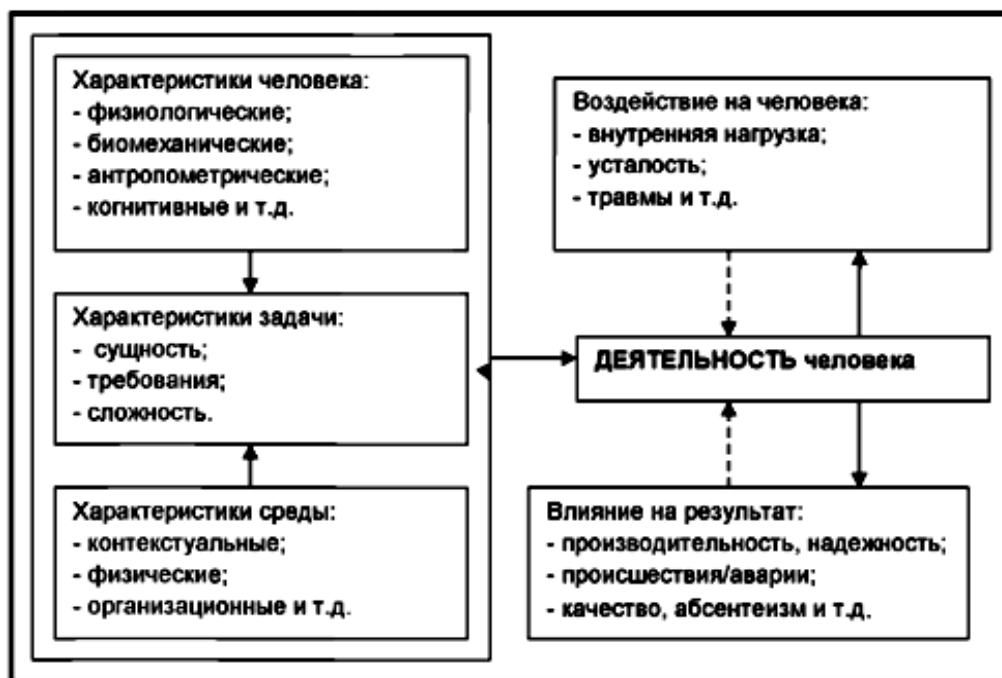


Рисунок 1. Пример факторов, которые следует учитывать при проектировании внешних интерфейсов РЭС

Далее приведены примеры эргономических требований, которым должны соответствовать внешние интерфейсы при разработке информационно-управляющих радиоэлектронных систем [8-11].

1. Рабочие зоны средств отображения информации (СОИ) и органов управления (ОУ) следует выбирать в соответствии с рис. 2.

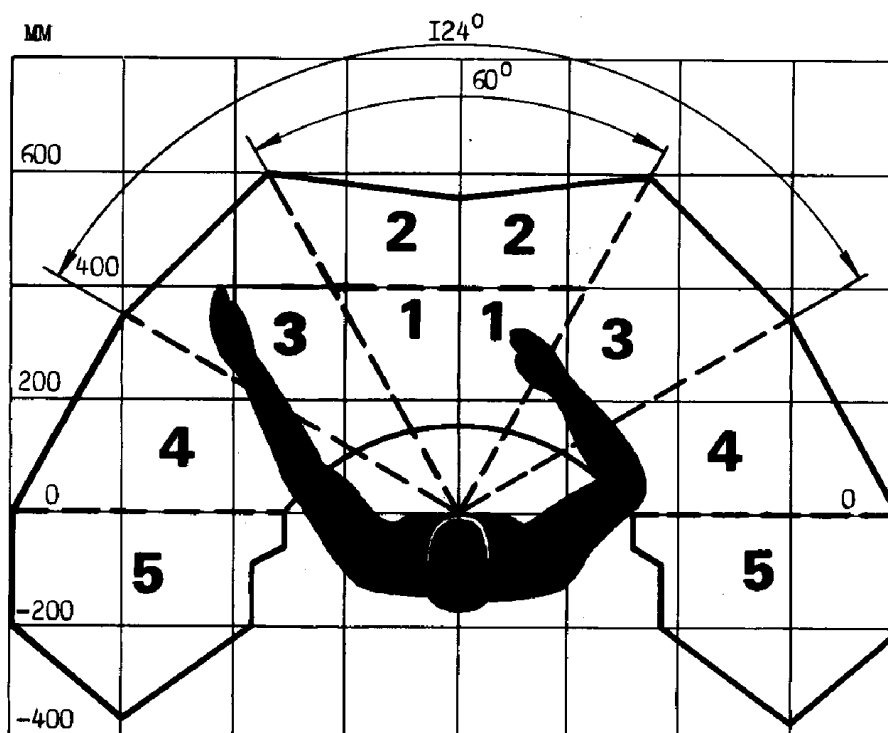


Рисунок 2. Рабочие зоны размещения индикаторов и органов управления

На рис. 2 обозначены: 1 – зона для размещения наиболее важных и часто используемых ОУ; 2 – зона для размещения наиболее важных СОИ; 3– зона для размещения СОИ и ОУ; 4 – зона для размещения редко используемых ОУ; 5 – зона для размещения вспомогательных ОУ.

2. Оператор должен работать сидя, если требуется непрерывное наблюдение за показаниями индикатора.

3. При необходимости наблюдения за показаниями приборов, расположенных за пределами оборудования, его высота должна быть:

- а) при работе сидя - не более 1100 мм,
- б) при работе стоя - не более 1650 мм.

При проектировании внешних объемов изделия ЭС необходимо учитывать пространственные, функциональные и информационные связи ЭС:

- с другими изделиями ЭС (компоновка рабочего места),
- со средой (в заданных условиях эксплуатации),
- с антропологическими, физиологическими, биомеханическими и психологическими характеристиками людей, обслуживающих ЭС.

Таким образом, изделие ЭС необходимо рассматривать как элемент системы «человек - изделие ЭС – среда».

Кроме того, при проектировании внешних объемов изделий ЭС необходимо учесть:

- факторы, определяющие время восприятия информации (тип, количество, размеры индикаторов);
- факторы, определяющие время оценки и переработки информации оператором (способы кодирования, объем отображения информации, динамика смены информации);
- факторы, определяющие время исполнительных действий (тип, число, размеры, форма органов управления).

### **Заключение**

Таким образом, применение принципов эргономического (человеко-ориентированного) проектирования внешних интерфейсов РЭС требует при разработке объекта:

- проведения анализа возможностей по разработке объекта в соответствии с требуемым уровнем качества функционирования человеко-машинного комплекса;
- идентификации факторов, ограничивающих эти возможности;
- идентификации способов снижения влияния таких факторов и снижения соответствующего риска.

Применение принципов эргономического проектирования при разработке внешних интерфейсов и основанных на них «диалогов» человека и радиоэлектронных средств позволяет не только достичь человеко-ориентированного качества взаимодействия, но и существенно сократить продолжительность его достижения (проектирования).

Для изделий РЭС, обладающих человеко-ориентированным внешним интерфейсом, характерны более высокая пригодность использования, доступность, удовлетворенность пользователя и более полное, цельное восприятие пользователем изделия, а также более низкий риск ошибок при его использовании.

## Библиографический список

1. **Ивлев, М.А.** Методология и интерактивная технология концептуального управления производственно-экономическими системами // Организатор производства. 2011. №3(50). С.24–28.
2. **Ивлев, М.А.** Архитектура и циклы проектирования электронных средств: учеб. пособие / М.А. Ивлев; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. –160 с.
3. Эргономические требования к рабочим местам и средствам управления машинами и механизмами. Методические рекомендации. [http://www.libussr.ru/doc\\_ussr/usr\\_9885.htm](http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_9885.htm).
4. **Мунипов, В.П.** Эргономика: человеко-ориентированное проектирование техники, программных средств и среды: Учебник. – М.: Логос, 2001. – 356 с.. ил.
5. ГОСТ 12.2.049–80 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
6. ГОСТ 12.2.033–78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
7. ГОСТ 12.2.032–78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
8. ГОСТ Р 29.05.008–96 Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Рабочее место диспетчера служб управления воздушным движением. Общие эргономические требования.
9. ГОСТ Р 29.08.004–96 Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Рабочее место диспетчера служб управления воздушным движением. Методы оценки соответствия общим эргономическим требованиям.
10. ГОСТ Р ИСО 15534–3–2007 Эргономическое проектирование машин для обеспечения безопасности. Часть 3. Антропометрические данные.
11. ГОСТ 23000–78 Система «Человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.

**M.A. Ivlev, V.P. Khranilov**

### **ERGONOMIC DESIGN BASIS OF EXTERNAL INTERFACES ELECTRONIC DEVICES**

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The principles, concepts and specific requirements of ergonomics aimed at the development of electronic equipment with high ergonomic quality indicators are considered. Based on a systematic approach, a conceptual representation of the external interface of electronic equipment as an important component of an active system – a human-oriented complex – a component that ensures its effective functioning, is formulated. The role of the ergonomic approach to the development of the external interface is shown. Examples of ergonomic requirements for interfaces of electronic devices and based on the anthropometric, physiological and psychological characteristics of a person are given. Their implementation will purposefully provide a long, error-free, tireless work of the operator in particular, and the entire human-machine system as a whole.

**Keywords:** ergonomic design, external interface, human-machine systems, anthropometric, physiological and psychological characteristics of the operator of electronic equipment.



## РАСПОЗНАВАНИЕ НОВИЗНЫ В ПОТОКЕ БИТОВ С ПОМОЩЬЮ LSTM

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва<sup>2</sup> ОАО «ИнфоТекС», г. Москва

В работе рассматривается задача обнаружения нетипичных последовательностей событий с помощью нейронной сети с обратными связями. Битовая строка представляет собой последовательность битов переменной длины, упрощенно моделирующая последовательность событий. Последовательность идущих друг за другом битовых строк образует поток битов. Ставится задача по выявлению аномальных, нехарактерных битовых строк в потоке битов. В нескольких модельных примерах рассматриваются различные варианты аномальных строк относительно нормальных, входящих в обучающую выборку. В качестве детектора аномалий используется искусственная нейронная сеть, содержащая ячейки с обратными связями – LSTM (Long Short – Term Memory). Исследуется структура нейронной сети с LSTM-ячейками. Предлагается критерий для обнаружения аномалий. Исследуются свойства построенного детектора.

**Ключевые слова:** обнаружение аномалий, обработка последовательностей, искусственные нейронные сети, LSTM.

## Введение

В настоящее время задача построения прогнозных моделей и прогнозирования с их помощью решается повсеместно. Этой задаче посвящено множество научных статей и работ по всему миру [2,3]. Цель построения прогнозных моделей состоит в том, чтобы предсказывать состояние процессов в будущем, основываясь на знании данных из прошлого. Для построения прогнозных моделей формируется обучающий набор выходных (целевых) и некоторых входных переменных, которые используются для обучения модели. Обученная модель на основе входных значений формирует целевые выходные, которые следует интерпретировать как прогноз. Задача алгоритма обучения заключается в том, чтобы обеспечить высокое качество предсказаний, само по себе, извлекая необходимые знания исключительно из имеющихся данных.

Данные, которые используются для построения прогнозных моделей, должны быть упорядочены в виде последовательностей, чтобы в процессе обучения была возможность извлечения неявных зависимостей выходных целевых значений от входных, распределенных во времени. Задача прогнозирования последовательностей может решаться статистическими методами, однако связанные с этими методами математические модели часто оказываются довольно сложными, и их структура требует обоснований. Таким образом, возникает желание использовать для анализа последовательностей искусственные нейронные сети (ИНС), поскольку параметризация ИНС универсальна, а методы обучения достаточно хорошо развиты.

С помощью искусственных нейронных сетей решаются различные задачи: классификация, кластеризация, анализ и синтез речи, изображений, текстов и прочие. Часто исходными данными для нейронной сети являются последовательности. Это могут быть временные ряды, предложения естественного языка, человеческая речь при распознавании и прочие данные,

представляемые в виде последовательностей. ИНС представляют собой математический инструмент, позволяющий моделировать разного рода зависимости. В частности, ИНС с обратными связями, называемые рекуррентными нейронными сетями, в некотором смысле обладают свойством памяти, то есть способностью к сохранению информации для ее последующего использования. Способность ИНС к обобщению и выявлению скрытых зависимостей между входными и выходными данными, в совокупности со свойством памяти рекуррентных сетей, приводит к идее об их применении при моделировании последовательностей.

Идея использования прогнозных нейросетевых моделей для обнаружения аномальных цепочек событий в потоке событий состоит в следующем. Некоторый поток событий может содержать множество однотипных цепочек событий, являющихся характерными для системы, в которой они происходят. Однако в потоке событий могут встречаться и нехарактерные цепочки, которые могут быть признаны аномальными для данной системы. Если создать прогнозную модель, которая будет использовать при обучении только поток событий, являющийся «нормальным» для системы, то можно ожидать, что ошибка прогноза при использовании настроенной модели с такими же «нормальными» данными не должна быть большой. Однако, если при использовании такой модели подать ей на вход поток, в который помимо «нормальных» цепочек событий местами будут включены «аномальные», то в местах такого включения можно ожидать большую ошибку прогноза. Этот эффект ожидаем, поскольку аномальные цепочки намеренно не подаются на вход модели на этапе обучения и поэтому на этапе использования они будут новыми для модели, так как она не настраивалась на их качественное воспроизведение. В таком случае использование сигнала ошибки прогноза позволит определять наличие аномальных цепочек и их расположение в общем потоке.

В данной работе рассматривается упрощенная ситуация, когда поток событий представляет собой поток битов. То есть в потоке определено всего два вида событий, кодируемых состояниями «0» и «1». Цепочки событий представляют собой битовые строки. Для разных комбинаций нормальных и аномальных битовых строк генерируются нормальные и аномальные потоки битов. Создаются и обучаются нейросетевые прогнозные модели, и исследуется их поведение при работе с нормальным и аномальным потоком битов.

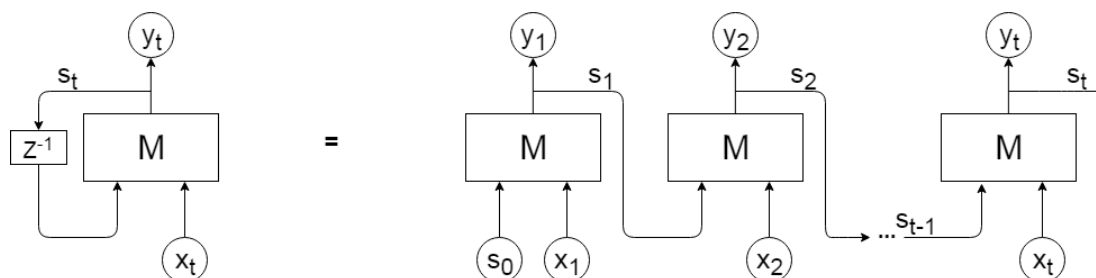
### Теоретический анализ

Рекуррентные нейронные сети хорошо подходят для обработки последовательностей, в частности, при решении задач прогнозирования. За счет наличия обратных связей они обладают свойством памяти и могут сохранять данные из прошлого, что, очевидно, полезно для прогнозирования. В рекуррентных сетях связи между нейронами могут идти не только от входного слоя к выходному, но и в обратном направлении. Сеть обучается использовать не только текущий вход, но и то, что происходило с выходом на предыдущих шагах.

Слева на рис. 1 фрагмент нейронной сети  $M$  принимает входное значение  $x_t$  и возвращает значение  $u_t$ , а также сохраняет скрытое состояние  $s_t$ . Наличие обратной связи позволяет передавать информацию от одного шага сети к другому.

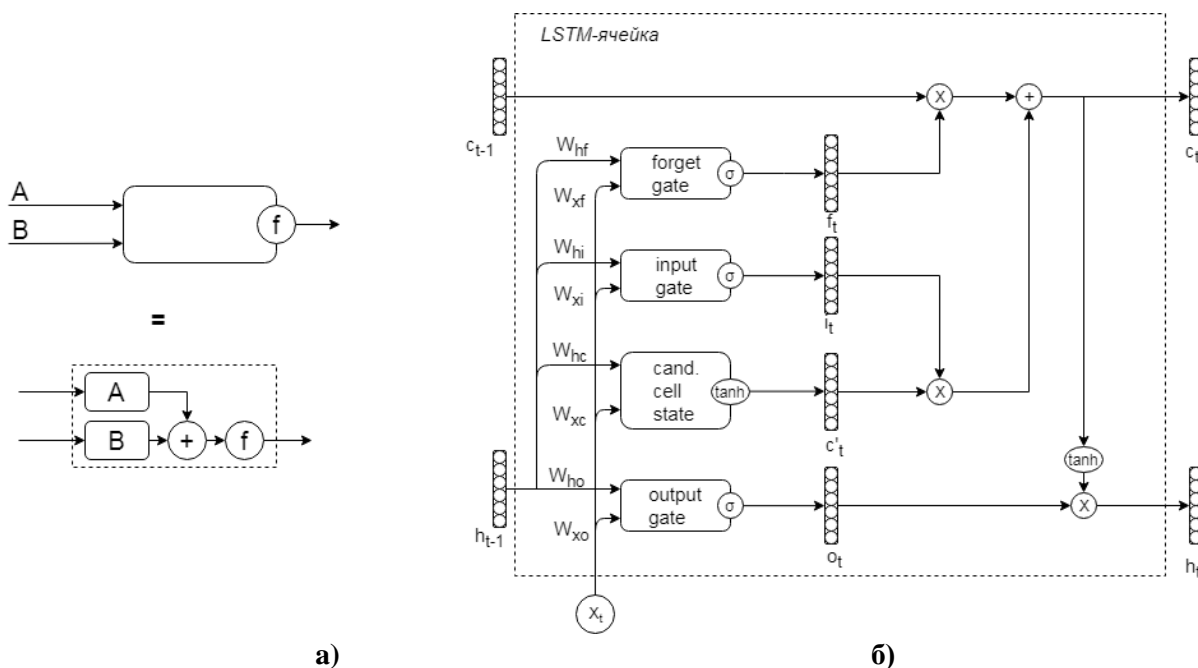
Рекуррентную сеть можно рассматривать, как несколько копий одной и той же сети, каждая из которых передает информацию последующей копии. Тогда нейронную сеть можно представить в развертке по времени, что представлено на рис. 1 справа [6]. Можно сказать, что на каждом шаге создается несколько копий одной и той же сети. Каждая из этих копий принимает текущее значение последовательности в определенный момент времени  $x_t$  и значение, полученное из предыдущей копии – скрытое состояние  $s_{t-1}$ , затем некоторым образом их комбинирует и передает результат в следующий элемент. Таким образом, на каждом шаге

фактически обучается глубокая нейронная сеть, в которой столько слоев, сколько элементов в последовательности уже было пройдено. На такой развернутой сети можно производить обучение методом обратного распространения ошибки. Прием, когда с помощью метода обратного распространения обучается развернутая во времени рекуррентная нейронная сеть принято называть обратным распространением во времени (Back propagation through time, BPTT)[5].



**Рисунок 1. Развертка рекуррентной нейронной сети во времени.**  
 $Z^{-1}$  – оператор задержки на 1 такт

Однако у рекуррентных сетей есть свои проблемы. Одна из самых важных – проблема затухающих градиентов. Она заключается в том, что влияние текущего входа или текущего состояния сети не может распространяться слишком далеко. Влияние текущего входа затухает экспоненциально по мере удаления. Одной из наиболее популярных и эффективных моделей рекуррентных нейронных сетей является LSTM (от англ. Long Short – Term Memory – долгая краткосрочная память)[4]. LSTM – особая разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей, способная к обучению долговременным зависимостям. Стандартная архитектура LSTM – ячейки представлена на рис. 2.



**Рисунок 2. LSTM: а – обозначение гейта с двумя входами; б – структура LSTM-ячейки**

В LSTM есть три основных вида узлов, которые называются гейтами: входной (inputgate), забывающий (forgetgate) и выходной (outputgate), а также рекуррентная ячейка со скрытым состоянием [1].

Если для момента времени  $t$  обозначить через  $x_t$  входной вектор, через  $h_t$  – вектор скрытого состояния, через  $W_x$  – матрицы весов, применяющиеся ко входу, через  $W_h$  – матрицы весов в рекуррентных соединениях, а через  $b$  – векторы свободных членов, получим следующее формальное определение того, как работает LSTM: на очередном входе  $x_t$ , имея скрытое состояние из предыдущего шага  $h_{t-1}$  и состояние ячейки  $c_{t-1}$ , последовательно вычисляется:

$$\begin{array}{ll}
 c'_t = \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_{c'}) & \text{Candidate cell state} \\
 i_t = \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1} + b_i) & \text{Input gate} \\
 f_t = \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + b_f) & \text{Forget gate} \\
 o_t = \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + b_o) & \text{Output gate} \\
 c_t = f_t \otimes c_{t-1} + i_t \otimes c'_t & \text{Cell state} \\
 h_t = o_t \otimes \tanh(c_t) & \text{Block output}
 \end{array}$$

где:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

На вход LSTM подаются два вектора: новый вектор из входных данных  $x_t$  и вектор скрытого состояния  $h_{t-1}$ , который получен из скрытого состояния этой ячейки на предыдущем шаге. Внутри у каждого LSTM – блока есть «ячейка памяти» (cell) – вектор, который выполняет функцию памяти. Вектор ячейки обозначен  $c_t$ , а  $c'_t$  – вектор, который становится кандидатом на новое значение памяти. Но прежде чем его запишут вместо  $c_{t-1}$ , значение–кандидат и старое значение проходят через еще два гейта: входной гейт  $i_t$  и забывающий гейт  $f_t$ . Таким образом, новое значение получается как линейная комбинация из старого значения с коэффициентами из забывающего гейта и нового кандидата  $c'_t$  с коэффициентами из входного гейта. Там, где значения вектора забывающего гейта  $f_t$  будут близки к нулю, старое значение забудется, а там, где значения  $i_t$  будут велики, новый входной вектор прибавится к тому, что было в памяти.

Покомпонентное умножение  $\otimes$  приводит к тому, что на очередном шаге может быть перезаписана только часть «памяти» LSTM – ячейки; и какая это будет часть, тоже определяет сама ячейка в зависимости от того, что получается на выходах забывающего и входного гейтов. И более того, поскольку линейная комбинация «мягкая» и все пропускается через сигмоид  $\sigma$ , ячейка может не просто выбрать записать новое значение или забыть его, а еще и сохранить любую линейную комбинацию старого и нового значения. Всё это делает LSTM – ячейки весьма гибкими, а если учесть, что из таких ячеек состоит вся рекуррентная сеть, то становится понятно, почему структура LSTM стала успешным развитием идеи рекуррентных нейронных сетей.

## Метод

Целью исследования является создание нейросетевой прогнозной модели для обнаружения аномальных битовых строк в потоке нормальных. Для создания обучающих и тестовых данных формируются множества нормальных и аномальных строк. Определяются  $n$  строк, считающихся нормальными:  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , которые образуют множество нормальных строк  $A$ , и  $m$  аномальных строк  $b_1, b_2, \dots, b_m$ , которые образуют множество аномальных строк  $B$ .

Входные данные для модели формируются следующим образом: путем случайного выбора с возвращением некоторого количества строк из множества формируется поток, который затем рассматривается уже не как поток строк, а как последовательность символов, составляющих эти строки.

Формируется три набора данных: один набор обучающих данных и два набора тестовых данных. Обучающие данные формируются как поток нормальных строк, то есть в них не содержится аномальных строк. Один из тестовых наборов данных также представляет собой поток нормальных строк. Этот набор данных будет участвовать в обучении в качестве тестовой выборки. Другой тестовый набор данных представляет собой аномальный поток и будет использоваться собственно при тестировании модели.

Какой бы набор данных не рассматривался, для обучения и его контроля модели требуются не только входные, но и целевые выходные данные. Так как ставится задача прогнозирования, то для входной последовательности символов  $X = x_1, x_2, \dots, x_L$ , где  $L$  – ее длина, составляется целевая последовательность  $Y = y_1, y_2, \dots, y_L$ , такая, что

$$y_k = \begin{cases} x_{k+1}, & k = 1, \dots, L - 1 \\ 0, & k = L \end{cases}$$

Фактически, модель обучается на каждом шаге по значению  $x_k$  на входе предсказывать значение  $x_{k+1}$  на выходе, то есть воспроизводить на выходе ту же последовательность символов, что и подается на вход.

Ошибка на шаге  $k$  будет определяться как

$$e_k = |y_k - \hat{y}_k|$$

где  $y_k$  – целевое значение, а  $\hat{y}_k$  – предсказанное моделью значение на шаге  $k$ .

В результате построения такой прогнозной модели ожидается, что модель сумеет приспособиться к обучающим и тестовым данным, в которых встречаются только цепочки символов, образующие поток нормальных строк и сигнал ошибки на обучающих и «нормальных» тестовых данных не будет велик. Однако на сигнале «аномальных» тестовых данных ожидается большой сигнал ошибки прогноза на тех участках потока, где включены строки из множества аномальных строк, поскольку при обучении модель не встречается с такими строками.

Процесс построения нейронной сети, которая бы решала задачу прогнозирования с минимальной ошибкой требует решения о выборе структуры нейронной сети (то есть числа ее слоев и числа нейронов в слоях), типа рекуррентных нейронов, функции потерь, алгоритма обучения и его параметров, числа эпох обучения. Фактически, для решения задачи требуется производить поиск в многомерном пространстве макро- и микропараметров обучения нейронных сетей.

### Методика проведения исследования

Для проведения исследования нужно создать множества нормальных и аномальных строк. Для этого нужно определиться с их объемами. Выберем объем множества нормальных строк и объем множества аномальных строк равным единице ( $n = m = 1$ ).

В ходе исследования для рассмотрения различных ситуаций будет проведено три эксперимента:

1. Множество нормальных строк будет содержать одну строку  $a_1 = [0011]$ , множество аномальных строк будет содержать одну строку  $b_1 = [10100111]$ .

2. Множество нормальных строк будет содержать одну строку  $a_1 = [01101]$ , множество аномальных строк будет содержать одну строку  $b_1 = [10100111]$ .

3. Множество нормальных строк будет содержать одну строку  $a_1 = [01101]$ , множество аномальных строк будет содержать одну строку  $b_1 = [101]$ .

За таким выбором нормальных и аномальных строк в экспериментах стоит следующая логика: в первом эксперименте нормальная строка является подстрокой аномальной строки. Во втором эксперименте аномальная строка та же, что и в первом эксперименте, но нормальная строка уже не является подстрокой аномальной. В третьем эксперименте нормальная строка та же, что и во втором эксперименте, а аномальная является подстрокой нормальной строки.

Для компактной записи последовательностей, используемых при обучении и тестировании, будем использовать следующую нотацию для строки  $s$ , повторенной  $L$  раз:

$$\{s\}_L$$

Обучающие данные будут представлять из себя поток, состоящий из нормальной строки  $a_1$ , повторенной 50 раз:

$$\{a_1\}_{50}$$

Тестовые данные, используемые для оценки эффективности обучения, также будут представлять из себя поток, состоящий из нормальной строки  $a_1$ , но повторенной 10 раз:

$$\{a_1\}_{10}$$

Тестовые данные с включением аномалий представляют собой поток из нормальных событий (строк  $a_1$ ) с включением несколько аномальных строк  $b_1$ :

$$\{a_1\}_5, b_1, \{a_1\}_3, b_1, \{a_1\}_8$$

В каждом эксперименте требуется обучить нейронную сеть и рассматривать график ошибки на обучающих и тестовых данных.

Для обучения нейронной сети требуется определиться с ее структурой, типом используемых нейронов, выбрать функцию потерь, алгоритм обучения и его параметры.

### Реализация метода и эксперименты

Для решения поставленной задачи была выбрана структура нейронной сети, представленная на рис. 3. В качестве нейронов в скрытых слоях используются рекуррентные LSTM нейроны, в выходном слое – простейший нейрон с линейной функцией активации. Функция потерь – среднеквадратическая. Алгоритм обучения – стохастический градиентный спуск (SGD) со скоростью обучения (*learningrate*) 0.01. Количество эпох – 300. Нейронные сети были реализованы программно на языке Python с использованием прикладных библиотек TensorFlow [7] и Keras[8].

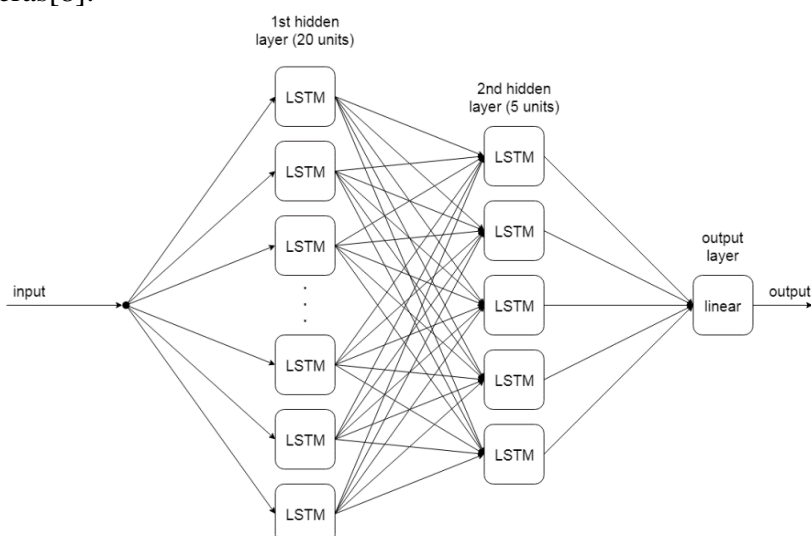
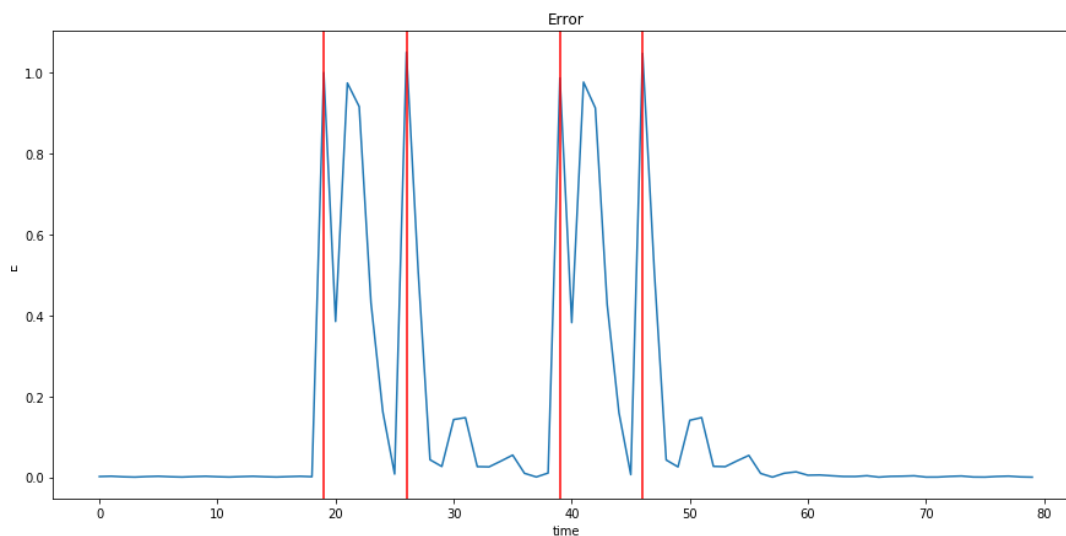


Рисунок 3. Структура нейронной сети

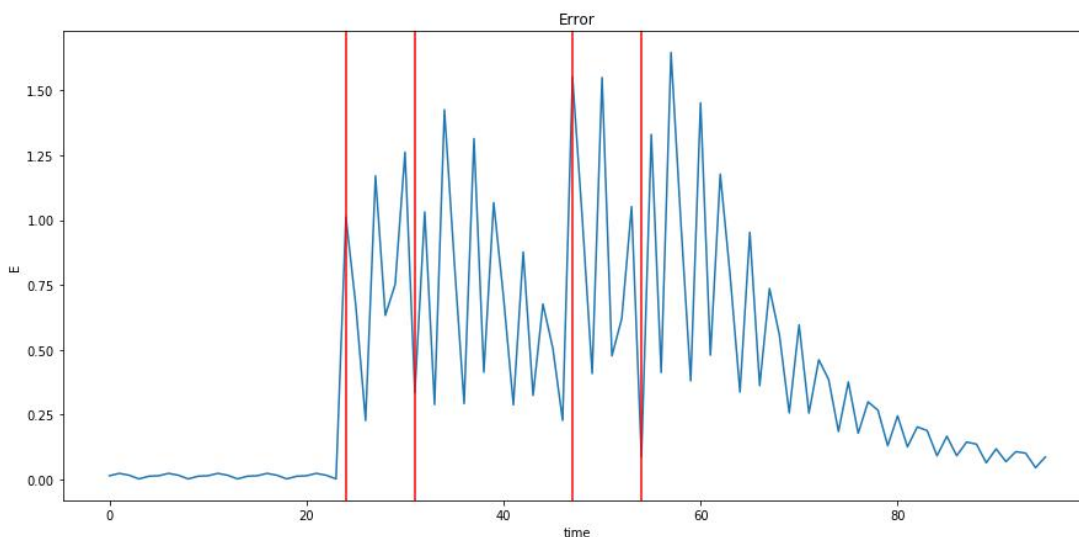
В качестве результатов экспериментов приведем графики сигнала ошибки на тестовых данных, содержащих аномальные строки. Графики представлены на рис. 4-6. Красными линиями обозначены участки, где включены аномальные строки.

По графику сигнала ошибки на рис. 4 видно, что нейронная сеть ошибается в прогнозе в местах включения аномальных строк. Так же заметим, что после аномального слова сеть не сразу способна давать качественный прогноз, имеется участок с «переходным процессом», требуется некоторое время на восстановление нулевой ошибки прогноза.

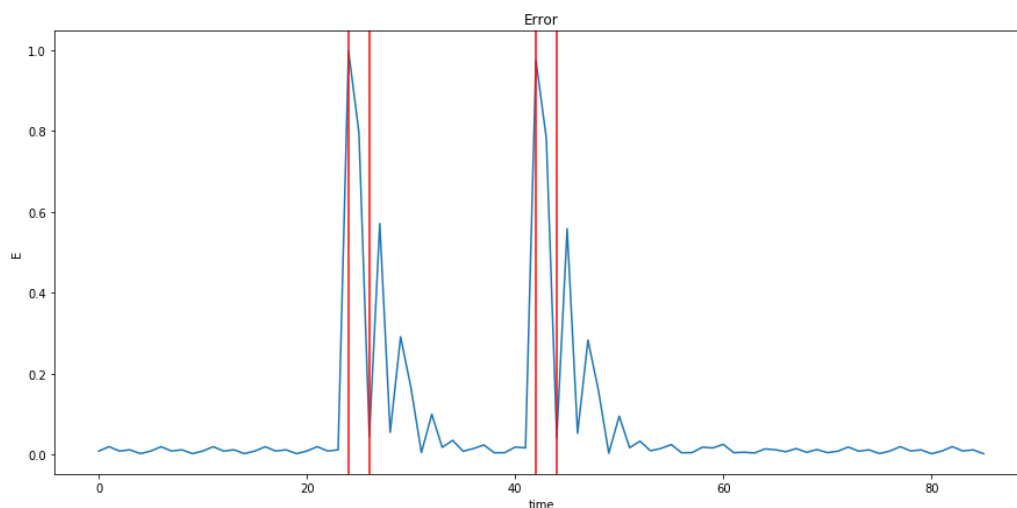
По графику сигнала ошибки на рис. 5 видно, что нейронная сеть ошибается в прогнозе в местах включения аномальных строк. Также заметим, что после аномального слова сеть не сразу та же, имеется участок с «переходным процессом», но по сравнению с первым экспериментом длительность этого «переходного процесса» больше, из-за чего сеть дает большую ошибку прогноза не только на участках аномальных слов, но и вне них.



**Рисунок 4. Эксперимент 1. График сигнала ошибки на тестовых данных с аномальными строками**



**Рисунок 5. Эксперимент 2. График сигнала ошибки на тестовых данных с аномальными строками**



**Рисунок 6. Эксперимент 3. График сигнала ошибки на тестовых данных с аномальными строками**

По графику сигнала ошибки на рис. 6 видно, что нейронная сеть ошибается в прогнозе в местах включения аномальных строк. Также заметим, что после аномального слова имеется участок с «переходным процессом», но по сравнению с экспериментом 1 длительность этого «переходного процесса» заметно меньше.

### Обсуждение

В результате проведенных экспериментов было подтверждена возможность применения LSTM для построения прогнозной модели цепочек событий и обнаружения аномальных последовательностей событий.

При изучении результатов моделирования встал вопрос о том, каким образом корректно определять положение аномальных строк среди нормальных. Рассматривая графики сигналов ошибки на выходе сети в разных экспериментах, видно, что во всех случаях достаточно корректно определяется «фронт» аномальной строки. После того, как аномальная строка прошла, сеть какое-то время сохраняет информацию о ней и тем самым «спад» сигнала ошибки затягивается на участок нормальных строк.

Видно, что сигнал ошибки прогноза несет в себе информацию, из которой можно определить участки аномальности входного сигнала. Требуется разработать метод определения порога ошибки, по которому можно классифицировать сигнал как нормальный или аномальный в каждой конкретной точке. С учетом того, что система ведет себя как динамический объект, не исключено, что этот порог ошибки может быть адаптивным.

Дальнейшие исследования планируется направить на разработку метода определения порога ошибки прогноза для корректного определения участков нормальности и аномальности сигнала. Целесообразно также проверить эффективность LSTM на более сложной модели нормы из нескольких различных битовых строк и, в случае успеха, перейти от битовых строк к более сложным моделям последовательностей событий.

### Заключение

В работе рассмотрена задача выявления аномальных битовых строк в потоке битов. Предложенное решение основано на подходе, предполагающем обнаружение нехарактерного поведения как отклонения от модели, сформированной на основе примеров нормального пове-



дения. Выявлены особенности LSTM, связанные с динамическим откликом таких моделей. Полученные результаты дают основание к продолжению исследований, в частности, в направлениях поиска оптимального критерия определения положения аномалий и увеличении объемов обрабатываемой информации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. **Николенко, С.** Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурын, Е. Архангельская. – СПб.: Питер, 2019.
2. **H. Hewamalage, C. Bergmeir, K. Bandara.** Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting: Current Status and Future Directions, Faculty of Information Technology, Monash University, Melbourne, Australia, Sep. 2019.
3. **G. Petnehazi.** Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting, Doctoral School of Mathematical and Computational Sciences University of Debrecen, Dec. 2018.
4. **C. Ralf, E. Staudemeyer, R. Morris.** Understanding LSTM, Schmalkalden University of Applied Science, Germany, Sep. 2019.
5. **Werbos, Paul.** Backpropagation through time: what it does and how to do it. Proceedings of the IEEE. 78. 1550 - 1560. 10.1109/5.58337.
6. URL: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>
7. URL: [https://www.tensorflow.org/api\\_docs](https://www.tensorflow.org/api_docs)
8. URL: <https://keras.io/>

**S.V. Kolpinskiy, V.L. Eliseev**

### RECOGNITION OF NOVELTY IN BIT STREAM WITH LSTM

A bit string is a sequence of bits of variable length, which is a simplified model of a sequence of events. A sequence of consecutive bit strings forms a stream of bits. The task is to identify abnormal, uncharacteristic strings in a given bitstream. Several model examples discuss various variations of anomalous strings. An artificial neural network containing cells with feedbacks, LSTM (Long Short-Term Memory), is used as a detector. The structure of a neural network with LSTM cells is investigated. A criterion for detecting anomalies is proposed. The properties of the constructed detector are investigated.

**Keywords:** anomaly detection, sequence processing, artificial neural networks, LSTM.

А.В. Кудашкин, А.С. Мохов

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ КЛИЕНТОВ БАНКА НА ОСНОВЕ ИХ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ И БАНКОВСКИХ ТРАНЗАКЦИЙ

Национальный исследовательский институт «МЭИ», Москва

В данной статье приводится исследование возможности кластеризации клиентов банка, основывающееся на персональных данных клиентов и их банковских транзакций для последующего использования данной информации в интересах банка. Для решения задачи проводится предварительная обработка данных, включающая в том числе конструирование признаков, характеризующих каждого клиента, а для кластеризации клиентов используются методы DBSCAN и K-means.

**Ключевые слова:** анализ данных, кластеризация данных, клиенты банка, DBSCAN, K-means

### Постановка задачи

В данной работе рассматривается задача кластеризации клиентов банка, основываясь на данных, взятых из открытых источников банка, а именно: данных клиентов и транзакциях, произведенных этими клиентами.

Актуальной эту задачу делает ее потенциальное применение в следующих задачах:

- контекстная рассылка рекламы клиентам банка из разных групп интересов.
- создание персонализированных предложений.
- подбор рекомендаций конкретному клиенту на основе предпочтений других клиентов со схожим поведением и интересами.
- предсказание реакции клиента на всевозможные действия со стороны банка.

Основной целью данной работы является дальнейшее использование информации о клиентах в задаче предсказания реакции клиентов на текстовые истории в мобильном приложении банка.

### Формирование выборки

Коллекция была получена из открытых источников банка [https://vc.ru/data-like?utm\\_source=smm\\_tinkoff&dsp\\_click\\_id=76a55cf5-b5ea-481c-ade9-6c39050111bc](https://vc.ru/data-like?utm_source=smm_tinkoff&dsp_click_id=76a55cf5-b5ea-481c-ade9-6c39050111bc) и представляет собой набор данных из двух CSV таблиц:

customer\_train.csv – обучающая выборка с данными о 50000 клиентах банка с набором таких параметров как: idномер клиента, пол, возраст, тип занятости, семейное положение, количество детей, дата регистрации и описание профессии.

custo	product_0	product_1	product_2	product_3	product_4	product_5	product_6	gender_cd	age	ma	ch	first_session_dttm	job	job_title
234305						UTL		F	25.0	0.0		29.10.2015 9:59	22	Менеджер проектов
914339						UTL		M	15.0	0.0		09.04.2018 8:51	22	
895631						UTL		M	20.0	0.0		22.03.2018 10:38	16	Менеджер по продажам
954837						UTL		F	25.0	0.0		09.05.2018 18:24	16	Инженер
391590	UTL							M	30.0	UNM	0.0	08.10.2016 5:29	20	сборщик мебели
385518						UTL		M	30.0	0.0		27.09.2016 16:52	22	
681186						UTL		M	45.0	CIV	0.0	24.08.2017 9:59	16	ИНЖЕНЕР ПООБСЛУЖИВАНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
79708				CLS		UTL		M	30.0			18.05.2013 19:11	11	

Рисунок 1. Пример набора данных customer\_test.csv

transactions.csv – данные о чуть более чем трех миллионах транзакций клиентов, которые представляют собой набор параметров, таких как: дата проведения транзакции, id клиента производившего транзакцию, сумма транзакции, id продавца и MCC(MerchantCategoryCode) код, предназначенный для классификации торгово-сервисных предприятий.

customer_id	transaction_month	transaction_day	transaction_amt	merchant_id	merchant_mcc
855115	7	3	1500	4554547	5411
997036	6	6	0	1657528	5411
398237	5	24	2500	26375569	5813
997036	6	2	0	16304402	5411
291636	7	25	0	1259505	5411
844503	5	24	3500	12790541	5411
844503	6	22	3500	12790541	5411
862192	7	14	0	65419694	5814
862192	5	26	0	97570081	5411

**Рисунок 2. Пример набора данных transactions.csv**

Перед проведением кластеризации, данные о клиентах должны быть приведены к удобной для обработки форме, для максимально эффективного использования данных выборки [1]. Создание некачественной модели данных может исказить модель прогнозирования. Так же часть данных в результате наличия человеческого фактора при создании записей о клиентах в выборке может:

- отсутствовать – атрибуты данных пропущены или отсутствуют полностью;
- быть зашумлена – в атрибуты данных введены неверные значения или присутствуют выбросы.

Для проверки данных на адекватность, подразумевающую полноту и качество заполнения информации на данной выборке был проведен подсчет количества пропущенных значений – часть атрибутов данных у некоторых объектов в выборке может отсутствовать, основываясь на количестве пропущенных значений можно говорить об адекватности использования данных в выборке. В выборке данных около половины клиентов имеют незаполненные поля в том или ином количестве. Для обработки пропущенных значений обычно используется:

- подстановка средних значений,
- подстановка модальных значений,
- подстановка фиктивных значений,
- удаление объекта выборки.

В данной работе использовалось удаление объектов с незаполненными полями в качестве первоначального подхода, поскольку он не требует дополнительных затрат, а объем удаляемых данных незначителен в сравнении с объемом исходных данных.

Кроме того, была проведена проверка на несогласованность данных, проверив допустимость значений в диапазоне приемлемом для каждого признака. Примером несогласованных данных может являться запись о клиенте возрастом более 120 лет. Записи о клиентах, содержащие выбросы, подлежат удалению.

### **Конструирование признаков**

Перед началом непосредственной обработки данных должны быть выделены признаки, которые могут характеризовать объект кластеризации. Для этого в первую очередь необходимо связать и объединить данные таблицы клиентов и таблицы транзакций для обработки.

В качестве признаков значимых для кластеризации из таблицы клиентов (на основании непосредственного отношения к данным клиента) были выбраны: возраст, семейное положение, количество детей, пол, семейное положение, профессия.

Так как среди признаков присутствуют признаки, описывающие принадлежность к категории, а не являющейся каким-либо непрерывным значением требуется дополнительная обработка. Ко всем переменным, являющимся категориальными, был применен метод прямого кодирования, суть этого метода заключается в замене категориальных переменных новыми признаками, обозначающими принадлежность объекта к этой категории. В данном случае категориальными являются семейное положение, пол и профессия.

Из таблицы транзакций можно выделить дополнительные признаки для клиентов, для этого необходимо выделить информацию о клиенте из большого количества транзакций. Для этого необходимо просуммировать данные для конкретных клиентов. В качестве признаков, значимых для кластеризации из таблицы транзакций были выбраны сумма по конкретному МСС-коду и количество транзакций клиента и общая сумма транзакций.

Итоговый список признаков клиента банка:

*Некатегориальные:* возраст, количество детей, сумма произведенных транзакций, количество произведенных транзакций, количество транзакций для каждого МСС-кода.

*Категориальные признаки:* семейное положение, пол, тип занятости.

Данные выборки представлены в разных диапазонах, что может сильно исказить результаты многих алгоритмов машинного обучения. Для решения этой проблемы должна быть произведена нормализация данных - все значения каждого признака будут отображены в диапазоне от 0 до 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439
0	0.250000	0.000000	0.003171	0.062267	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
1	0.083333	0.000000	0.011416	0.159402	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
2	0.166667	0.000000	0.016490	0.122042	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3	0.333333	0.000000	0.007717	0.054795	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
4	0.250000	0.000000	0.001480	0.038605	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0

**Рисунок 3. Итоговый вид матрицы данных клиентов после преобразования и объединения таблиц**

Итоговый вид матрицы данных клиентов после преобразования и объединения таблиц представлен на рис. 3. Столбец 0 соответствует признаку – возраст, Столбец 1 – кол-во детей, Столбец 2 – общий объем транзакций, Столбец 3 – количество транзакций, Столбцы 4-409 – суммы покупок по МСС-кодам, Столбцы 410-411 – пол, Столбцы 412-433 – тип занятости, Столбцы 434-439 – семейное положение.

### Проведение исследования

В работе использовались два метода кластеризации – DBSCAN и K-means [2, 3].

В качестве основного метода кластеризации выбран метод DBSCAN, поскольку метод обладает рядом достоинств: не требует указывать количество кластеров, устойчив к шумовым выбросам, способен выделять кластеры сложной формы.

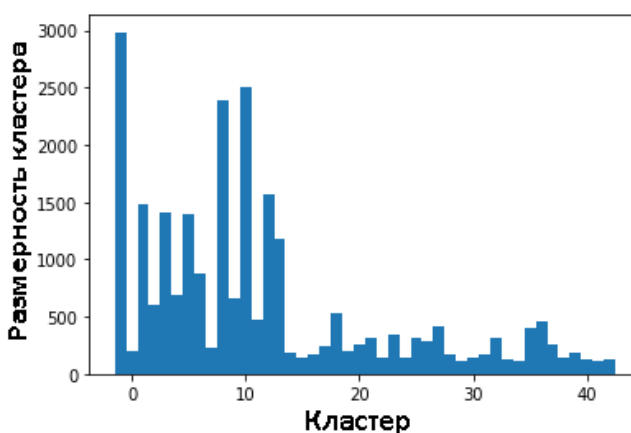
Метод k-means будет использоваться для проверки качества кластеризации методом DBSCAN. K-means также обладает рядом преимуществ, таких как скорость работы, интер-

претираемость результатов, однако требует указывать количество кластеров для разбиения и не гарантирует достижения глобального экстремума в связи со случайным выбором начальных приближений.

#### *Результаты кластеризации методом DBSCAN*

Параметрами метода являются значение  $\text{minPts}$  и  $\text{eps.minPts}$  – минимальное количество точек в радиусе ядровой точки и  $\text{eps}$  – радиус ядровой точки.

Значение  $\text{eps}$  было выбрано, исходя из среднего промежуточного значения, при котором количество кластеров является устойчивым, при постоянном значении  $\text{minPts}$ . Таким значением является  $\text{eps} = 1.1$ . Значение  $\text{minPts}$  было выбрано равным 100, исходя из того, чтобы количество кластеров с крайне малым количеством точек (менее 100 штук) было мало, а сами кластеры содержали в себе относительно равное количество точек, при этом, однако количество шумовых точек было не столь велико.

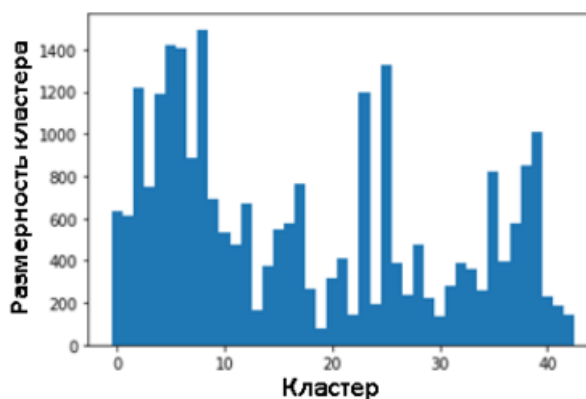


**Рисунок 4. Размеры кластеров при кластеризации методом DBSCAN.  
Кластер под номером -1 соответствует количеству шумовых точек**

Итоговое значение количества кластеров = 43. При этом, 2857 объектов выделено в качестве шумовых, не приписанных ни к одному кластеру.

#### *Результаты кластеризации методом k-means*

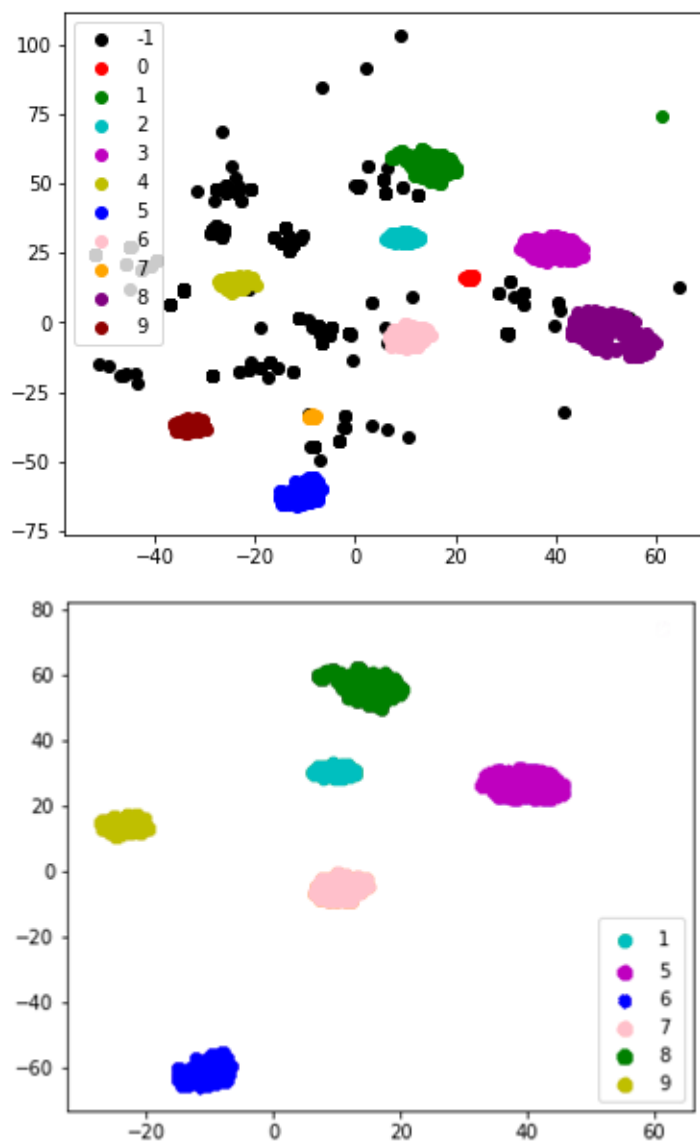
Так как k-means будет использоваться лишь для проверки правильности кластеризации методом DBSCAN, единственный параметр метода, определяющий количество кластеров, выбран, исходя из количества кластеров, полученных в предыдущем пункте, т.е. 43.



**Рисунок 5. Размеры кластеров при кластеризации методом k-means**

## Визуализация результатов кластеризации

Для визуализации кластеризации будет использован метод t-SNE (t-distributed stochastic neighbor embedding)[4], это метод снижения размерности для визуализации в низкоразмерном пространстве. Метод моделирует объекты высокой размерности таким образом, чтобы похожие друг на друга объекты, моделировались близко расположенными точками, а не похожие - точками, стоящими далеко друг от друга. Далее представлены результаты кластеризации по первым десяти кластерам первых 3000 объектов выборки.



**Рисунок 6. Результаты визуализации кластеризации методами DBSCAN(сверху) и k-means(снизу)**

Визуально оценив два графика кластеризации (рис. 6), можно сказать, что существуют пары кластеров, которые можно считать идентичными, например, кластер под номером 1 в разбиении методом DBSCAN соответствует кластеру под номером 2 в методе k-means. Таким образом, можно сравнить состав идентичных кластеров.

Проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод о том, что кластеры, полученные методом k-means, соответствует кластерам, полученным методом DBSCAN, дополненными шумовыми точками.

Было получено среднее межкластерное расстояние для двух методов путем расчета среднего расстояния между всеми парами центроидов: для метода DBSCAN значение равно 2.02, а для метода k-means оно оказалось равно 1.94.

Значение межкластерного расстояния должно быть как можно выше для более качественного разбиения. Схожие значение межкластерного расстояния могут говорить о схожем разбиении кластеров в пространстве.

### Заключение

В ходе исследовательской работы был произведен анализ выборки клиентов банка и их банковских транзакция, обработка выборки, кластеризация клиентов банка двумя методами: DBSCAN и k-means. Согласно полученным результатам, данная выборка содержит 43 кластера, которые выделяются обоими методами кластеризации. В качестве дальнейших направлений исследования будут проведены работы по изменению состава и количества признаков для каждого объекта, в частности – попытка объединения сходных кодов МСС (например, 5817 – Цифровые товары – приложения и 5818 - Цифровые товары - игры) в один признак.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-00343.*

### Библиографический список

1. **Маннинг, К.Д.** Введение в информационный поиск / К.Д. Маннинг, П. Рагхаван, Х. Шютце. – М.: «Вильямс», 2014.
2. **Ковалёв, С.П.** Комбинация алгоритмов k-средних и DBSCAN при анализе поведения пользователей / С.П. Ковалев, М.А. Калугина // Студенческий: электрон. научн. журн. 2019. № 18(62). <https://sibac.info/journal/student/62/140295>
3. DBSCAN // Википедия. [2020]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DBSCAN> дата обращения 28.01.2020
4. **Van der Maaten L.J.P., Hinton G.E.** Visualizing Data Using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. — 2008. — Ноябрь (т. 9)

**A.V. Kudashkin, A.S. Mokhov**

### CLUSTERING OF BANK CLIENTS BASED ON THEIR PERSONAL DATA AND BANK TRANSACTIONS

National Research University “MPEI”, Moscow

The article presents a study of possibility of clustering bank clients based on their personal data and bank transactions for further use of this information in the interests of the Bank. To solve the problem, preliminary data processing is performed, including the construction of features that characterize each client, and the DBSCAN and K-means methods are used for clients clustering.

**Keywords:** data analysis, data clustering, Bank clients, DBSCAN, K-means

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

<sup>2</sup> ОАО «ИнфоТеКС», г. Москва

Рассматривается задача синтеза нейронных сетей, выполняющих вычисление булевых функций: бент-функций и аффинных булевых функций, а также их векторной комбинации. Исследуется сложность архитектуры нейронной сети и вычислительная сложность синтеза. Для оценки сложности нейросетевой реализации булевой функции вводится коэффициент сложности вычислений (КСВ).

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, булева функция, аффинная булева функция, бент-функция.

### Введение

При современном уровне развития информационных и коммуникационных технологий необходимо повышать уровень эффективности защиты информации и информационных систем. Для этого широко используются методы шифрования и обфускации. Для защиты алгоритмов используются методы обфускации, в том числе, реализуемые с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [3]. Доказано, что ИНС позволяют аппроксимировать любую функцию с любой наперед заданной точностью [5]. Общеизвестны трудности с извлечением знаний из обученной нейросети, что дает основания считать, что они являются так называемым «черным ящиком», то есть, по виду реализации сложно понять, какая функция реализована [1].

Рассмотрим задачу реализации с помощью ИНС алгоритма вычисления булевой функции. Любая булева функция может быть представлена своей таблицей истинности. Для замены вычисления такой функции эквивалентной ИНС нужно представить таблицу истинности, представляющую собой множество обучающих данных, подобрать архитектуру нейронной сети и обучить нейронную сеть на обучающей выборке. Так как нейронная сеть обучается на всем множестве входных аргументов, нет необходимости выделять тестовые и контрольные данные, а также не возникает проблема переобучения. Скорее наоборот, требуется добиться от нейронной сети полностью выучить примеры из обучающей таблицы [3].

Если выбор количества нейронов в входном и выходном слое ИНС определяется самой функцией, то задача определения числа скрытых слоев и количества нейронов в них не столь тривиальна. Требуется исследовать сложность структуры нейронной сети и скорость ее обучения для различных векторных булевых функций. Рассмотрим эту задачу на примере ИНС типа «многослойный перцептрон».

В алгоритмах шифрования широкое распространение получили бент-функции, как наиболее сложные для вычисления. Их характерным свойством является высокая степень нелинейности. В противоположность бент-функциям существует класс аффинных булевых функций, обладающим минимальным значением нелинейности.



В данной работе рассматривается возможность замены вычислений булевых функций двух классов, бент-функций и аффинных функций, эквивалентными ИНС. Целью исследования является выявление зависимости между сложностью булевой функции (в терминах нелинейности) и сложностью создания и обучения эквивалентной нейронной сети типа «многослойный персептрон».

## Теоретический обзор Понятие нелинейности булевых функций

Булева функция (или логическая функция, или функция алгебры логики, англ. Boolean function) от  $n$  переменных — отображение  $B^n \rightarrow B$ , где  $B = \{0; 1\}$  — булево множество.

Формализуем понятие сложности векторных булевых функций в терминах линейности и нелинейности булевых функций.

Мера нелинейности является важной характеристикой булевой функции в криптографии. Линейность и близкие к ней свойства часто свидетельствуют о простой (в определенном смысле) структуре этой функции и, как правило, представляют собой богатый источник информации о многих других ее свойствах. Задача построения булевых функций, обладающих нелинейными свойствами, естественным образом возникает во многих областях дискретной математики. И часто наибольший интерес вызывают те функции, для которых эти свойства экстремальны [6].

Бент-функции — это булевы функции, обладающие экстремальным значением нелинейности. Благодаря этому широко применяются в криптографии для создания шифров, максимально устойчивых к методам линейного и дифференциального криптоанализа [4].

Впервые бент-функции были введены О. Ротхаусом в 60-х годах XX века. Также к числу первых работ относятся и исследования американских математиков Дж. Диллона и Р.Л. МакФарланда, которые в 70-х рассматривали бент-функции в связи с разностными множествами. С 80-х годов бент-функции начинают интенсивно изучаться по всему миру. В настоящее время известны сотни работ о бент-функциях и близких вопросах.

Несмотря на широкий интерес среди исследователей, класс бент-функций от  $n$  переменных до сих пор не описан, для мощности этого класса не найдена асимптотика и не установлено даже приемлемых нижних и верхних оценок [8].

Рассмотрим основные определения, связанные с понятием бент-функции.  $V_n$  — векторное пространство размерности  $n$  над 2-х элементным полем  $F_2$ .  $a = (a_1, \dots, a_n), b = (b_1, \dots, b_n), a, b \in V_n$ . Определим скалярное умножение на векторах из  $V_n$ :

$$\langle a, b \rangle \equiv a_1 b_1 \oplus \dots \oplus a_n b_n$$

Определим булеву функцию [6] как  $f: V_n \rightarrow F_2$

Полиномом Жегалкина для  $c, c_1, c_2, \dots, c_{1\dots n}, x_1, \dots, x_n \in F_2$  называется булева функция вида:

$$P(x_1, \dots, x_n) = c \oplus c_1 x_1 \oplus c_2 x_2 \oplus \dots \oplus c_n x_n \oplus c_{12} x_1 x_2 \oplus \dots \oplus c_{1\dots n} x_1 \dots x_n$$

Аффинная функция — это булева функция, полином Жегалкина которой не имеет нелинейных членов, то есть членов, представляющих собой конъюнкцию нескольких переменных. Аффинная булева функция имеет вид:

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = a_1 x_1 \oplus \dots \oplus a_n x_n \oplus c.$$

Термин «нелинейность» принят для показателя нелинейности, использующего понятия веса Хэмминга и расстояния Хэмминга.

Весом Хэмминга или просто весом двоичного вектора называется число единиц среди его компонент. Вес Хэмминга булевой функции есть вес вектора её значений. Обозначать вес вектора или функции будем  $wt(f)$  [4]:

$$wt(f) = |\{x \in V_n : f(x) = 1\}|.$$

Расстояние Хэмминга между двумя булевыми функциями  $f$  и  $g$  есть вес функции  $f \oplus g$ :

$$d(f, g) = wt(f \oplus g).$$

Нелинейностью  $N(f)$  булевой функции  $f$  называется расстояние Хэмминга между  $f$  и множеством аффинных функций  $A_n$ :

$$N(f) = \min_{\varphi \in A_n} d(f, \varphi).$$

Очевидно, что нелинейность любой аффинной функции равна нулю.

Нелинейность бент-функций с числом переменных  $n$  ( $n$  чётное) определяется соотношением [6]:

$$N(f) = 2^{n-1} - 2^{\frac{n}{2}-1}.$$

Примеры бент-функций четырёх и шести переменных [10]:

$$\begin{aligned} n = 4: f_1(X) &= x_1x_3 \oplus x_2x_4 & N(f_1) &= 6 \\ n = 6: f_2(X) &= x_1x_2x_3 \oplus x_1x_4 \oplus x_2x_5 \oplus x_3x_6 & N(f_2) &= 28 \end{aligned}$$

Таким образом, среди всех возможных векторных булевых функций от  $n$  переменных, можно выделить класс аффинных функций с минимальным значением нелинейности и класс бент-функций с максимальным значением нелинейности.

### Общие сведения об искусственных нейронных сетях

Искусственная нейронная сеть (ИНС) — математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей [5].

ИНС представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой искусственных нейронов. Модель искусственного нейрона представлена на рис. 1.

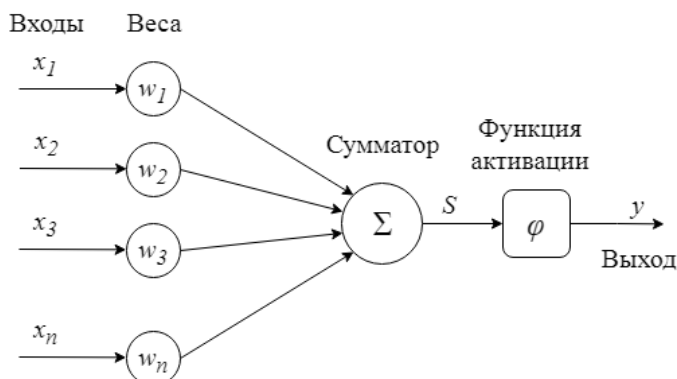


Рисунок 1. Модель искусственного нейрона

Каждый нейрон периодически получает сигналы через входы  $x_1 \dots x_n$ . Далее входные сигналы умножаются на весовые коэффициенты  $w_1 \dots w_n$ .

Далее произведения входных сигналов на веса  $x_i w_i$  передаются на сумматор, который суммирует все сигналы и выдает на выходе одно число, называемое взвешенной суммой  $S$ .

$$S = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Для обработки взвешенной суммы и формирования адекватного выходного сигнала применяется функция активации. Значение этой функции и является выходом нейрона.

$$y = \varphi(S)$$

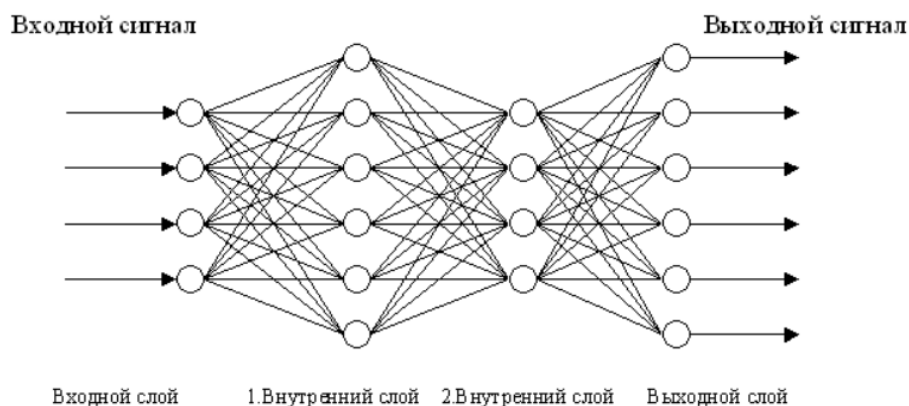
Наиболее часто в качестве функции активации используется сигмоидальная (логистическая) функция:

$$\varphi(S) = \frac{1}{1 + e^{-S}}$$

Следующим важным этапом в построении ИНС является выбор архитектуры сети, то есть способа расположения и соединения нейронов друг с другом.

Сеть, в которой все входы элементы соединены непосредственно с выходными нейронами, называется однослойной нейронной сетью. Выходной слой производит необходимые вычисления, результат которых является выходом нейросети.

Многослойные сети помимо входного и выходного слоев имеют так называемые скрытые слои. Многослойные нейронные сети нелинейными функциями активации в отличие от однослойных обладают свойством универсального аппроксиматора. Пример многослойного персептрона представлен на рис. 2.



**Рисунок 2. Многослойный персептрон с двумя скрытыми слоями**

ИНС могут быть использованы для полезных вычислений путем настройки весовых коэффициентов  $w_i$  нейронов. Обычно это делается с помощью оптимизационной процедуры, называемой обучением. Обучение как правило осуществляется с учителем: на вход нейросети подаются входные данные и итерационно корректируются весовые коэффициенты до того момента, когда выходы нейросети не станут близки к требуемым значениям. Большой обзор алгоритмов обучения и сопряженных задач приведен в [5].

Логика работы обученной нейронной сети с позиции современной науки не может быть представлена в виде простых семантических правил, что представляет определенную про-

блему с точки зрения доверия к ИНС, как к вычислительному механизму. Достигнутые успехи в извлечении знаний из обученных ИНС полностью основаны на априорной информации о предметной области [7], либо при фиксации модели представления знаний [2] и фактически постулируют лишь возможность построения модели черного ящика путем перебора значений вход-выход.

## Метод

Необходимо синтезировать нейронные сети, выполняющие вычисление булевых функций некоторых классов: аффинных булевых функций и бент-функций, а также их комбинации. Исследование состоит в сравнении сложности архитектуры нейронной сети и вычислительной сложности синтеза в зависимости от нелинейности булевых функций различных классов.

Бент-функции выступают в качестве функций с максимальным значением нелинейности, а аффинные функции в качестве функций с минимальным значением нелинейности. Таким образом, будут рассмотрены булевы функции, имеющие критические значения нелинейности, и для них будет проведено сравнение параметров синтезированных нейросетевых вычислителей.

В рамках исследования предполагалось проверить два предположения:

1) чем меньше значение показателя нелинейности булевой функции, тем более простой структурой должна обладать нейронная сеть, выполняющая вычисление её значений, и более быстрым должно быть обучение;

2) сложность структуры нейронной сети, реализующей векторную булеву функцию, должна быть не больше, чем суммарная сложность структуры ИНС, реализующих скалярные компоненты этой булевой функции.

Исследование зависимости сложности структуры нейронных сетей от характеристик булевых функций, которые нейронные сети должны научиться воспроизводить, проводилось следующим образом:

- первая серия экспериментов: изучение свойств нейронных сетей при обучении их воспроизведению аффинных булевых функций;
- вторая серия экспериментов: изучение свойств нейронных сетей при обучении их воспроизведению булевых бент-функций;
- третья серия экспериментов: изучение свойств нейронных сетей при обучении их воспроизведению векторной булевой функции, являющейся комбинацией аффинной функции и бент-функции.

Целью обучения была нулевая ошибка двоичного выхода нейронной сети. Обучение осуществляется до тех пор, пока среднеквадратическая ошибка на последнем обучаемом слое нейронной сети не станет столь мала, что после применения к выходам нейронов пороговой функции ИНС будет выдавать точное совпадение по всем разрядам для каждого обучающего примера. Поскольку обучение должно осуществляться на полном наборе возможных пар входов-выходов, не требуется осуществлять обобщение, беспокоиться о возможном переобучении и разделять выборку данных на обучающую, тестовую и контрольную.

Выбор архитектуры нейронной сети адекватной для конкретной прикладной задачи, заданной обучающим множеством, представляет собой нерешенную проблему. Как правило, архитектура нейронной сети выбирается экспертом и уточняется путем проб и ошибок. Для обоснованного суждения о минимальной достаточно сложности нейронной сети, реализующей булеву функцию, был разработан следующий эвристический алгоритм:

Шаг 1. В качестве начальной архитектуры выбирается однослойный персептрон с количеством входов и выходов, заданным целевой булевой функцией.

Шаг 2. Если текущая архитектура ИНС в течение заданного фиксированного и достаточно большого количества эпох оказалась обучена с нулевой ошибкой на двоичных выходах, то алгоритм останавливается и ИНС считается результатом.

Шаг 3. В противном случае в нейронную сеть добавляется один скрытый слой, состоящий из одного нейрона.

Шаг 4. Если текущая архитектура ИНС в течение заданного фиксированного и достаточно большого количества эпох оказалась обучена с нулевой ошибкой на двоичных выходах, то алгоритм останавливается и ИНС считается результатом.

Шаг 5. В противном случае в скрытый слой ИНС добавляется один нейрон и происходит переход к шагу 4.

Введем критерий оценки сложности нейросетевой реализации булевой функции (коэффициент сложности вычисления – КСВ), как отношение количества весовых коэффициентов в нейронной сети  $W$  к количеству битовых операций булевой функции  $K$ :

$$КСВ = \frac{W}{K}$$

КСВ показывает, какое условное количество весовых коэффициентов ИНС нужно для реализации одной битовой операции в данной булевой функции.

В случае, если с помощью нейронной сети реализуется векторная булева функция, являющаяся комбинацией скалярных булевых функций, то  $K$  вычисляется как сумма количества битовых операций этих функций.

### Нейросетевая реализация булевой функции

Рассмотрим для примера бент-функцию от четырех переменных:

$$\beta_1(x_1, \dots, x_4) = x_1x_3 \oplus x_2x_4 \quad N(f_1) = 6$$

Таблица истинности  $\beta_1$  приведена в табл. 1.

Таблица 1

Таблица истинности для функции  $\beta_1$

$x_1, \dots, x_4$	$\beta_1$
[0 0 0 0]	0
[0 0 0 1]	0
[0 0 1 0]	0
[0 0 1 1]	0
[0 1 0 0]	0
[0 1 0 1]	1
[0 1 1 0]	0
[0 1 1 1]	1
[1 0 0 0]	0
[1 0 0 1]	0
[1 0 1 0]	1
[1 0 1 1]	1
[1 1 0 0]	0
[1 1 0 1]	1
[1 1 1 0]	1
[1 1 1 1]	0

Имея таблицу истинности, обучим нейронную сеть для данной векторной булевой функции. Параметры обучения нейронной сети представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры обучения нейронной сети для функции  $\beta_1$

Число входных нейронов	Число нейронов в скрытом слое	Число выходных нейронов	Число эпох	Скорость обучения	Алгоритм обучения
4	5	1	10000	0,99	SGD

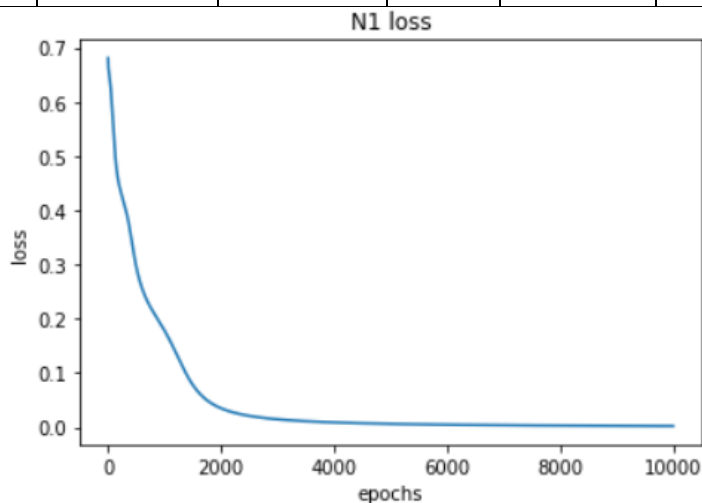


Рисунок 3. График ошибки в процессе обучения

### Экспериментальная часть

Для исследования зависимости сложности нейросетевой реализации булевых функций от показателя их нелинейности были рассмотрены функции от четырех ( $n=4$ ) и шести ( $n=6$ ) переменных.

Функции четырех переменных:

- Аффинные функции:  $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ 
  - $\alpha_1(x_1, \dots, x_4) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus 1$
  - $\alpha_2(x_1, \dots, x_4) = x_1 \oplus x_3 \oplus 1$
  - $\alpha_3(x_1, \dots, x_4) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4$
  - $\alpha_4(x_1, \dots, x_4) = x_3 \oplus x_4 \oplus 1$
  - $\alpha_5(x_1, \dots, x_4) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus 1$
  - $\alpha_6(x_1, \dots, x_4) = x_1 \oplus x_4 \oplus 1$
- Бент-функции:  $\beta_1, \dots, \beta_6$ 
  - $\beta_1(x_1, \dots, x_4) = x_1x_3 \oplus x_2x_4$
  - $\beta_2(x_1, \dots, x_4) = x_1x_2 \oplus x_3x_4 \oplus x_1x_4$
  - $\beta_3(x_1, \dots, x_4) = x_1x_4 \oplus x_1x_3 \oplus x_2x_3$
  - $\beta_4(x_1, \dots, x_4) = x_1x_2 \oplus x_1x_3 \oplus x_3x_4$
  - $\beta_5(x_1, \dots, x_4) = x_1x_4 \oplus x_2x_3$
  - $\beta_6(x_1, \dots, x_4) = x_1x_3 \oplus x_1x_4 \oplus x_2x_4$

Функции шести переменных:

- Аффинные функции:  $\alpha_7, \dots, \alpha_{10}$ 
  - $\alpha_7(x_1, \dots, x_6) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus 1$
  - $\alpha_8(x_1, \dots, x_6) = x_1 \oplus x_3 \oplus x_5 \oplus 1$
  - $\alpha_9(x_1, \dots, x_6) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_4 \oplus x_6 \oplus 1$
  - $\alpha_{10}(x_1, \dots, x_6) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus 1$
- Бент-функции:  $\beta_7, \dots, \beta_{10}$ 
  - $\beta_7(x_1, \dots, x_6) = x_1x_2x_3 \oplus x_1x_4 \oplus x_2x_5 \oplus x_3x_6$
  - $\beta_8(x_1, \dots, x_6) = x_1x_2x_3 \oplus x_1x_5 \oplus x_3x_4 \oplus x_2x_6$
  - $\beta_9(x_1, \dots, x_6) = x_4x_5x_6 \oplus x_1x_4 \oplus x_2x_5 \oplus x_3x_6$
  - $\beta_{10}(x_1, \dots, x_6) = x_4x_5x_6 \oplus x_1x_5 \oplus x_3x_4 \oplus x_2x_6$

Для каждой функции был создан нейросетевой аналог, заменяющий её вычисление. Параметры нейронных сетей, а также значений КСВ приведены в табл. 3-6.

Первая серия экспериментов проводилась для аффинных функций  $\alpha_1 \dots \alpha_{10}$ .

Таблица 3

**Результаты экспериментов для аффинных функций при  $n=4$**

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
Число нейронов в скрытом слое	3	2	2	2	2	2
Число эпох	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$
Число весовых коэффициентов	19	13	13	13	13	13
Число битовых операций	4	2	3	2	3	2
КСВ	4,75	6,5	4,33	6,5	4,33	6,5

Таблица 4

**Результаты экспериментов для аффинных функций при  $n=6$**

	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$
Число нейронов в скрытом слое	6	8	6	8
Число эпох	$10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$
Число весовых коэффициентов	49	65	49	65
Число битовых операций	5	3	4	6
КСВ	9,8	21,6	12,25	10,83

Вторая серия экспериментов проводилась для бент-функций  $\beta_1 \dots \beta_{10}$ .

Таблица 5

Результаты экспериментов для бент-функций при  $n=4$ 

	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
Число нейронов в скрытом слое	4	2	3	3	3	2
Число эпох	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$
Число весовых коэффициентов	25	13	19	19	19	13
Число битовых операций	3	5	5	5	3	5
КСВ	8,33	2,6	3,8	3,8	6,33	2,6

Таблица 6

Результаты экспериментов для бент-функций при  $n=6$ 

	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$	$\beta_{10}$
Число нейронов в скрытом слое	7	8	7	7
Число эпох	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$
Число весовых коэффициентов	57	65	57	57
Число битовых операций	8	8	8	8
КСВ	7,13	8,13	7,13	7,13

Обобщенные результаты первой и второй серии экспериментов над скалярными булевыми функциями приведены в табл. 7.

Таблица 7

## Сводная таблица результатов экспериментов над скалярными булевыми функциями

Количество переменных $n$	Класс функций	Показатель нелинейности $N$	Среднее число нейронов в скрытом слое	Среднее значение КСВ
4	Аффинные функции	0	2,17	5,49
	Бент-функции	6	2,83	4,58
6	Аффинные функции	0	7,00	13,62
	Бент-функции	28	7,25	7,38

Третья серия экспериментов проводилась для векторных булевых функций, составленных из двух различных скалярных функций в разных комбинациях. По результатам экспериментов можно было сравнить КСВ полученной ИНС с суммарной КСВ двух скалярных ИНС, полученных в предыдущих сериях экспериментов.

Результаты экспериментов приведены в табл.8-9.



Таблица 8

Результаты экспериментов для реализации комбинаций функций при  $n=4$ 

	$\alpha_1$ и $\alpha_2$	$\alpha_3$ и $\alpha_4$	$\alpha_5$ и $\alpha_6$	$\beta_1$ и $\beta_2$	$\beta_3$ и $\beta_4$	$\beta_5$ и $\beta_6$	$\alpha_3$ и $\beta_2$	$\alpha_5$ и $\beta_3$	$\alpha_6$ и $\beta_1$
Число эпох	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$	$10^4$
Число нейронов в скрытом слое	5	5	4	5	5	5	5	5	4
Сумма скрытых нейронов при реализации по отдельности	5	4	4	6	6	5	4	5	6
Число весовых коэффициентов	37	37	30	37	37	37	37	37	30
Число битовых операций	6	5	5	8	10	8	8	8	5
КСВ	6,17	7,4	6	4,63	3,7	4,63	4,63	4,63	6
Сумма КСВ при реализации по отдельности	11,25	10,83	10,83	10,93	7,6	8,93	6,93	8,13	14,83

Таблица 9

Результаты экспериментов для реализации комбинаций функций при  $n=6$ 

	$\alpha_7$ и $\alpha_8$	$\alpha_9$ и $\alpha_{10}$	$\beta_7$ и $\beta_8$	$\beta_9$ и $\beta_{10}$	$\alpha_7$ и $\beta_7$	$\alpha_9$ и $\beta_9$
Число эпох обучения	$3 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$10^5$	$10^4$
Число нейронов в скрытом слое	5	10	10	10	12	10
Сумма скрытых нейронов при реализации по отдельности	14	14	15	14	13	13
Число весовых коэффициентов	47	92	92	92	110	92
Число битовых операций	8	10	16	16	13	12
КСВ	5,88	9,2	5,75	5,75	8,46	7,67
Сумма КСВ при реализации по отдельности	31,4	23,08	15,26	14,26	16,93	19,38

## Обсуждение

Изучая результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что такой показатель векторной булевой функции, как ее нелинейность (в терминах расстояния Хэмминга от множества аффинных функций) слабо связан со сложностью структуры нейронной сети, которая обучается производить то же вычисление, что и сама функция. При  $n=4$  были созданы нейросетевые аналоги шести аффинных функций (нелинейность 0) и шести бент-функций (нелинейность 6). Видно, что количество скрытых нейронов, потребовавшееся в том и в другом случае, не сильно отличаются, а количество эпох обучения не отличается совсем. Введенный

показатель КСВ у реализации бент-функций оказывается меньше, чем у аффинных функций. Это можно интерпретировать как то, что ИНС, являющиеся по своей природе нелинейными, реализуют нелинейные булевы функции легче, чем аффинные.

При  $n=6$  были созданы нейросетевые аналоги четырех аффинных (нелинейность 0) и четырех бент-функций (нелинейность 28). Если ожидалось, что чем выше нелинейность функции, тем сложнее структура НС и для обучения требуется больше эпох, то в этом случае наблюдается обратная ситуация. Количество нейронов на скрытом слое НС практически не отличается, но для обучения аффинных функций требуется гораздо больше эпох. Введенный показатель КСВ также оказывается меньше для бент-функций.

Следует отметить, что первое исходное предположение о том, что сложность структуры нейронной сети, заменяющей вычисление булевой функции, прямо зависит от показателя нелинейности этой функции, не подтвердилось.

Рассматривая результаты третьей серии экспериментов с комбинациями функций, отметим, что количество нейронов в скрытом слое нейронной сети, реализующей комбинацию функций, соизмеримо с суммой количества нейронов в скрытых слоях нейронных сетей, реализующих функции по отдельности. Второе исходное предположение о том, что сложность вычисления векторной комбинации функций одной ИНС не больше, чем сложность суммы двух ИНС при реализации функций по отдельности подтвердилось. Особо отметим, что КСВ для комбинации функций не только не больше, а значительно меньше, чем для функций по отдельности. Это свидетельствует о более плотной упаковке алгоритма вычисления векторной булевой функции в весовых коэффициентах ИНС, чем в скалярной булевой функции.

## Заключение

В работе рассмотрена задача замены явного вычисления значений булевых функций на вычисление с помощью искусственных нейронных сетей. Рассмотрены два класса булевых функций: аффинные и бент-функции, как наиболее различающиеся в терминах показателя нелинейности. Сделанное предположение о зависимости сложности структуры нейронной сети от показателя нелинейности в результате серии экспериментов не подтвердилось. В то же время, оказалось, что искусственные нейронные сети, реализующие векторные булевы функции, более эффективно используют весовые коэффициенты, чем ИНС, реализующие скалярные функции. Представленный в работе коэффициент сложности вычислений показал свою наглядность и простую интерпретацию.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-00656.*

## Библиографический список

1. **Елисеев, В.Л.** Искусственные нейронные сети как механизм обфускации вычислений // Труды всероссийской конференции «XVIII Сибирская научная школа-семинар с международным участием «Компьютерная безопасность и криптография» – SIBECRYPT'19» Томск 9-14 сентября 2019 г., Прикладная дискретная математика. Приложение, 2019, №12, с.165-169, doi:10.17223/2226308X/12/46

2. **S. Ardiansyah, M. A. Majid, J. M. Zain**, Knowledge of extraction from trained neural network by using decision tree, 2nd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech), Balikpapan, 2016, pp. 220-225.
3. **Милюкова, Е.А.** Исследование сложности нейросетевой обфускации векторных булевых функций / Е. А. Милюкова, В. Л. Елисеев // Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 14-20 сентября 2019, с. 75-76.
4. **Агафонова, И.В.** Криптографические свойства нелинейных булевых функций, 2007, URL: [dha.spb.ru/PDF/cryptoBOOLEAN.pdf](http://dha.spb.ru/PDF/cryptoBOOLEAN.pdf)
5. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е издание, пер. с англ. – М: Издательский дом «Вильямс», 2008.
6. **Токарева, Н. Н.** Нелинейные булевы функции: бент-функции и их обобщения // Издательство LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrücken, Germany), 2011. ISBN: 978-3-8433-0904-2. 180 с.
7. **R. Baron.** Knowledge Extraction From Neural Networks – A Survey. NeuroCOLT Technical Report Series, NC-TR-94-040, 1995
8. **Гайнулин, Н.А.** Бент-функции URL: [math.isu.ru/ru/chairs/tpdm/docs/gainulin.pdf](http://math.isu.ru/ru/chairs/tpdm/docs/gainulin.pdf)  
Глава 3. Основы ИНС, 2017, URL: <https://neuralnet.info/chapter/основы-инс>  
Бент-функция, URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бент-функция>

**Е.А. Miliukova, V.L. Eliseev**

## NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION OF SOME CLASSES OF BOOLEAN FUNCTIONS

**Abstract.** We consider the problem of synthesis of neural networks that perform the calculation of Boolean functions: bent functions and affine Boolean functions, as well as their vector combination. The complexity of the neural network architecture and computational complexity of the synthesis are investigated. To estimate a complexity of neural network implementation of a Boolean function a computational complexity factor is introduced.

**Keywords:** artificial neural networks, Boolean function, affine Boolean function, bent function.

П.В. Мисевич, А.Э.Ермилов

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье описаны тенденции развития современных систем мониторинга (МС). Анализ рынка показывает причины роста в этом сегменте. Мы имеем в виду активное развитие в таких областях, как интернет вещей, умные дома, умные города, умные электрические сети и дистанционно управляемые транспортные средства. Система мониторинга является подсистемой этих систем. Существует две актуальные задачи для разработки МС: создание теоретических основ проектирования МС и разработка инструментальных средств для проектирования и поддержки МС. В статье приведен пример разработки МС с использованием ситуационного подхода. Система мониторинга является подсистемой автономного транспортного средства. Входная информация управляется с помощью нечеткой логики в системе мониторинга. МС работает с использованием базы знаний фреймово-продукционного типа.

**Ключевые слова:** системы мониторинга, фреймовая модель, нечёткая логика, интеллектуальная поддержка, продукционная система.

### Введение

Активное развитие рынка ИТ технологий предъявляет качественно новые требования к казалось бы уже известным подсистемам, которые входят в состав практически любого проекта среднего и высокого уровня сложности. Эти требования обусловлены, с одной стороны, активной экспансией ИТ технологий всех сфер жизни человеческого общества (интернет-вещи, умный дом, умный город, беспилотные транспортные средства, умные энергосети и др). С другой стороны, необходимость поставить создание подсистем мониторинга на «конвейер», создать теоретические основы построения СМ, которые соответствуют самым высоким современным требованиям и достаточно универсальны, т.е. способны работать в различных предметных областях.

### Анализ

Предметная область современных систем мониторинга следует современным трендам развития средств автоматизации. Это

- интеллектуализация в широком и узком понимании этого термина;
- использование мобильных сервисов передачи данных операторов сотовой связи;
- активное проникновение практически во все объекты поддержания современных (системы вентиляции, сохранения продуктов, приготовления пищи, транспортные средства, электрические и газовые приборы и другие);
- поддержка интеграции объектов в умные подсистемы (умный дом, умный город, интеллектуальные сети передачи данных, умные электросети и др.);

- активное использование Интернета как инструментария интеграции объектов в единую систему;
- поддержка различных объектов и систем в течение всего жизненного цикла.

Описанные тенденции обосновывают рассмотрение современных СМ в качестве отдельной предметной области – объекта анализа и актуализируют вопросы формализации теоретических основы построения СМ и технологий их построения.

### Методика

В качестве теоретических основ построения перспективных систем мониторинга представляется целесообразным выбрать универсальную концепцию, которая понятна специалистам из различных предметных областей (техника, менеджмент, маркетинг и др.). Это:

- системный анализ и системный подход;
- ситуационный подход;
- объектно-ориентированный подход.

Выбранный авторами ситуационный подход является концептуальной основой всех этапов проектирования СМ [1] и поддержания системы в течение жизненного цикла.

При проектировании используется следующая последовательность этапов: исследование требований к перспективной системе и составление ТЗ, концептуальное проектирование системы, логическое проектирование и реализация. При этом ТЗ преследует цель описание предметной области при помощи иерархии ситуаций, концептуальное проектирование – формализацию КМ при помощи модифицированной сети фреймов [2]. Логическое проектирование системы – размещение иерархии ситуаций и системы правил нечёткой логики в элементах инструментария, реализация – отладку системы в целом [3].

Как правило, при построении систем узкой специализации (экспертные системы, систем БД, САПР и др.) используются инструментарии в форме скелетных оболочек: различные оболочки ЭС, СУБД и др. Альтернативой является создание инструментальной специализированной среды, которая облегчает по формальному описанию состава и структуры перспективной системы построение готового программного продукта. Возможны реализации комбинированных решений.

Отметим, что СМ можно построить и с использованием универсального алгоритмического языка (например С#), но реализация таких проектов «под ключ» требует значительно больших затрат (по сравнению со специализированными инструментариями).

Интеллектуализация СМ реализуется в следующих основных направлениях: создание интеллектуальных датчиков с автономным процессом обработки информации и возможностью организовываться (механизм может быть разным) в системы, создание интеллектуальных подсистем в составе СМ (экспертные блоки, подсистемы обработки и интерпретации данных, всевозможные аналитические системы/бизнес-аналитика и др./).

В реализованном авторами проекте ИИ использовался при построении БЗ гибридного типа. В ней использовался аппарат фреймов для описания иерархии ситуаций и аппарат нечёткой логики. Для реализации процедур обработки информации используется аппарат нечёткой логики [4].

Все это реализовано в скелетной оболочке СМ ситуационного типа [5], которая апробировалась при построении системы мониторинга в транспортном средстве [6].

## Экспериментальная часть и результаты

Для описания разработанной СМ рассмотрим ключевые узлы беспилотного транспортного средства, которые использовались в эксперименте (рис. 1).

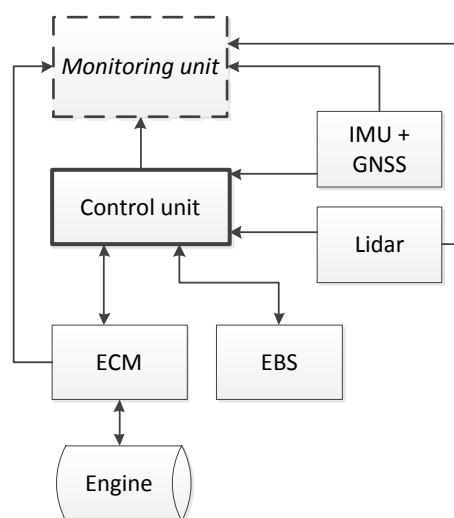


Рисунок 1.Схема мониторинга узлов БПТС

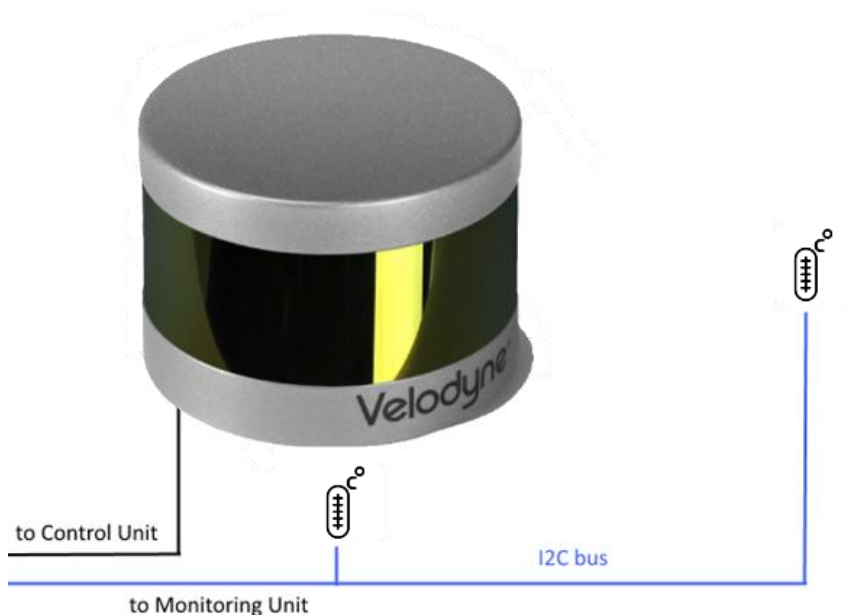
1. Monitoringunit – отдельно устанавливаемый компьютер для осуществления мониторинга системы управления БПТС.
2. Controlunit – главный компьютер БПТС, отвечающий за поведение и принятие решений.
3. IMU+ GNSS–навигационное устройство.
4. Lidar – лидар (лазерный сенсор определения препятствий).
5. ECM – электронный блок управления двигателем.
6. EBS – электронная система торможения.
7. Engine – двигатель.

Внутренние элементы «Monitoringunit» (1) и «Controlunit» (2) подвергаются мониторингу также как и ЭВМ(здесь подробно рассмотрены не будут). Это память, процессор, список процессов, диски, сеть. В навигационном устройстве «IMU + GNSS» (3) важным является отслеживание статусов сообщений (дискретные величины), а также показания инерциального навигационного блока и блока спутниковой навигации (положение, скорость движения, ускорение), и величина их расхождения.

В блоке Lidar (4) мониторингу подвергаются диагностические сообщения, температура работы устройства и температура окружающей среды. В блоке ECM (5) отслеживаются диагностические сообщения (дискретные величины), а также температура блока, заданная скорость движения (% мощности). В блоке EBS (6) отслеживаются диагностические сообщения, тормозное усилие по колёсам. В двигателе Engine (7) отслеживаются температура, ток, напряжение, скорость вращения.

В качестве примера применения аппарата ФНЛ буду рассмотрены лазерные сенсоры лидары (рис. 2). Лидары – датчики обнаружения препятствий в окружающем пространстве – необходимая часть любого беспилотного ТС. Они являются высокотехнологичными, доро-

гими и чувствительными к внешним воздействиям устройствами, в связи с чем требуется контроль за состоянием внешней и внутренней температуры устройства.



**Рисунок 2. Схема размещения датчиков измерения температуры**

Схема измерения температуры лидаров представлена на рисунке. Для осуществления измерений взяты цифровые датчики TC74A0. Датчики подключаются непосредственно к Monitoringunit по шине I2C.

Рассмотрим дискретные величины подлежащие мониторингу – диагностические сообщения. Диагностические сообщения о работе устройств отслеживаются в топике ROS diagnostic\_msgs/DiagnosticStatus. Они генерируются на блоке Controlunit и передаются на Monitoringunit по сети Ethernet.

Опишем входные лингвистические переменные, используемые во фрейме с нечёткой логикой (ФНЛ) для блока Lidar (Рисунок3):

Tin – температура внутренняя, делится на термы низкая/ средняя/ высокая,

Tout – температура внешняя (окружающей среды), делится на термы низкая/ средняя/ высокая.

Выходной лингвистической переменной будет «Уровень тревоги», в зависимости от входных величин – Alert., делится на термы низкий/ средний/ высокий.

Lidar					
idS	T	D	V	L(V)	$\mu(L(V))$
Tin°C	float	fuzzy	-40 - +125	Low/med/high	0...1
Tout°C	float	fuzzy	-40 - +125	Low/med/high	0...1
Status	string		status		
Alert	float		0...1	Low/med/high	0...1

**Рисунок 3. Фрейм описания состояния лидара**

Правила нечёткого логического вывода, применяемые в прикреплённой процедуре ФНЛ лидара:

1. Если температура  $T_{in}$  высокая и  $T_{out}$  низкая, то уровень тревоги средний.
2. Если температура  $T_{in}$  высокая и  $T_{out}$  средняя или высокая то уровень тревоги высокий.
3. Если температура  $T_{in}$  средняя и  $T_{out}$  средняя – уровень тревоги низкий.
4. Если температура  $T_{in}$  средняя и  $T_{out}$  высокая или низкая – уровень тревоги средний.
5. Если температура  $T_{in}$  низкая и  $T_{out}$  средняя или высокая – уровень тревоги средний.
6. Если температура  $T_{in}$  низкая и  $T_{out}$  низкая – уровень тревоги высокий.
7. Если температура  $T_{in}$  очень высокая или очень низкая – уровень тревоги высокий.

Благодаря возможности прикрепления процедур к слотам, в дополнение к правилам нечёткого вывода используется продукционное правило:

*Если статус устройства «ошибка», то уровень тревоги высокий.*

Данные правила вывода позволяют обнаруживать приближение опасной ситуации заблаговременно, до замерзания или перегрева лидара. Диагностические сообщения от ROS модуля дополняют картину функционирования данного устройства.

Важность мониторинга лидаров обусловлена тем, что они используются БПТС для построения карты окружающей среды и локализации в пространстве (SLAM). В свою очередь, от корректной работы лидаров зависит безопасность движения транспортного средства.

## Выводы

Анализ показывает, что при построении систем мониторинга актуальной является задача создания инструментариев автоматизации и построения и поддержки СМ в течение ЖЦ, которые соответствуют современным тенденциям развития ИТ проектов. Отсутствие единого теоретического подхода к комплексу вопросов построения систем данного класса приводит к поиску решений и их апробации на пилотных проектах. В данной статье рассматривается опыт построения на базе единой концепции инструментального комплекса построения и поддержки СМ ситуационного типа и его апробация на реальных проектах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

## Библиографический список

1. **Ермилов, А. Э.** Применение аппарата фреймов в информационном и программном обеспечении автоматизированных систем / А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии, №1(63), 2016. – С. 34-37.
2. **Ермилов, А. Э.** Автоматизация построения и поддержки систем ситуационного типа на основе скелетной оболочки системы / А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии, №3(69), 2017. – С. 62-65.
3. **Ермилов, А. Э.** Разработка инструментариев интеллектуальных систем мониторинга с использованием фреймовой модели и нечёткой логики / А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич // Нечеткие системы и мягкие вычисления (НСМВ-2014): труды Шестой всероссийской научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 27-29 июня 2014 г.). В 2 т. Т. 1. СПб.: Политехника-сервис, 2014. С. 68-75.



4. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление [Электронный ресурс] / А. Пегат ; пер. с англ. — 3-е изд. (эл.). — Электрон.текстовые дан. (1 файл pdf : 801 с.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — (Адаптивные и интеллектуальные системы).

5. **Ермилов, А. Э.** Автоматизация построения систем мониторинга ситуационного типа на основе скелетной оболочки системы (статья) / А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич // XXIV международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ–2018 посвященная 100-летию Нижегородской радиолaborатории: Труды конференции / Нижегород. гос. техн. ун-т.-Н.Новгород, 2018. С. 807-811.

6. **А.Е. Ermilov** 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 695 012016.

**P.V. Misevich, A.E. Ermilov**

## **TRENDS AND TOOLS FOR DEVELOPING OF MONITORING SYSTEMS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The development trends of the modern monitoring systems (MS) are described in the paper. Market analysis shows reasons for growing in this segment. We mean active development in such as internet of things, smart homes, cities, power nets and remotely piloted vehicles. The monitoring system is a subsystem of those systems. There are two actual tasks for the developing of the MS. They are the following: formalization of the theoretical basis for the MS design and developing the instrumental tools for projecting and supporting the MS. There is an example of developing the MS using a situational approach in the paper. The monitoring system is the subsystem of an autonomous vehicle (AV). Input Information is operated using fuzzy logic in the monitoring system. The MS operates using the frame-production knowledge base

**Keywords:** monitoring systems, frame model, fuzzy logic, intelligent supporting, production system.

М. И. Фомичёв<sup>1,2</sup>

## ОБ ИСКУССТВЕННОМ ОГРАНИЧЕНИИ ЧИСЛА ВЕРШИН ПОИСКОВОГО ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА МЕТОДОМ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

<sup>1</sup>ФКН НИУ Высшая школа экономики, г. Москва

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Классический алгоритм, реализующий метод ветвей и границ для решения задачи коммивояжёра, предложенный в 1963 году Дж. Литл, К. Мурти, Д. Суини и К. Кэрл, остаётся по настоящее время одним из самых востребованных точных алгоритмов при решении задачи нахождения гамильтонова цикла минимальной стоимости в полном взвешенном неориентированном графе. Однако, экспоненциальная асимптотическая оценка сложности алгоритма не позволяет решать ряд прикладных задач большой размерности за время, приемлемое для лица, принимающего решение. Ввиду ограниченных аналитических способностей человека и сложной структуры задачи, анализ задачи коммивояжера и разработка ресурсно-эффективного алгоритма для её решения становится непростой задачей. В данной работе представлена модификация метода ветвей и границ, позволяющая сократить время решения задачи коммивояжёра.

**Ключевые слова:** Задача коммивояжёра, метод ветвей и границ, сложность индивидуальной задачи, оценка и анализ алгоритмов, поисковое дерево решений.

### Введение

Целый ряд практических задач в области логистики сводится к классической задаче коммивояжера. Она заключается в поиске гамильтонова цикла с минимальной стоимостью в полном ассиметричном графе. Одним из самых известных алгоритмов решения задачи коммивояжёра является алгоритм метода ветвей и границ, предложенный Дж. Литл, К. Мурти, Д. Суини и К. Кэрл в 1963 году [1]. Однако, данный алгоритм имеет экспоненциальную временную сложность по размерности задачи (количество вершин в графе). Даже для не таких больших размерностей (уже при числе вершин графа порядка 50 – 60), время решения задачи коммивояжёра является неприемлемым с точки зрения лица, принимающего решения. Различные попытки, например, использование дополнительной памяти [2], позволяют сократить время решения задачи, но этого явно недостаточно. В данной работе будет представлена модификация метода ветвей и границ, которая не гарантирует точного решения, но значительно сокращает время решения задачи.

### Метод ветвей и границ

В данной работе не будет уделяться внимание всем аспектам метода ветвей и границ для решения задачи коммивояжера, однако, необходимо уделить внимание тем этапам алгоритма, которые имеют непосредственное значение для исследования. За деталями реализации метода ветвей и границ для решения задачи коммивояжера можно обратиться к следующим

литературным источникам: [1], [3], [4]. Ниже представлен псевдокод алгоритма метода ветвей и границ для задачи коммивояжера:

**A(C, n) псевдокод алгоритма метода ветвей и границ для задачи коммивояжера**  
(n - размерность, C - матрица стоимостей.)

1. Инициализация.
2. Приведение матрицы стоимостей C.
3. Установка корня поискового дерева решений  $X=R$   
приведение исходной матрицы - вычисление  $w(X)$ .

**While** ( $w(X) < z_0$ )

**begin**

4. Выбор ребра ветвления(k,l).
5. Процесс ветвления. Создание вершины  $Y^-$   
и вычисление  $w(Y^-)$ .
6. Процесс ветвления. Создание вершины Y  
и вычисление  $w(Y)$ .

**If** (размер матрицы стоимостей в вершине  $Y = 2$ )

**then**

**begin**

7. Проведение исчерпывающей оценки для вершины Y

**If** ( $w(Y) < z_0$ )

**then**

**begin**

$z_0 = w(Y)$ (запоминаем тур)

**end**

**end**

8. Выбор следующей вершины поискового дерева  
решений, и установка X
9. Вычисление фрагмента матрицы C,  
соответствующего выбранной вершине X,  
на основании пути от корня поискового  
дерева решений до текущей вершины.

**end** (while  $w(X) < z_0$ )

Оптимальное решение со стоимостью  $z_0$  найдено

**End.**

Рассмотрим некоторые этапы и важные детали этого алгоритма:

- *Этап 5.* На этом этапе реализуется ветвление, и в поисковое дерево добавляется вершина  $Y^-$ , следующая за X.
- *Этап 6.* Формирование вершины Y, следующей за X, соответствует подмножество туров из множества X, содержащих то ребро (k, l), которое выбрано на этапе 4.
- *Этап 7.* В конечном итоге процесс ветвления приводит нас к множествам, содержащим так мало туров, что можно рассмотреть каждый из них и провести оценку для этой вершины без дальнейшего ветвления. После проведения оценки необходимо запомнить тур как кандидата на оптимальный тур.
- *Этап 8.* На этом этапе необходимо выбрать следующую вершину X, от которой необходимо проводить ветвление. Этот выбор довольно очевиден: должна быть выбрана вершина поискового дерева решений, которая имеет в данный момент времени наименьшую нижнюю

границу, и из которой в данный момент времени не выходят ветви. Таким образом, это лист поискового дерева решений с минимальной оценкой.

Также хочется отметить некоторые особенности алгоритма метода ветвей и границ, которые используются в данной работе, но в других реализациях могут отличаться:

- дуга ветвления  $(k, l)$  выбирается так, чтобы нижняя оценка подмножества множества допустимых решений, которые не содержат дугу  $(k, l)$ , была бы максимальной;
- для хранения листьев поискового дерева решений используется упорядоченный список;
- процедура удаления ветвей поискового дерева решений осуществляется каждый раз при нахождении нового кандидата на оптимальное решение.

### **Способ организации доступа к листьям поискового дерева решений**

Обеспечивать доступ к листьям поискового дерева решений можно разными способами, например, обходить поисковое дерево решений, или использовать очередь с приоритетом. Согласно работе [5], обходить поисковое дерево решений очень невыгодно с точки зрения времени решения задачи, поэтому стоит использовать очередь с приоритетом (в рамках реализации в данной работе будет использоваться упорядоченный список).

Таким образом, на *этапе 5* и на *этапе 6* алгоритма метода ветвей и границ необходимо добавить новую вершину не только в поисковое дерево решений, но и в очередь с приоритетом, в которой хранятся листья поискового дерева решений (из которых потенциально может быть найден оптимальный тур). Вершину не нужно добавлять в очередь с приоритетом, если её нижняя оценка больше, чем оценка текущего кандидата на оптимальный тур.

Если на *этапе 7* алгоритма был найден новый кандидат на оптимальный тур, то необходимо удалить из очереди с приоритетом все вершины, чья нижняя оценка больше или равна стоимости кандидата на оптимальный тур.

На *этапе 8* следующую вершину для ветвления нужно выбрать из очереди с приоритетом (вершину с наибольшим приоритетом, т.е. с минимальной нижней оценкой).

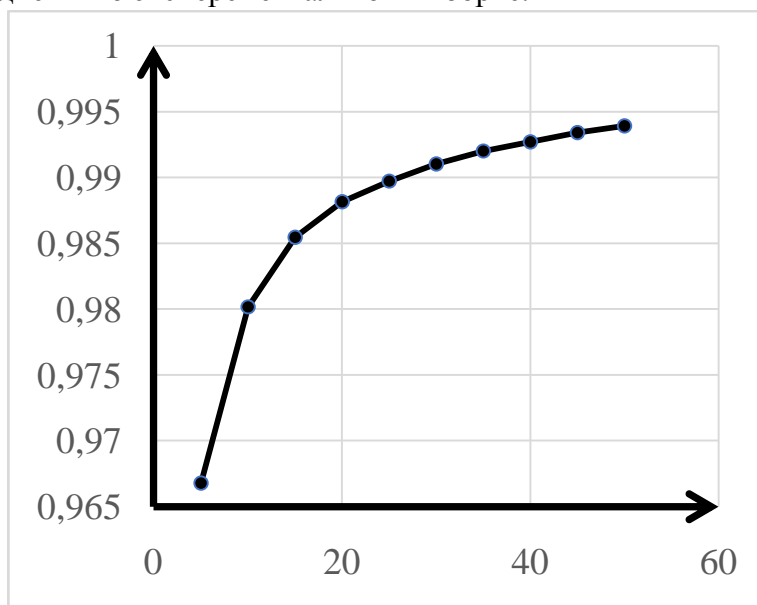
### **Искусственное ограничение числа активных вершин**

Единственное ограничение, которое накладывается на очередь с приоритетом, заключается в том, что в ней должны отсутствовать вершины, чья нижняя граница больше или равна стоимости кандидата на позицию оптимального тура. Однако, этого ограничения недостаточно для того, чтобы размер очереди с приоритетом не рос экспоненциально (и как следствие не росло экспоненциально время решения задачи).

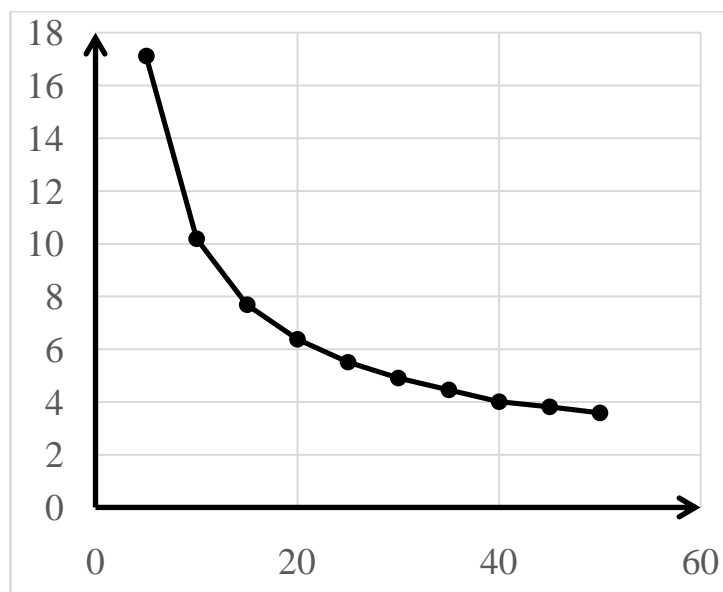
Предлагается ввести искусственное ограничение на размер очереди с приоритетом. Такое ограничение размера очереди может существенно сократить время решения задачи, однако не будет гарантировать получение точного решения.

Для данной модификации необходимо изменить *этап 5* и *этап 6* алгоритма, а именно, добавлять новую вершину в очередь с приоритетом только, если очередь с приоритетом не достигла искусственного ограничения или взамен существующей вершины (если нижняя оценка вершины меньше, чем нижняя граница наименее приоритетной вершины, то наименее приоритетную вершину удалить из очереди, а новую добавить). Очевидный интерес представляет экспериментальное исследование зависимости качества получаемых решений от длины ограниченной очереди с приоритетом, которое позволит сформулировать практические рекомендации по применению предложенной модификации алгоритма.

На рис. 1 и 2 представлены предварительные экспериментальные результаты. Предварительная экспериментальная выборка состояла из 100 000 различных несимметричных задач коммивояжеров размерностью 45. Стоимости переходов между городами являются равномерно распределенные целые случайные числа в интервале от  $[1; 10^6]$ . На рис. 1 представлена зависимость точности решения задачи коммивояжера от максимально допустимого размера очереди с приоритетом, в которой хранятся листья дерева решений. А на рис. 2 представлена зависимость отношения времени работы алгоритма методом ветвей и границ без ограничения очереди (классическая реализация алгоритма) к времени работы алгоритма с ограничением очереди от размера очереди. Результаты экспериментов усреднены по экспериментальной выборке.



**Рисунок 1. Зависимость точности решения задачи от размера очереди для  $n = 45$  (усредненное по 100 000 задачам)**



**Рисунок 2. Зависимость отношения времени работы алгоритма методом ветвей и границ без ограничения очереди к времени работы алгоритма с ограничением очереди от размера очереди для  $n = 45$  (усредненное по 100 000 задачам)**

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод, что ограничение размера очереди с приоритетом существенно сократит время, затраченное на решение задачи коммивояжера, при этом точность найденного решения не будет низкой.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00151 и №19-07-00150.*

### Библиографический список

1. **J. D. C. Little, K. G. Murty, D.W. Sweeney, and C. Karel**, “An algorithm for the traveling salesman problem,” *Operations Research*, vol. 11, pp. 972–989, 1963.
2. **Ulyanov M. V., Fomichev M. I.**, Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesman problem, *Business Informatics*, no. 34, pp. 38-46, Dec. 2015.
3. **Гудман, С.** Введение в разработку и анализ алгоритмов / Гудман, С., Хидетниемеи С. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
4. **Ульянов, М.В.** Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 – 304 с.
5. **Ульянов, М. В.** Подходы к организации поискового дерева решений в методе ветвей и границ для асимметричной задачи коммивояжер / М.В. Ульянов, М.И. Фомичев // *Информационные технологии*. 2018. Т. 24. № 11. С. 698-704.

**M. I. Fomichev<sup>1,2</sup>**

### NEW APPROACH FOR EVALUATING THE TRAVELLING SALESMAN PROBLEM

<sup>1</sup> Higher School of Economics, Moscow,

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The classical Branch and Bound algorithm for solving the Traveling Salesman Problem, introduced in 1963 by J. D. C. Little, K. G. Murty, D. W. Sweeney, and C. Karel, is still one of the most applied accurate algorithms to find Minimum Cost Hamiltonian Circuit in a complete weighted undirected graph. However, exponential asymptotic computational complexity estimation of the algorithm does not allow to solve a number of applied large dimension problems for time, which is acceptable to the decision-maker. Due to limited analytical person abilities and complex problem structure, the analysis of the Travelling Salesman Problem and the development of a resource-efficient algorithm to solve it becomes a uneasy task. This paper presents a new modification of the Branch and Bound Method to reduce time for resolving Traveling Salesman Problem.

**Keywords:** Travelling Salesman Problem, Branch and Bound Method, complexity of the individual problem, evaluation and analysis of algorithms, search decision tree.

А.О. Боровилов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЕЙ В СОЗДАНИИ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖЕЙ СУДОВ

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"  
г. Нижний Новгород

Описан функционал виртуального тренажера и приложения дополненной реальности, направленные на формирование у обучающихся практических и теоретических навыков одиночной и командной заделки пробоев в корпусе судна.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, дополненная реальность, компьютерные системы, тренажерная подготовка

1. В процессах первичного обучения, а также циклов повышения квалификации и переподготовки членов экипажей, как морских, так и речных судов все чаще используются различные компьютерные системы, отличающиеся высоким уровнем наглядности предметного материала, и относительной простотой внедрения таких систем в учебный процесс. Такие системы открыли новый этап в методиках преподавания различных дисциплин и, в том числе, используются для формирования тех или иных ныне востребованных профессиональных навыков.

Вместе с тем, применение подобных систем в обучении не в состоянии покрыть целый ряд учебных мероприятий, в которых необходимо взаимодействие обучающихся с реальными устройствами и механизмами. К таким мероприятиям применительно к отраслевой специфике водного транспорта относятся занятия по обучению членов экипажей судов вопросам выживания на воде, борьбе с водотечностью, пожарами, оказанию первой медицинской помощи. Для формирования необходимых профессиональных компетенций в этих областях, в Российской Федерации имеется целый ряд береговых учебно-тренировочных центров (УТЦ) и учебно-тренировочных судов (УТС).

Перечень знаний, умений и навыков, необходимых для формирования профессиональных компетенций, методы их демонстрации и критерии оценки с указанием соответствующих разделов программы, регламентируются Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ) [1].

Согласно правилу VI/1 данной конвенции к основным профессиональным компетенциям членов экипажа судна относятся:

- выживание в море в случае оставления судна;
- сведение к минимуму риска пожара и поддержание состояния готовности к действиям в аварийных ситуациях, связанных с пожаром;
- тушение пожара и борьба с огнем;
- принятие немедленных мер при несчастном случае или в иной ситуации, требующей неотложной медицинской помощи;
- соблюдение порядка действий при авариях;
- принятие мер предосторожности для предотвращения загрязнения морской среды;
- соблюдение техники безопасности;

- содействие установлению эффективного общения на судне;
- содействие установлению хороших взаимоотношений между людьми на судне;
- понимание и принятие необходимых мер для управления усталостью.

Для формирования перечисленных компетенций на УТС и в УТЦ отрабатываются, в частности, такие навыки, как:

- спуск спасательных средств на воду;
- борьба с пожаром в закрытых помещениях;
- борьба с водой;
- оказание первой медицинской помощи.

Традиционные подходы в обучении и формировании такого рода профессиональных компетенций отличаются длительностью реализации и значительными материальными затратами. Именно поэтому в рамках работы над государственным заданием по созданию модульного учебного тренажерного центра командой разработчиков ФГБОУ ВО «ВГУВТ» было предложено использовать современные компьютерные средства, а именно средства виртуальной реальности (VR) и средства дополненной реальности (AR) для создания тренажерного комплекса, направленного на формирования у обучающихся компетенций, описанных в VI главе конвенции ПДНВ.

Тренажерный комплекс состоит из виртуального тренажера одиночной заделки пробоин в корпусе судна, виртуального тренажера командной заделки пробоин в корпусе судна, виртуального тренажера, направленного на формирование у обучающегося умений и теоретических навыков а также приложения дополненной реальности (AR-приложения).

2. Виртуальный тренажер одиночной заделки пробоин в корпусе судна направлен на формирование у обучающегося компетенций по использованию различных средств заделки пробоин в зависимости от типа пробоины и места локализации повреждения корпуса судна.

Первым этапом разработки тренажера стало изучение теоретических основ заделки пробоин. Изучение происходило, как самостоятельно, так и с постоянными консультациями с сотрудниками УТС. Команда разработчиков несколько раз выезжала на базу УТС, где знакомилась с оборудованием тренажера и методами заделки пробоин.

Исследованные методы борьбы с водотечностью легли в основу создаваемого тренажера. Приведем их далее.

2.1. Заделка пробоин малых размеров. Мелкие пробоины круглой или близкой к ней формы в стенке корпуса судна заделывают либо сосновыми пробками, либо в случае небольшой пробоины резаного характера (трещины) сосновыми клиньями. Пробки и клинья забиваются в стенки корпуса судна при помощи специального молотка, входящего в комплект аварийного снабжения судна.

2.2. Заделка пробоин средних размеров. Для заделки пробоин малых и средних размеров на плоских или имеющих незначительную кривизну участках обшивки используют деревянные пластыри с мягкими бортами. Установленный на пробоину пластырь прижимают к борту или деревянными упорами с клиньями или раздвижными металлическими упорами или универсальной струбциной. При этом для установки деревянного пластыря необходимо участие не менее трех человек.

2.3. Заделка днищевой пробоины. Заделка пробоины в днище отсека может происходить несколькими способами. Либо можно использовать деревянный щит, который устанавливают на пробоину, а затем прижимают к борту деревянными упорами с клиньями. Либо, можно использовать цементный ящик.



2.4. Заделка пробоины трубопровода. **В рамках учебно-тренажерной подготовки членов экипажа судов в качестве метода заделки пробоины трубопровода практикуют наложение бугелей.** Данный метод является наиболее распространенным, удобным и надежным способом устранения повреждений трубопровода.

2.5. Заделка пробоины иллюминатора. Заделка пробоины иллюминатора происходит аналогичным образом заделке пробоин средних размеров, за исключением того, что в качестве пластыря используется деревянный щит.

2.6. Заделка больших пробоин в корпусе судна с использованием мягкого пластыря. Задача заделывания пробоин с использованием мягкого пластыря сложно воспроизводима в условиях обучения на базе УТЦ или УТС, и на практике обучают ей достаточно редко.

Как правило, обучение ограничивается теоретической подготовкой и просмотром обучающих видеofilьмов, где демонстрируются принципы заделывания таких пробоин.

Необходимо отметить, что наличие всех типов пробоин на УТС и УТЦ является обязательным условием государственной аккредитации, что диктуется в первую очередь конвенцией ПДНВ. Для формирования компетенций у членов экипажа судна, необходимо освоение ими всех способов заделки пробоин с использованием всех вышеприведенных инструментов. Следовательно, разрабатываемый тренажер также должен обладать функционалом по заделке всех видов пробоин, предусмотренных конвенцией ПДНВ.

На данный момент виртуальный тренажер реализует мероприятия:

- заделывание пробоин с использованием соснового клина;
- заделывание пробоин с использованием пластыря и универсальной струбцины;
- заделывание пробоин с использованием пластыря и раздвижного упора;
- заделывание пробоины в иллюминаторе с использованием щита и упора;
- устранение водотечности из водонепроницаемой двери, в случае затопления смежного отсека.

На первом этапе разработки тренажера выполнялось моделирование трюмного помещения водоизмещающего судна, в котором обучающемуся предстоит осваивать навыки заделки пробоин. Помещение представляет собой комнату прямоугольной формы, по продольным стенам которой располагаются шпангоуты, а по центру комнаты идет небольшая перегородка, выполненная в форме арки. В потолке трюма имеется люк, через который можно попасть в верхнее помещение, в котором лежат инструменты, служащие для заделки пробоин (рис. 1). Список доступных обучающемуся инструментов включает в себя сосновый клин, молоток, универсальную струбцину, раздвижной упор, пластырь (рис. 2).



**Рисунок 1. Трюмное помещение.**



**Рисунок 2. Доступные инструменты.**

Создание первой версии тренажера происходило на базе игрового движка UnrealEngine, тогда как в последующих разработках уже использовался Unity. В процессе моделирования способов использования инструментов для заделывания пробоин был создан ряд функцио-

нальных библиотек и классов, использование которых значительно генерализировало процесс реализации функционала для каждого нового инструмента. Использование инструментов в тренажере максимально приближено к реальному процессу. Например, раздвижной упор может быть установлен только между продольной стеной трюма и основанием арки, причем только после раздвижения упора на определенную длину. Струбцина может быть установлена лишь к шпангоутам, пластырь к ней может быть подведен лишь после установки определенного угла у поворотной ручки (рис. 3).



**Рисунок 3. Струбцина, готовая к установке**

Пробоины в отсеке судна возникают в произвольном порядке, от обучающегося требуется:

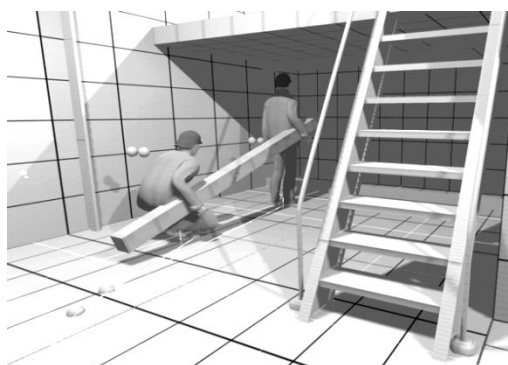
- осмотреть место пробоины в корпусе судна;
- принять решение о необходимом инструменте, который будет использоваться для заделки пробоины, в зависимости от места ее возникновения.

Разработанный виртуальный тренажер был представлен на форуме «Транспортная неделя 2018» в Москве, где получил, в основном, положительные отзывы. Была отмечена высокая степень визуальной проработки концепта, а также полное погружение в происходящие события. Также тренажер демонстрировался в министерстве транспорта РФ, где также получил достаточно высокую оценку; вместе с тем, были высказаны замечания, связанные, во-первых, с невозможностью на практике заделки пробоин в одиночку и, во-вторых, тренажер не в полной мере охватывает виды возможных пробоин.

С целью учета данных замечаний ныне разрабатывается виртуальный тренажер командной заделки пробоин в корпусе судна. В этом тренажере обучающемуся предстоит выступать в роли командира бригады, руководящего действиями команды из пяти человек.

Здесь предполагается, что обучающийся имеет представление об использовании основных инструментов и методов заделки пробоин и может применять полученные навыки для заделки пробоин в более сложных, чем в вышеописанных базовых моделях ситуаций.

В данном тренажере процесс установки сложных конструкций проиллюстрирован так, как он выполняется в реальности: тяжелые элементы, невозможные к установке в одиночку, перемещаются и устанавливаются двумя и более персонажами – ботами (рис. 4).



**Рисунок 4. Установка элемента конструкции ботами**

В связи с невозможностью компьютерного моделирования ряда разделов из VI главы ПДНВ, посвященные теоретическим вопросам медицины, спуска плотов и ряда других был разработан виртуальный тренажер для проведения различного рода тестирований среди обучающихся в формате викторины (рис. 5).



**Рисунок 5. Виртуальный тренажер, направленный на формирование у обучающегося теоретических навыков**

Помимо тренажера виртуальной реальности было разработано приложение дополненной реальности, содержащее сопроводительную информацию к методическим и учебным пособиям в виде наглядных 3D моделей.



**Рисунок 6. Распечатка методического пособия, содержащего информацию о спасательных плотах**



**Рисунок 7. 3D модель плота в приложении дополненной реальности**

На рис. 6 представлена распечатка методического пособия, содержащего информацию о спасательных плотах на листе А4. На рис. 7 приведен снимок экрана планшета, на котором установлено специализированное программное обеспечение, распознающее лист методического пособия и дорисовывающее в необходимой позиции 3D модель спасательного плота.



**Рисунок 8. Презентация тренажера на транспортной неделе в Москве**

Данный комплекс разработок был представлен на стенде РОСМОРРЕЧФЛОТА на форуме «Транспортная неделя 2019» в Москве, где получил положительные отзывы. Была отмечена высокая степень визуальной проработки концепта, а также полное погружение в происходящие события. Респондентам, впервые столкнувшимся с ВР, поначалу было не просто освоить навигацию, что вполне объяснимо и было ожидаемо. Однако уже после прохождения тестового сценария большинство респондентов начинали чувствовать себя вполне уверенно и активно участвовали в заделке пробоин виртуального отсека судна.

Стенд собрал вокруг себя большое количество участников и гостей форума, среди которых были, как курсанты учебных заведений водного транспорта, которые знакомы с заделкой пробоин на практике, так и просто желающие побывать в роли членов экипажей, столкнувшихся с аварийной ситуацией на судне (рис. 8).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

---

1. Международная Конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78) с поправками (консолидированный текст). International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 as amended. СПб.: ЦНИИМФ, 2016. 824 с.

**A.O. Borovilov**

**USE OF VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN CREATION OF TRAINING SYSTEMS FOR PREPARING VESSELS CREW MEMBERS**

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "VSUWT",  
Nizhny Novgorod

The article describes the functionality created on the basis of the VSUWT virtual simulator complex for training crew members of ships

**Keywords:** virtual reality, augmented reality, computer systems, simulator training

Т.И. Гаврилова<sup>1</sup>, Е.Н. Поселенов<sup>1</sup>, А.В. Чернышов<sup>2</sup>, М.М. Чиркова<sup>1</sup>

## ОБОСНОВАНИЕ ФАКТОРОВ БЕЗОПАСНОГО ПРОХОДА СУДНОМ ПРОБЛЕМНОГО УЧАСТКА

<sup>1</sup>«Волжский государственный университет водного транспорта»

<sup>2</sup>Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Рассматривается возможное решение задачи повышения безопасности движения водоизмещающего судна на сложных участках судового хода с помощью учета большего количества информационных факторов и увеличения скорости работы рулевого привода.

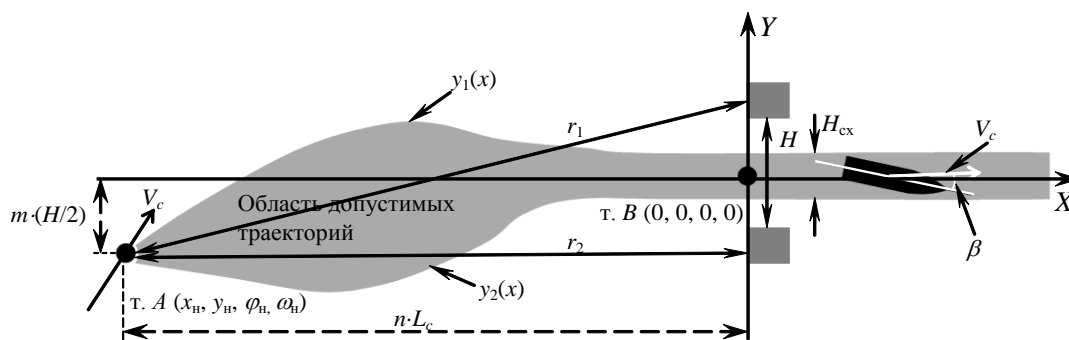
**Ключевые слова:** управляемость судов, информационное обеспечение, управление подвижными объектами.

### Введение

Уменьшение количества аварий – одна из задач на транспорте, в том числе и водном. Несмотря на нормативы, закрепленные в документах Российского Речного Регистра, проблема с аварийностью при управлении движением судов, такой, как навалы на опоры мостов, посадки судов на мель остается до конца не решенной [1-3]. Нередко причиной аварий, кроме неисправного оборудования или неблагоприятной внешней среды, объявляют человеческий фактор. А такой важный фактор, как недостаточность информации при принятии решения, не рассматривается.

Цель данной работы - на примере моделирования прохода судами пролетов моста показать, что причиной аварийной ситуации может быть недостаточность информации при принятии решения и, в итоге, запаздывание принятия решения или принятие неверного решения, ведущего к аварии.

Для этого рассматривается задача перевода объекта из т. А в т. В, где т. А – место принятия решения о выводе объекта на проблемный участок пути, т. В – начало проблемного участка (рис.1).



**Рисунок 1.** Схема подхода судна к участку между опорами моста

На рисунке:  $H$  – ширина пролета моста,  $H_{сх}$  – необходимая ширина судового хода, которая зависит от ширины, длины судна и угла дрейфа  $\beta$  (угол между диаметральной плоскостью

судна и вектором скорости движения  $Vc$ ). Координаты состояния объекта в т. А:  $x_n \pm \delta x$ ,  $y_n \pm \delta y$ , курсовой угол  $\varphi_n = \text{var}(t)$ , угловая скорость поворота судна  $\omega_n = d\varphi_n/dt$ .

Координаты состояния в т. В:  $x_k = 0 \pm \delta x$ ,  $y_k = 0 \pm \delta y$ , курсовой угол  $\varphi_k = 0 \pm \delta \varphi$ ,  $\omega_k = 0 \pm \delta \omega$ .

При моделировании координата  $x_n$  измеряется в количествах длин судна ( $Lc$ ),  $n = x_n/Lc$ ,  $y_n$  – в количествах размеров пролетов мостов  $m = y/(H/2)$ . Управление движением должно удовлетворять условию: для любого  $x(t)$  должно выполняться условие  $y_2(x) \leq y(x) \leq y_1(x)$ .

### Моделирование процесса проводки судна по проблемному участку

Цель моделирования – провести сравнение траекторий судов при проходе пролетов моста и определить необходимое информационное обеспечение для гарантированного прохода судном проблемного участка.

В работе введены следующие обозначения:

$U = f_1(c_1 u_1, c_2 u_2, \dots, c_n u_n)$ , где  $u_i$  – информационные составляющие, используемые в алгоритме управления:

- информация о заданной величине управления  $U(t)$  и реального положения руля  $\alpha(t)$ ,
- информация об отклонении объекта от заданного в момент  $t$  ни текущего направления движения  $-\Delta\varphi(t)$ ,
- информация об угловой скорости ухода с заданного направления  $-\omega(t)$ ,
- информация о величине  $\Delta Y(x)$  – отклонении центра тяжести судна от генерального направления движения  $X$ .

$P = f_2(p_1, p_2, \dots, p_k)$ ,  $p_i$  – факторы, влияющие на процесс перехода объекта из т. А в т. В двумерного пространства  $X-Y$ . Наиболее значимые факторы:

- точность датчиков измерительной аппаратуры  $\delta\varphi$ ,  $\delta\omega$ ,  $\delta\beta$ ,  $\delta\alpha$ ;
- быстродействие исполнительных органов  $d\alpha/dt$ ,
- точность работы навигационной системы  $\delta r_1$ ,  $\delta r_2$ , текущие значения координат  $X(t)$ ,  $Y(x)$  вычисляются по данным, полученным с радиобуев  $X(t) = f_1(r_1, r_2)$ ,  $Y(x) = f_2(x(t), r_1, r_2)$ , разница между  $X_n$  и  $X_k$  пересчитывается в длинах судна  $nLc$ , разница между  $Y_n$  и  $Y_k$  пересчитывается в количествах  $mH/2$ ,
- время принятия решения  $t_n$  – это время для каждого проекта судна определяется допустимым соотношением  $n/m$ , незнание этого соотношения может привести к запаздыванию принятия решения и, в результате, к повторной попытке выхода в заданную точку,

– состояние внешней среды – глубины фарватера.

$K = f_3(k_1, k_2, \dots, k_m)$ , где  $k_i = f_3(U, P)$  – частные показатели процесса движения.

- максимальное значение управления  $U_{\max}$  (перекладки рулевых органов),
- максимальное значение  $\Delta Y_{\max}$  в момент прохода проблемного участка,
- максимальное значение угла дрейфа  $\beta_{\max}$ ,
- необходимая ширина судового хода ( $H_{cx}$ ), зависящая от  $\Delta Y_{\max}$ ,  $\beta_{\max}$  и ширины судна,
- отношение пройденного пути  $S_n$ , к возможному  $S_0$  ( $k_s = S_n/S_0$ ).

В данной работе менялись следующие факторы  $p_i$ :

– глубина фарватера, рассматривались две ситуации: движение по глубокой воде и на мелководье,

– соотношение  $n/m$  в начале траектории движения в точку В,

– скорость перекладки рулей ( $d\alpha/dt$ );

– точность  $\delta Y$ , рассматривались две ситуации: первая – информация о величине  $Y(x)$  поступала от датчиков  $r_1$ ,  $r_2$ , и позволяла оценить отклонение с точностью  $\delta Y = \pm 1$  м, вторая – величина  $Y(x)$  оценивалась судоводителем с точностью  $\delta Y \approx \pm 10$  м;

Вид и показатели траекторий судна получены по результатам компьютерного моделирования. Использовалась классическая модель, описанная в [4]. Оценки коэффициентов математической модели получены из результатов обработки данных натурных испытаний нефтеналивного судна проекта 558.

В данной работе по результатам моделирования проводился анализ траекторий судов при проходе опор 3-х мостов, расположенных аналогично мостам в районе г. Нижний Новгород (р. Волга) по причине, изложенной в [5]. Ширина между опорами первого и второго мостов  $H=80$  м, расстояние между мостами 100 м. Для оценки качества проводки оценивались все показатели  $ki$ . Скорость движения судна – 2 м/с, время наблюдения – 360 сек.

На рис. 2 представлена ситуация прохода пролетов моста судном проекта 558 при худшем сочетании факторов.

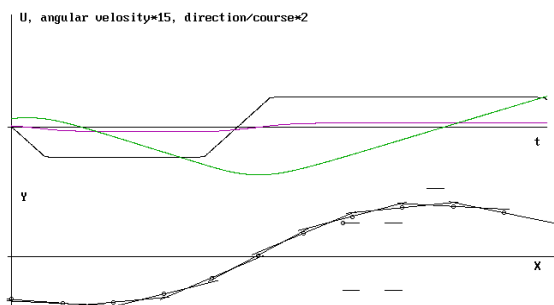
Факторы: мелководье,  $t_n=200$ сек,  $n/m=2.4$ ,  $da/dt=2^\circ/\text{сек}$ ,  $\delta Y=10$ м.

Показатели во время прохода опор  $U_{max}=35^\circ$ ,  $\Delta Y_{max}=60$ м,  $\beta_{max}=18^\circ$ ,  $H_{сх}=58$  м.

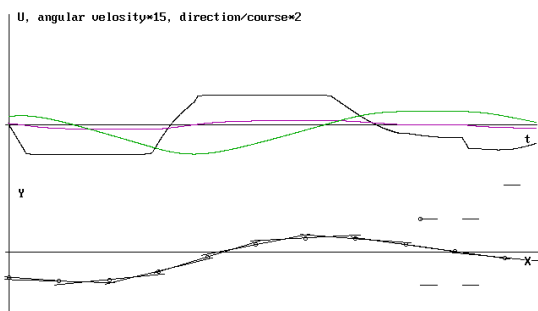
На рис. 3 представлена ситуация прохода пролетов моста судном проекта 558 при лучшем сочетании факторов.

Факторы: Факторы: мелководье,  $t_n=200$ сек,  $n/m=5.2$ ,  $da/dt=4^\circ/\text{сек}$ ,  $\delta Y=1$ м.

Показатели во время прохода опор моста  $U_{max}=35^\circ$ ,  $\Delta Y_{max}=17$ м,  $\beta_{max}=17^\circ$ ,  $H_{сх}=56$  м.



**Рисунок 2. Проход пролетов моста судном проекта 558 при худшем сочетании факторов**



**Рисунок 3. Проход пролетов моста судном проекта 558 при лучшем сочетании факторов**

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы и предложить некоторые пути решения поставленной задачи повышения безопасности движения судов по проблемным участкам пути.

Выводы по факторам, влияющим на процесс перехода объекта из точки  $X_n, Y_n$  в т.  $X_k, Y_k$ :

- глубина судового хода мало влияет на показатели прохода, если скорость перекладки рулевых органов высокая –  $da/dt \approx 4^\circ/\text{с}$ ;
- при отношении  $n/m \geq 5$  для исследуемых судов можно гарантировать безопасный проход проблемного участка пути только при  $da/dt \approx 4^\circ/\text{с}$  и  $\delta Y \approx 1$ м,
- скорость работы привода больше всех остальных факторов влияет на безопасность движения,
- время принятия решения связано с длиной судна, шириной проблемного участка (величиной  $n/m$ ) и начальными значениями координат  $\beta(t_n), \omega(t_n), \Delta\psi(t_n)$ . Эта зависимость может быть оценена только экспериментальным путем для каждого проекта судна и должна быть внесена в его паспортные данные.
- точность  $\delta Y$  при  $da/dt \approx 2^\circ/\text{с}$  не влияет на показатели движения, но при  $da/dt \approx 4^\circ/\text{с}$  влияние заметное.

По компонентам  $ui$ , влияющим на процесс: в данной работе компоненты управления  $\varphi, \psi, \omega, \Delta Y, U(t)$ ,  $a$  не менялись, но по проведенным ранее натурным испытаниям были сделаны

выводы, что для формирования управления необходима дополнительная информация:  $d\omega/dt$ ,  $\beta(t)$ ,  $da/dt$ .

Выводы по наиболее значимым факторам, которые повышают вероятность аварий.

1. Запаздывание в принятии решения, когда начальное соотношение  $n/m$  меньше допустимого для данного типа суда значения, где  $n$  – расстояние до начала проблемного участка ( $X_n$ ), измеренное в длинах судна ( $X_n = n \cdot L_c$ ),  $m$  – начальное отстояние ( $Y_n$ ) от направления движения  $X$ , измеренное в ширине прохода  $H$  ( $Y_n = m \cdot H/2$ ).

2. Замедленная реакция рулевого привода ( $da/dt$ ) на изменение управляющего воздействия  $U(t)$ .

### Заключение

Проведенный в работе анализ характеристик движения судна показывает, что повышение надежности прохождения узостей возможно за счет:

- расширения информационного обеспечения рулевого/авторулевого, в частности, оценки отклонения его центра тяжести от заданной траектории и расстояния его центра тяжести до начала проблемного участка;
- повышения скорости работы привода рулевых органов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

### Библиографический список

1. Авария на морских (речных) судах - Revolution - Allbest. [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [https://revolution.allbest.ru/life/00306009\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/life/00306009_0.html), свободный (26.08.2019).
2. **Зайков, В.И.** Повышение безопасности при движении судов под мостами [текст] / В.И. Зайков, М.А. Колосов. – Транспорт Российской Федерации, 2006, № 5, 39-40 с.
3. **Груздев, Н.М.** Классификация, статистика и основные причины морских происшествий / Н.М. Груздев. [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://podlodka.info/education/23-analysis-of-navigational-information/259-classification-of-statistics-and-main-causes-of-marine-accidents.html?showall=1> (26.08.2019).
4. **Войткунский, Я.И.** Управляемость водоизмещающих судов: Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский - Л.: Судостроение, 1985. Т. 3. С. 544.
5. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан. Н. Новгород, 2014. – Режим доступа: <https://mintrans.government-nnov.ru/?id=96650> (26.08.2019).

**T. I. Gavrilova<sup>1</sup>, E.N. Poselenov<sup>1</sup>, A.V. Chernyshov<sup>2</sup>, M.M. Chirkova<sup>1</sup>**

### REASON OF FACTORS OF SAFE PASSAGE BY VESSEL VIA PROBLEM AREA

<sup>1</sup>Volga state university of water transport?

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev,

A possible solution to the problem of increasing the safety of a displacement vessel in difficult sections of the ship's course is considered by taking into account a greater number of information factors and increasing the speed of the steering drive.

**Key words:** controllability of vessels, information support, traffic control of vessel, dynamics of controlled objects.



Р.Э. Галеев, А.В. Соловьев, Ю.С. Федосенко

## ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗНОЙ ТРАЕКТОРИИ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается подход к моделированию прогнозной траектории движения судна в реальном масштабе времени. Программно-аппаратная реализация излагаемого подхода в виде штатной системы поддержки принятия решений при управлении движением судна будет способствовать снижению аварийности и повышению уровня обеспечения безопасности плавания.

**Ключевые слова:** управление движением судна, прогнозная траектория, система поддержки принятия решений.

1. Основной целью создания системы поддержки принятия решений в судовождении (СППРС) является повышение уровня обеспечения безопасности судоходства. Такая система должна учитывать актуальные особенности акватории плавания, навигационные и гидрометеорологические условия, техническую оснащенность конкретного судна и подготовку его судоводителей [1, 2]. Использование СППРС позволит минимизировать влияние потенциально некорректных и ошибочных действий при «ручном» управлении движением судна.

Существующие СППРС в реальном масштабе времени предоставляют судоводителю информацию об актуальных значениях координат местоположения судна, параметров, характеризующих техническое состояние отдельных энергетических установок и вспомогательного оборудования, а также о состоянии окружающей обстановки.

В частности, в таких системах представлены решения, обеспечивающие метеорологический прогноз, мониторинг параметров состояния отдельных инженерных систем судна, предупреждающих об отклонениях их значений от заданных границ и прогнозирующих развитие неблагоприятных процессов, с возможным выходом из строя той или иной судовой системы.

Кроме этого, на некоторых судах имеются программно-технические средства, выполняющие отдельные элементы прогнозирования с использованием данных радиолокатора, что позволяет судоводителю на основании курсовой отметки выявлять по линии движения обстоятельства, требующие принятия решений по изменению траектории движения судна.

В целях снижения уровня субъективного предвидения судоводителем траектории движения судна актуальной является задача повышения точности прогнозирования на основании значений текущих динамических параметров судна и визуального отображения траектории движения судна, своевременного определения конечной точки маневра на заданном интервале времени.

Ниже в статье описывается подход к построению прогнозной траектории движения судна с использованием цифрового прогнозного моделирования. Реализация развиваемого подхода позволит в реальном масштабе времени осуществлять непрерывное прогнозирование траектории движения судна на приемлемом для практики временном промежутке и представлять

её на интегрированной информационной панели для принятия судоводителем решений об управляющем воздействии.

2. Программное моделирование траектории движения судна (ПМТДС) как части судовой СППРС возможно на основе данных о маневренных и инерционных характеристиках судна, а также с учетом информации, получаемой в непрерывном режиме от датчиков положения органов управления движительно-рулевым комплексом, показаний линейной и угловой скоростей судна.

Возможность моделирования траектории движения судна обусловлена наличием адекватной математической модели судна, которая должна учитывать статические и динамические его характеристики.

Для решения задачи определения динамики подвижного объекта в условиях внешних возмущающих воздействий может быть использована математическая модель, в основе которой лежит система нелинейных дифференциальных уравнений по отношению к центру тяжести судна в системе координат, связанной с Землей, и уравнений Эйлера относительно главных осей инерции объекта:

$$\frac{d\beta}{dt} = -q_{21}\beta - r_{21}\omega - s_{21}\alpha - h_1|\beta|\beta, \quad \frac{d\omega}{dt} = -q_{31} - r_{31}\omega - s_{31}\alpha, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \quad (1)$$

где  $\beta$  – угол дрейфа судна,  $\omega$  – угловая скорость судна,  $\varphi$  – угол отклонения судна от заданного курса,  $\alpha$  – угол перекладки руля судна,  $q_{21}, r_{21}, s_{21}, q_{31}, r_{31}, s_{31}, h_1$  – гидродинамические коэффициенты, определяемые в результате натурных испытаний для каждого конкретного судна и характеризующие его динамику при изменении внешних факторов (глубина фарватера, осадка судна и т.п.), т.е. отображающие его маневренные характеристики. Указанные коэффициенты учитывают факторы, как улучшающие поворотливость, также и ухудшающие ее. Например, дифферент судна на корму ведет к ухудшению поворотливости, а дифферент на нос приводит к улучшению поворотливости.

3. Маневренные характеристики конкретного судна первоначально определяют при заводских, и натурных испытаниях судна с полным грузом и порожнем. На основе результатов натурных испытаний и дополнительных расчетов составляется свод маневренных характеристик судна (Резолюция ИМО А. 601(15) «Требования к отображению маневренной информации на судах» [3]). Информация, представленная в своде маневренных характеристик, состоит из двух частей – основной и дополнительной: основная часть, в виде таблицы вывешиваемая на ходовом мостике, и дополнительной часть, учитывающая специфику конкретного судна, а также динамику влияния внешних факторов на его маневренные качества при различных условиях плавания.

Для определения маневренных характеристик могут использоваться любые натурные и расчетные методы, обеспечивающие точность конечных результатов в пределах  $\pm 10\%$  отклонения от точного значения измеряемой величины. Натурные испытания проводят при благоприятных погодных условиях, ветре до 4 баллов, волнении до 3 баллов, достаточной глубине и без заметного течения.

Траектория движения центра тяжести судна при перекладке руля на определенный угол и его удержание является циркуляцией. Как правило, этим же термином обозначают процесс поворота судна.

Циркуляция характеризуется линейной и угловой скоростями, радиусом кривизны и углом дрейфа. Эти характеристики не остаются постоянными. Процесс циркуляции принято делить на три периода.

Первый период – маневренный, продолжается в течение времени перекладки руля и длится не более 15–20 с.

Второй период – эволюционный, начинается с момента окончания перекладки руля и заканчивается, когда характеристики циркуляции примут фиксированные значения.

Третий период – установившийся, начинается с момента окончания второго периода и продолжается до тех пор, пока руль остается в переложенном положении [4].

4. Для целей построения ПМТДС необходимо рассмотреть второй период циркуляции – эволюционный, как основной в процессе управления судном. Время перекладки руля на борт, как правило, не превышает 8-15 секунд, и достаточно мало по сравнению с последующими периодами циркуляции, что позволяет при моделировании ПМТДС считать перекладку руля мгновенной для целей упрощения расчетов траектории неустановившегося движения судна [5].

Проведение расчетов элементов циркуляции «вручную» путем решения системы уравнений (1) в условиях работы судоводителя не представляется возможным. Соответственно на практике для конкретного судна используется информация о поворотливости в виде специального планшета-шаблона (рис. 1).

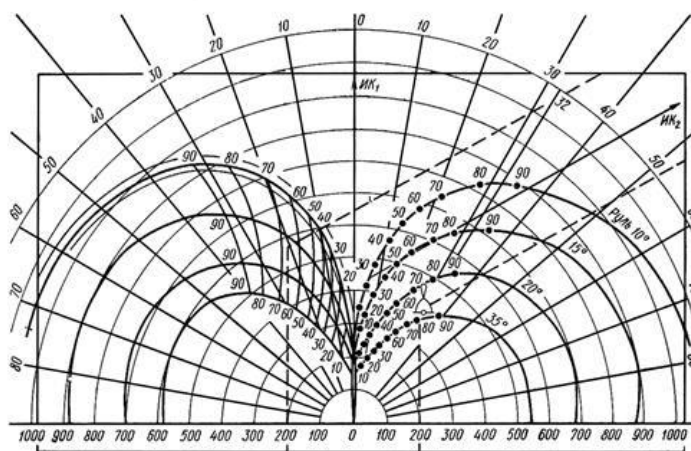


Рисунок 1. Выполнение поворотов с использованием планшета циркуляций

На судах современных проектов данная информация содержится в судовых характеристиках бортового компьютера (рис.2).

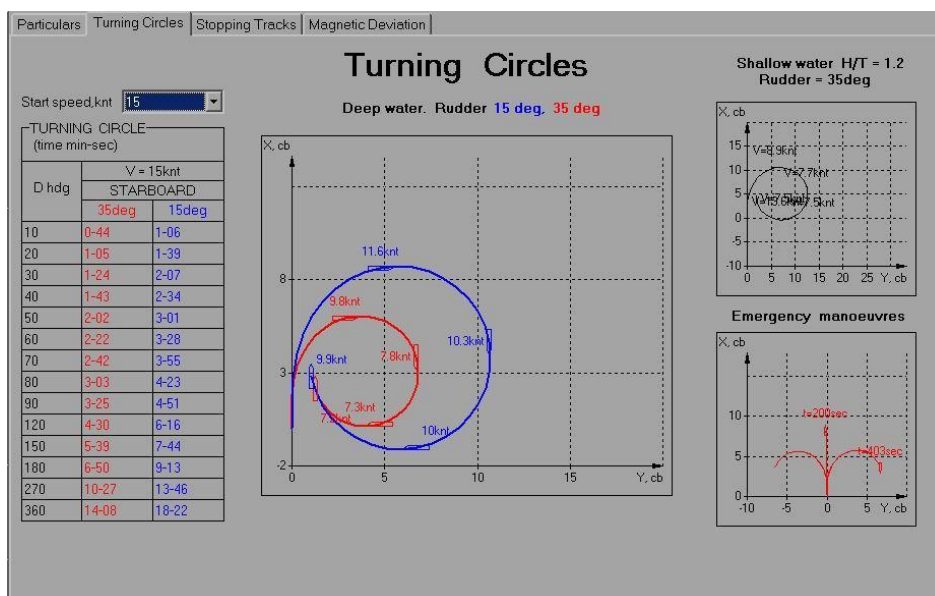
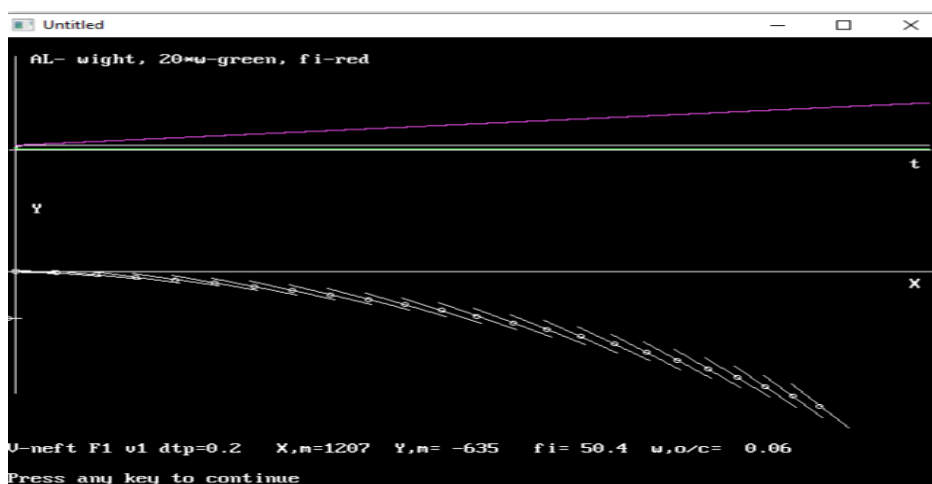
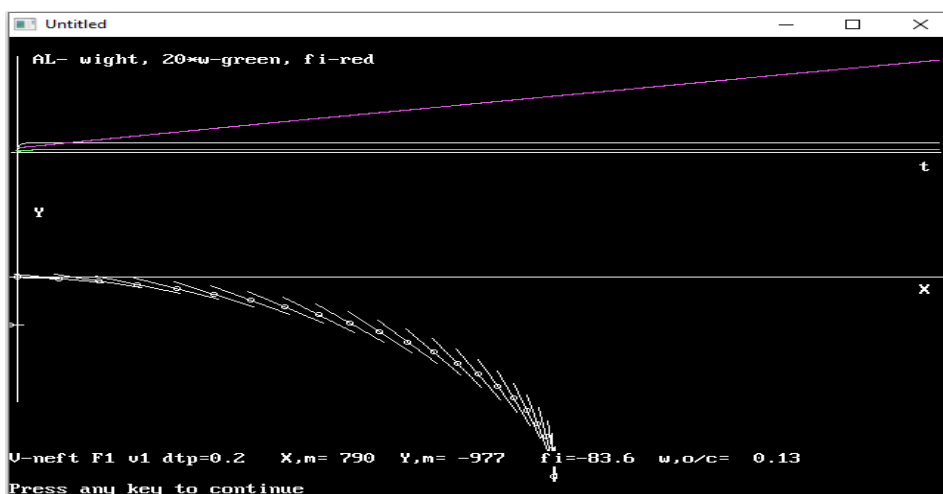


Рисунок 2. «Планшет циркуляций» бортового компьютера

5. Планшет циркуляций представляет собой сетку направлений (радиусы) и дистанций (концентрические окружности), на которую нанесены кривые циркуляции при различных углах перекадки руля. Планшетом можно пользоваться следующим образом. На кальке в масштабе планшета наносят схему фарватера (канала) в районе поворота с отметками «старого» истинного курса – ИК<sub>1</sub> и «нового» истинного курса – ИК<sub>2</sub>, а также один (два) наиболее удобных ориентира. Затем кальку накладывают на планшет так, чтобы линия ИК, совпадала с радиусом планшета. Перемещая кальку вдоль этого радиуса, выбирают необходимую циркуляцию и поворот на новый курс при угле перекадки руля выбранной циркуляции. Разработка алгоритма работы построения ПМТДС выполнена с учетом изложенных аспектов управляемости судов. Реализующей данный алгоритм программой просчитано 15 вариантов построения ПМТДС в двумерной графике, основанных на базе данных гидродинамических коэффициентов для 15 массовых проектов судов. Вводя в программу, а на практике получая с бортовых датчиков исходные данные линейной, угловой скоростей и угла перекадки руля для конкретного проекта судна, на выходе получаем траекторию поступательного движения судна на определенный период времени при текущих значениях скорости и угла поворота пера руля (рис. 3. 4).



**Рисунок 3. Прогнозные траектории теплохода типа Волго-Нефть с отклонением пера руля на 5°**



**Рисунок 4. Прогнозные траектории теплохода типа Волго-Нефть с отклонением пера руля на 10°**

Если данные показатели меняются, то программа мгновенно пересчитывает траекторию. Изменения внешних воздействий на судно учитываются в соответствующих изменениях показателей датчиков линейной и угловой скорости.

Проецирование получаемой ПМТДС на плоскость движения судна и визуализация траектории на мониторе бортового компьютера с наложением ее на реальное изображение по курсу судна дает объективную картину для своевременного принятия судоводителем правильного управляющего решения.

Моделирование траектории будет более информативным в привязке к динамическим характеристикам судна (рис. 5).



**Рисунок 5. Визуализация ПМТДС**

5. Реализация рассмотренных принципов моделирования ПМТДС дает возможность предусмотреть и оценить безопасное расстояние от предлагаемой системой траектории до навигационных препятствий и других динамических объектов в предстоящий интервал времени.

Принимая во внимание реальные перспективы создания судов-автоматов, отметим, что в сложных навигационных условиях опция вмешательства в управление судном оператора, как на борту, так и путем удаленного доступа, всегда останется актуальной.

Соответственно предлагаемое решение для системы поддержки принятия решений при управлении движением судна путем цифрового моделирования прогнозной траектории позволяет обеспечить максимально информативное управление с прогнозированием траектории, как для судоводителя, так и для удаленного оператора.

### **Библиографический список**

1. Вагущенко, Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Латстар. 2003. – 169 с.
2. Клементьев, А.Н. Основы управления судном / А.Н. Климентьев. - Нижний Новгород: ФБОУ «ВГАВТ». 2011. – 144 с.
3. Шарлай, Г.Н. Управление морским судном / Г.Н. Шарлай. -Владивосток: Морской государственный университет. 2010. – 509 с.

4. **Войткунский, Я.И.** Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов. - Л.: Судпромгиз. 1960. – 688 с.

5. **Соларев, Н.Ф.** Управление судами и составами / Н.Ф. Соларев, В.А. Белоглазов, В.А. Тронин. - М.: «Транспорт». 1983. – 296 с.

**R.E. Galeev, A.V. Solovev, Yu.S. Fedosenko**

**DIGITAL MODELING OF THE FORECAST TRAJECTORY IN THE SYSTEM  
DECISION SUPPORT FOR VESSEL MOVEMENT MANAGEMENT**

Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

We consider an approach to modeling the predictive trajectory of a ship in real time. Software and hardware implementation of the described approach in the form of a regular decision support system for ship traffic management will help to reduce accidents and increase the level of safety of navigation.

**Keywords:** motion control of the vessel, the forecasted trajectory, the system of support of decision-making.

Л.А. Игумнов, М.Х. Прилуцкий

**ПРОБЛЕМА СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕШЕНИЯ У БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ЗАДАЧ  
ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского

Рассмотрена проблема существования решения у большемерных задач линейного программирования. Проведен анализ известных классических методов проверки на совместность таких систем. Обсуждается использование для решения рассматриваемой проблемы итерационного метода ортогональных проекций Агмона-Мощкина. Предложены две модификации этого метода – на случай решения систем линейных алгебраических двусторонних неравенств и на случай, когда система ограничений обладает транспортной спецификой – коэффициенты ограничений принадлежат множеству  $\{0, +1, -1\}$ .

**Ключевые слова:** итерационный метод ортогональных проекций Агмона-Мощкина, двухсторонние системы линейных неравенств, транспортная специфика системы ограничений.

При решении задач линейного программирования большой размерности возникает вопрос существования решения. Для задач небольшой размерности эта проблема решается непосредственно при применении решающего алгоритма, который за небольшое время определит возможные несовместность системы ограничений или неограниченность критерия оптимальности. Для большемерных задач непосредственное применение решающего алгоритма в случае, если задача не имеет решения, занимает много времени. Поэтому целесообразно до применения решающего алгоритма другими способами проанализировать проблему существования решения. Здесь приведен обзор методов проверки на совместность систем ограничений задачи линейного программирования. Подробно описан метод ортогональных проекций Агмона-Мощкина, который позволяет не только дать ответ на вопрос существования решения у большемерной задачи линейного программирования, но и:

- в случае совместности системы ограничений найти допустимое решение, которое может быть использовано как начальное базисное решение задачи линейного программирования, что значительно ускорит решение исходной задачи;
- в случае несовместности системы найти квазиоптимальное решение системы ограничений, что позволит проанализировать исходные данные задачи и определить те ограничения, из-за которых нарушена совместность системы ограничений.

Пусть дана система линейных алгебраических неравенств

$$L_i(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - b_i \leq 0, i = 1, \dots, m \quad (1)$$

над  $n$ -мерным евклидовым пространством. Для проверки на совместность этой системы можно использовать классические результаты линейной алгебры, основанные на следующих теоремах [1].

### Теорема Черникова

Для совместности системы (1) необходимо и достаточно, чтобы существовал такой минор матрицы ограничений

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{i_1 j_1} & \dots & a_{i_1 j_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{i_r j_1} & \dots & a_{i_r j_r} \end{vmatrix} > 0,$$

где  $r$  – ранг матрицы системы ограничений, при этом должно выполняться следующие условия:

$$\frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} a_{i_1 j_1} & \dots & a_{i_1 j_r} & b_{i_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i_r j_1} & \dots & a_{i_r j_r} & b_{i_r} \\ a_{ij_1} & \dots & a_{ij_r} & b_i \end{vmatrix} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

### Теорема Александрова

Для совместности системы (1) необходимо и достаточно существование таких неотри-

цательных чисел  $p_1, p_2, \dots, p_m$ , что из равенства  $\sum_{i=1}^m p_i \left( \sum a_{ij} x_j - b_i \right) = 0$  следует  $\sum_{i=1}^m p_i b_i \geq 0$ .

### Теорема Кронекера-Капели

Для совместности системы (1) необходимо и достаточно равенство рангов матрицы ограничений и расширенной матрицы:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \bar{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & 1 & b_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & 1 & b_m \end{pmatrix}.$$

Кроме того, для проверки совместности и получения решения совместных систем могут быть использованы **метод эллипсоидов** или **алгоритм Кармаркара** [2].

Помимо **точных методов** для решения систем алгебраических неравенств могут быть использованы **итерационные методы**, такие как метод **итераций** и **метод Зейделя**.

В данной работе подробно рассмотрен итерационный метод – релаксационный **метод ортогональных проекций Агмона-Моцкина** [3,4], хорошо зарекомендовавший себя для решения систем линейных неравенств большой размерности с разреженной матрицей ограничений.

Пусть  $\bar{x}^v \in R^n$  – произвольный вектор на  $v$ -ом шаге (например, для начального шага можно взять вектор с нулевыми компонентами). Если  $L_i(\bar{x}^v) \geq 0, i = 1, \dots, m$ , то система (1) совместна и  $\bar{x}^v$  – одно из ее решений.

Допустим, что это не так. Обозначим множество ограничений, нарушенных этим вектором  $I = \{i \mid L_i(\bar{x}^v) < 0, i = 1, \dots, m\}$ .

$$\text{Найдем такое } i_0 \in I, \text{ что } \frac{-L_{i_0}(\bar{x}^v)}{\sum_{j=1}^n a_{i_0 j}^2} = \max_{i \in I} \left( \frac{-L_i(\bar{x}^v)}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2} \right).$$



Тогда очередная точка задается равенством:  $\bar{x}^{v+1} = \bar{x}^v - \frac{L_{i_0}(\bar{x}^v)}{\sum_{j=1}^n a_{i_0j}^2} \bar{a}_{i_0}$ , где

$$\bar{a}_{i_0} = (a_{i_01}, a_{i_02}, \dots, a_{i_0n}).$$

Этот алгоритм основан на следующих теоретических результатах.

### Теорема Агмона-Мощкина

Если система (1) совместна, то описанный итерационный процесс при  $v \rightarrow \infty$  приведет к решению этой системы.

При доказательстве теоремы Агмона-Мощкина используется следующая лемма.

### Лемма Агмона-Мощкина

Пусть  $\bar{y}, \bar{z} \in R^n$  – точки, разделенные гиперплоскостью  $\Gamma$ ,  $\bar{y}' \in R^n$  – проекция  $\bar{y}$  на гиперплоскость  $\Gamma$ . Тогда  $|\bar{y}' - \bar{z}| < |\bar{y} - \bar{z}|$ .

Содержательно лемма очевидна: расстояние между двумя точками, разделенными гиперплоскостью, строго больше расстояния между проекцией одной из точек и другой точкой.

### Доказательство

Не уменьшая общности, можно считать, что  $\Gamma$  – гиперплоскость в  $R^n : x_1 = 0$ , а  $\bar{y}, \bar{z} \in R^n$  – две точки, разделенные гиперплоскостью  $\Gamma$ , причем  $\bar{y} = (x_1, 0, \dots, 0)$ ,  $x_1 < 0$ ,  $\bar{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ,  $z_j \geq 0$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

Пусть  $\bar{y}' = (0, 0, \dots, 0)$  – проекция  $\bar{y}$  на гиперплоскость  $\Gamma$ .

Имеем  $|\bar{y}' - \bar{z}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2 + z_1^2}$  и  $|\bar{y} - \bar{z}| = \sqrt{\sum_{i=2}^n z_i^2 + (y_1 - z_1)^2}$ . Откуда  $|\bar{y}' - \bar{z}| < |\bar{y} - \bar{z}|$  равносильно  $(y_1 - z_1)^2 > z_1^2$ ,  $y_1^2 - 2y_1z_1 > 0$ , что верно, так как  $-2y_1z_1 > 0$ . Лемма доказана.

Для случая двухсторонних систем линейных алгебраических неравенств алгоритм Агмона-Мощкина легко модифицируется. Предположим, что система (1) имеет следующий вид:

$$A_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq B_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Тогда метод Агмона-Мощкина можно модифицировать следующим образом. Вместо определения множества  $I$ , найдем номер первого неравенства  $i_0$ , которое нарушается при  $\bar{x}^v \in R^n$ . Тогда очередная точка задается равенством:

$$\bar{x}^{v+1} = \bar{x}^v + \frac{H_{i_0}(\bar{x}^v)}{\sum_{j=1}^n a_{i_0j}^2} \bar{a}_{i_0}, \quad \text{где } \bar{a}_{i_0} = (a_{i_01}, a_{i_02}, \dots, a_{i_0n}),$$

$$H_{i_0}(\bar{x}^v) = \begin{cases} A_{i_0} - \sum_{j=1}^n a_{i_0j}x_j^v, & \text{если } \sum_{j=1}^n a_{i_0j}x_j^v < A_{i_0} \\ \sum_{j=1}^n a_{i_0j}x_j^v - B_{i_0}, & \text{если } \sum_{j=1}^n a_{i_0j}x_j^v > B_{i_0} \end{cases}$$

Метод Агмона-Мощкина хорошо зарекомендовал себя для решения систем линейных алгебраических двухсторонних неравенств транспортного типа, когда коэффициенты матрицы ограничений могут принимать значения только из множества  $\{0, +1, -1\}$ . Рассмотрим такую

систему  $a_i \leq \sum_{j \in Q(i)} x_j \leq b_i$ ,  $i = \overline{1, q}$ , над  $n$ -мерным евклидовым пространством. Здесь  $Q(i)$  – множество индексов, по которым осуществляется суммирование  $i$ -го ограничения,  $i = \overline{1, q}$ . Если  $\bar{x}'$  – произвольный  $n$ -мерный вектор, удовлетворяющий всем  $q$  ограничениям системы, то задача решена. Пусть  $s$  – первое по порядку ограничение, условия которого нарушены. Построим вектор  $\bar{x}''$  по следующему правилу:

$$x_j'' = \begin{cases} x_j' + (a_s - \sum_{j \in Q(s)} x_j') \times |Q(s)|^{-1}, & \text{если } a_s > \sum_{j \in Q(s)} x_j' \\ x_j' - (\sum_{j \in Q(s)} x_j' - b_s) \times |Q(s)|^{-1}, & \text{если } \sum_{j \in Q(s)} x_j' > b_s \end{cases}, \quad j = \overline{1, n},$$

и перейдем к следующему  $(s+1)$ -му ограничению. Так для всех ограничений. Если система совместна, то последовательность векторов  $\bar{x}^v$ , найденных по выше описанной схеме, при  $v \rightarrow \infty$  сходится к допустимому решению системы.

В работах [5-8] используются модифицированные алгоритмы рассмотренного итерационного метода ортогональных проекций Агмона-Моткина.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00881 А.*

### Библиографический список

1. **Черников, С.Н.** Линейные неравенства. / С.Н. Черников. –М:Наука, 1968. –488 с.
2. **Хачиян, Л.Г.** Полиномиальные алгоритмы в линейном программировании // ДАН СССР. – том 244.– вып.5.– 1979.–С.1033-1096.
3. Motzkin T.S. The relaxation method for linear inequalities / T.S. Motzkin, I.J. Schoenberg // Canadian Journal of Mathematics.– 1954. –V.6.– №3. – С.382-392
4. **Прилуцкий, М.Х.** Многокритериальное распределение однородного ресурса в иерархических системах //Автоматика и телемеханика. – 1996.– №2.–С.139-146.
5. Afraimovich L.G. Multi-index transportation problems with 1-nested structure/ L.G. Afraimovich, A.S. Katerov, M.Kh. Prilutskii// Automation and Remote Control.–2016. – Т.77.–№11.– С.1894-1913.
6. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов, О.В. Кривошеев // Информационные технологии. –2017. – Т.23– №9. – С.650-657
7. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Системы управления и информационные технологии.– №3(77).– 2019. – С. 46-51.
8. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства/ М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева.– №4(127).– 2019. –С. 36-43.

**L.A. Igumnov, M.Kh. Prilutskii**

**ON EXISTENCE OF THE SOLUTION OF LARGE-SCALE LINEAR PROGRAMMING PROBLEMS**

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The issue of the existence of a solution for large-scale linear programming problems is considered. The analysis of the well-known classical methods for checking the compatibility of such systems is carried out. Utilization of the iterative method of Agmon-Motzkin orthogonal projections to solve the problem under consideration is discussed. Two modifications of this method are proposed – for the case of solving systems of linear algebraic two-sided inequalities, and for the case when the constraint system has transport specificity – the constraint coefficients belong to the set  $\{0, +1, -1\}$ .

**Key words:** iterative method of orthogonal projections by Agmon-Motzkin, two-sided systems of linear inequalities, transport specificity of the constraint system.

Л.А. Игумнов, М.Х. Прилуцкий

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В СЕТЕВЫХ КАНОНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматривается проблема распределения ограниченных ресурсов в сетевых канонических структурах. Строится общая математическая модель, в рамках которой формализуется широкий класс прикладных задач принятия решений – задачи производственного планирования, задачи логистики, задачи распределения ресурсов провайдером сети интернет, задачи управления проектами, задачи планирования для предприятий с непрерывным циклом изготовления продукцией и др. Предлагается процедура нахождения оптимальной стратегии, основанная на использовании принципа оптимальности динамического программирования.

**Ключевые слова:** сетевые канонические структуры, оптимальная стратегия, рекуррентные соотношения динамического программирования.

Задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах заключаются в совмещении во времени имеющихся у системы ресурсов с требуемым расходом этих ресурсов. В этих задачах естественным является конфликт между наличием и потребностью ресурсов. К таким задачам относятся:

- задачи производственного планирования, когда для выполнения к определенному времени заданной совокупности работ используются ограниченные трудовые, материальные, финансовые ресурсы [1,2];
- задачи логистики, связанные с совмещением во времени объемов производства, объемов перевозок и объемов складирования продукции [3];
- задачи распределения мощностей каналов передачи данных провайдером сети интернет, когда требуется найти распределение во времени пропускных способностей каналов, обеспечивающее эффективное функционирование сети и удовлетворяющее ее ограничениям [3];
- задачи распределения ресурсов при управлении проектами, когда проекты представимы в виде сетевых канонических структур, а ресурсы как правила относятся к группе нескладируемых (фонд времени работы оборудования, трудовые ресурсы) [4];
- задачи планирования для предприятий с непрерывным циклом изготовления продукции, такие как задача переработки газового конденсата в нефтепродукты [5,6] и др.

Содержательно общая задача распределения ограниченных ресурсов в сетевых канонических структурах заключается в следующем. Рассматриваются системы, функционирование которых происходит по следующей схеме: выполнению подлежит некоторая, заранее заданная совокупность деятельностей, активизация которых может осуществляться в дискретные моменты времени и связана с расходом ресурсов, необходимых для выполнения указанных деятельностей. Для некоторых деятельностей, связанных с началом функционирова-

ния системы, заданы начальные сроки возможной активации этих деятельностей. Для деятельностей, которые соответствуют окончанию функционирования системы, заданы так называемые директивные сроки – времена, к которым все деятельности системы должны быть выполнены. Расходование ресурсов, необходимых для выполнения какой-либо деятельности, может осуществляться лишь тогда, когда все деятельности, выполнение которых предшествует началу активации этой деятельности, уже выполнены. Кроме того, каждая деятельность характеризуется заранее заданными временными параметрами – длительностью выполнения, самым ранним сроком начала и самым поздним сроком окончания ее выполнения.

Общая проблема распределения ресурсов в рассматриваемых системах заключается в определении порядка выполнения заранее заданной совокупности деятельностей и стратегии распределения ресурсов между деятельностями, при которых выделенные обобщенные показатели функционирования системы, связанные с временными параметрами, принимают экстремальные значения. В качестве обобщенных показателей, связанных с эффективным функционированием системы, в работе рассматриваются условия, связанные со стремлением наилучшим образом выполнить заданные директивные сроки.

Существуют различные подходы к решению подобных задач в основном основанные на методах математического моделирования. Этим работам посвящено большое количество работ как в России, так и за рубежом. Обзор результатов анализа вычислительной сложности алгоритмов решения задач распределения ресурсов в сетевых канонических структурах проводится в работах [7-8]. Большой вклад в исследовании подобных задач внесли отечественные ученые [9-11]. Из-за больших размеров прикладных задач, как правило, для их решения используются эвристические процедуры, для которых трудно оценить близость полученных решений оптимальным. Критерием истинности для таких приближенных алгоритмов является вычислительный эксперимент, который может подтвердить только на ограниченном объеме данных адекватность полученных решений. В данной работе предлагается процедура поиска не приближенных решений для рассматриваемого класса задач, а оптимальных решений.

### Исходные параметры математической модели

Пусть  $J$  – множество деятельностей, подлежащих выполнению;  $I$  – множество ресурсов, используемых деятельностями,  $|I| = m$ ;  $T = \{0, 1, \dots, T_0\}$  – такты функционирования системы,  $t_j$  – длительность выполнения деятельности,  $t_j \in T$ ,  $j \in J$ .

Обозначим через  $K(j)$  – множество деятельностей, непосредственно предшествующих деятельности  $j$ ,  $j \in J$ ;  $h_j$  – начальный срок возможной активации деятельности, для которой  $K(j) = \emptyset$ ;  $d_j$  – планируемый срок завершения выполнения деятельности (директивный срок), для которой нет последующих, т.е. не существует такой деятельности  $l$ , для которой  $j \in K(l)$ ;  $\vec{c}(j)$  – вектор-функция со значениями из  $R^m$ ,  $i$ -я компонента которой означает количество ресурса  $i$ , необходимое для выполнения деятельности  $j$ ,  $i \in I$ ,  $j \in J$ .

### Функционирование системы

Пусть  $S \times T = \{ \langle \vec{s}, t \rangle \mid \vec{s} \in R^m, t \in T \}$  – множество состояний системы, где  $\vec{s}$  – количества ресурсов, доступных системе в момент времени  $t$ . Через  $Q(t)$  обозначим множество деятельностей, выполненных к моменту времени  $t$ ,  $Q(t) \subseteq J$ ,  $t \in T$ .

Пусть  $\bar{x}$  –  $n$ -мерный вектор, компонента которого  $x_j$  означает момент времени активизации деятельности  $j$ ,  $x_j \in T$ ,  $j \in J$ . Обозначим через  $\phi(t) = \{j \mid K(j) = \emptyset, j \in J\}$ , если  $t \geq h_j$  и  $\phi(t) = \{j \mid K(j) \subseteq Q(t), j \in J\}$  если  $K(j) \neq \emptyset$ , – множество деятельностей, любая из которых при наличии соответствующих ресурсов может быть активирована в такт времени  $t$  («фронт деятельностей», соответствующий такту  $t$ ),  $t \in T$ . Множество допустимых управлений системы в состоянии  $\langle \bar{s}, t \rangle$  обозначим через  $U(\langle \bar{s}, t \rangle) = \{j \mid j \in \phi(t), \bar{c}(j) \leq \bar{s}\}$ , где  $\bar{c}(j) \leq \bar{s}$  означает, что  $c_i(j) \leq s_i$ ,  $i \in I$  – для активации деятельности  $j$  ресурсов достаточно.

Система функционирует следующим образом. Из состояния  $\langle \bar{s}, t \rangle, \langle \bar{s}, t \rangle \in S \times T$ , при допустимом управлении  $j$ ,  $j \in U(\langle \bar{s}, t \rangle)$ , система переходит в состояние  $\langle \bar{s}', t' \rangle$ , где  $\langle \bar{s}', t' \rangle = \langle \bar{s} - \bar{c}(j), t' \rangle$  и  $\bar{s} - \bar{c}(j)$  определяет  $m$ -мерный вектор с компонентами  $s_i - c_i(j)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , а значение  $t' = t$ , если существует такое  $j'$ ,  $j' \in U(\langle \bar{s}, t \rangle)$ , что  $\bar{c}(j') \leq \bar{s}$  и  $t' = t + 1$  в противном случае. Такой переход приносит системе «доход», задаваемый некоторой функцией  $g(\bar{s}, \bar{s}', t, j)$ .

Система функционирует конечное число тактов  $T_0$ , причем на каждом такте функционирования к системе могут быть применены несколько управлений, тем самым система за каждый такт может осуществлять несколько переходов.

Относительно рассматриваемых систем обычно ставят следующую задачу [12,13] – при заданных состоянии системы и числе тактов функционирования, найти оптимальное управление системой. Оптимальность управления в таких задачах обычно связана с максимизацией суммарного дохода, который получит система в процессе функционирования или минимизацией суммарных затрат (такая схема принята в данной работе). Эти затраты(доход) зависят от вида функции  $g(\bar{s}, \bar{s}', t, j)$ . В данной работе в качестве критерия выступают условия наилучшего выполнения заданных директивных сроков. Тогда процесс формализации критерия можно провести, например, следующим образом. Пусть  $t_j^{nh}$  – такт планирования, соответствующий позднему началу активизации деятельности  $j$  рассчитанному относительно заданных директивных сроков. Тогда  $g(\bar{s}, \bar{s}', t, j) = q(t, j) = \max(t - t_j^{nh}, 0)$  и функция  $q(t, j)$  определяет в такт  $t$  при активизации деятельности  $j$  то количество тактов, на которое деятельность  $j$  «задержит» выполнение всей совокупности деятельностей относительно заданного директивного срока. При других критериях, характеризующих качество функционирования системы, по-разному определяется вид функции дохода  $g(\bar{s}, \bar{s}', t, j)$ .

В качестве критериев для таких задач могут выступать условия эффективного расходования ресурсов, условия завершения выполнения деятельностей «как можно раньше» или «как можно позже» при условиях не нарушения директивных сроков.

### Постановка задачи

Стратегию управления системой будем отождествлять с функцией  $f(\bar{s}, t)$ , определенной на множестве  $S \times T$  со значениями из  $J$ .

Обозначим через  $\mu(\bar{s}, t, f(\bar{s}, t))$  – величину суммарных затрат, которые получит система, если она находится в состоянии  $\langle \bar{s}, t \rangle$  и к ней будут применены управления, задаваемые

функцией  $f(\vec{s}, t)$ . При заданной функции  $f(\vec{s}, t)$  величину  $\mu(\vec{s}, t, f(\vec{s}, t))$  можно вычислить, используя рекуррентные соотношения

$$\mu(\vec{s}, t, f(\vec{s}, t)) = q(t, f(\vec{s}, t)) + \mu(\vec{s}', t', f(\vec{s}', t')),$$

где  $\vec{s}' = \vec{s} - \vec{c}(f(\vec{s}, t))$  и  $t' = t$ , если существует такое  $j', j' \in U(<\vec{s}, t>)$ , что  $\vec{c}(j') \leq \vec{s}$  и  $t' = t + 1$  в противном случае.

Назовем оптимальной стратегией такую функцию  $f_0(\vec{s}, t)$ , для которой выполняется  $\mu(\vec{s}, t, f_0(\vec{s}, t)) = \min(\mu(\vec{s}, t, f(\vec{s}, t)))$ , где минимум берется по всем возможным функциям  $f(\vec{s}, t)$ .

### **Рекуррентные соотношения динамического программирования, определяющие оптимальную стратегию**

Обозначим через  $v(\vec{s}, t)$  доход, который получит система в состоянии  $<\vec{s}, t>$  при оптимальном выборе управлений. Тогда, очевидно, что  $v(\vec{s}, t) = \mu(\vec{s}, t, f_0(\vec{s}, t))$ . Используя введенные обозначения и применив к системе принцип оптимальности динамического программирования, получим:

$$v(\vec{s}, t) = \min[q(\vec{s}, t) + v(\vec{s}', t')],$$

где минимум берется по всем  $j, j \in U(<\vec{s}, t>)$ , где  $U(<\vec{s}, t>) = \{j \mid j \in \phi(t), \vec{c}(j) \leq \vec{s}\}$ . Задав граничные доходы системы  $v(\vec{s}, 0) = 0$ , введенные рекуррентные соотношения можно использовать для нахождения оптимальной стратегии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00881 А.*

### **Библиографический список**

1. Прилуцкий, М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2007. – №1. – С. 78-82.
2. Прилуцкий, М.Х. Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов, О.В. Кривошеев // Информационные технологии. – 2017. – Т.23 – №9. – С.650-657.
3. Афраймович, Л.Г. Многоиндексные задачи распределения ресурсов в иерархических системах / Л.Г. Афраймович, М.Х. Прилуцкий // Автоматика и телемеханика. – 2006. – №6. – С.194-205.
4. Баркалов, П.С. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами / П.С. Баркалов, И.В. Буркова, А.В. Глаголев, В.Н. Колпачев – Москва: ИПУ РАН, 2002. – 65с.
5. Прилуцкий, М.Х. Поточные модели для предприятий с непрерывным циклом изготовления продукции / М.Х. Прилуцкий, В.Е. Костюков // Информационные технологии. – 2007. – №10. – С.47-52.
6. Prilutskii M.Kh. Optimization Models of Gas and Gas Condensate Processing / M.Kh. Prilutskii, V.E. Kostyukov // Automation and Remote Control. – 2012. – vol.72. – №8. – P. 345-349.

7. Gairing M., Lucking T., Mavronicolas M., Monien B. Computing Nash Equilibria for Scheduling on Restricted Parallel Links // Proc. 36th Annual ACM Sympos. Theory Comput. – 2004. – P. 613-622.
8. Gunawan A. Solving the teacher assignment-coursescheduling problem by a hybrid algorithm / A. Gunawan, K.M. Ng, K.L. Poh // International Journal of Computer and Information Engineering. –2007. – V.1. –№2. – P.136-141.
9. **Танаев, В.С.** Введение в теорию расписаний. / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. –М.:Наука. 1975.
10. **Лазарев, А.А.** Модели и методы решения задач теории расписаний // Автоматика и телемеханика. –2014. –№7. –С. 14-16.
11. **Батищев, Д.И.** Метод декомпозиций для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов / Д.И. Батищев, Э.Д. Гудман, И.П. Норенков, М.Х. Прилуцкий // Информационные технологии.–1997.–№1.–С. 29-33.
12. **Прилуцкий, М.Х.** Программные управления двухстадийными стохастическими производственными системами // Автоматика и телемеханика. – 2020. – №1. –С. 81-92.
13. **Прилуцкий, М.Х.** Оптимальное управление двухстадийными стохастическими производственными системами // Автоматика и телемеханика. – 2018. –№5. – С. 69-82.

**L.A. Igumnov, M.Kh. Prilutskii**

**DISTRIBUTION OF RESOURCES IN NETWORK CANONICAL  
STRUCTURES USING RECURRENT RELATIONS OF DYNAMIC PROGRAMMING**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

In this paper the problem of distribution of limited resources in canonical network structures is considered. A general mathematical model has been constructed. The developed model enables us to formalize a wide class of applied decision-making problems such as production planning, logistics, resource allocation by Internet provider, project management, planning for enterprises with a continuous production cycle, etc. The procedure for finding the optimal strategy based on the principle of optimality of dynamic programming has been elaborated.

**Key words:** network canonical structures, optimal strategy, recurrence relations of dynamic programming.



Е.А. Кумагина, К.М. Пыпин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА ОТ НАЧАЛЬНОГО РАЗМЕРА ОКНА ПЕРЕГРУЗКИ**

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Проведено имитационное моделирование обмена данными между двумя сетевыми устройствами с целью сбора статистических данных о состоянии соединения. Проведен анализ, аппроксимация и экстраполяция собранных данных с целью изучения дальнейшего изменения параметров соединения. В ходе анализа была получена зависимость пропускной способности канала от начального размера окна перегрузки в виде полинома шестого порядка и предложен один из вариантов изменения пропускной способности при дальнейшем изменении начального значения окна перегрузки.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, транспортный протокол, пропускная способность, окно перегрузки.

Для описания средств сетевого взаимодействия используется многоуровневый подход. Нижние уровни тесно связаны с физическим построением сетей, верхние уровни ориентированы на приложение – они не зависят от сети. Транспортный уровень является промежуточным и скрывает от верхних уровней детали реализации передачи данных. Одной из задач транспортного уровня является обеспечение надежной передачи данных от процесса на машине-источнике до процесса на машине-адресате [1]. Надежность передачи транспортного уровня обеспечивается многими механизмами (сегментация данных, логическое соединение, квитирование и т.д.). В данной работе изучается влияние начального значения окна перегрузки на пропускную способность сети.

При низкой загрузке сети, когда не превышена ее пропускная способность, все пакеты передатчика доходят до конечного пункта. При увеличении трафика число пакетов начинает превышать некий критический уровень, узлы не успевают обрабатывать пакеты и начинают терять их. На потерянные пакеты не отправляются подтверждения успешного приема. Не получив подтверждения, отправитель повторно посылает пакет, тем самым еще больше увеличивая трафик. Ситуация, при которой система не может больше передавать данные, называется перегрузкой. Поэтому протоколы транспортного уровня нуждаются в механизмах, позволяющих избежать этой ситуации.

Причиной возникновения перегрузки также является несогласование размеров буферов приемника и буфера отправителя. Передатчик, обладая информацией о размере окна приемника и размере окна перегрузки, определяет текущий размер окна как минимум из этих двух размеров.

Чтобы избежать перегрузки, передатчик может использовать три стратегии: медленный старт, исключение перегрузки, мультипликативное уменьшение [1]. Каждый алгоритм управления окном перегрузки реализует эти стратегии по-разному. Для изучения зависимости пропускной способности сети от размера окна перегрузки на примере алгоритма TCP-Reno[3] был применен метод имитационного моделирования[2,3].

Основные параметры имитационной модели обмена информацией:

В сети присутствуют два узла: сервер, отправляющий данные, и клиент, принимающий данные от сервера.

Устройства обмениваются данными посредством протокола TCP.

Генерация пакетов данных происходит без пауз и прерываний.

Размер пакета: 1516 байт

Для буфера отправителя и буфера приемника установлены заведомо большие значения (150 МБ каждый).

В качестве алгоритма управления окном перегрузки выбран алгоритм TCP-Reno.

Виртуальная задержка пакетов установлена 100 мс.

Установлена вероятность потери пакета в сети равная 1%.

Для исследования пропускной способности при различных начальных значениях окна перегрузки была написана программа на языке C++, моделирующая отправку большого объема данных от сервера к клиенту. При моделировании был проведен ряд измерений пропускной способности при разных значениях начального размера окна перегрузки, характеристики этих статистических данных, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики собранных статистических данных

Характеристика	Значение характеристики для окна перегрузки	Значение характеристики для пропускной способности
Среднее	16,5	2,138454294
Стандартная ошибка	1,658312395	0,008660105
Медиана	16,5	2,146348152
Стандартное отклонение	9,38083152	0,048988949
Дисперсия	88	0,002399917
Эксцесс	-1,2	1,272318458
Асимметричность	-3,05E-17	-0,952099226
Минимум	1	2,005716248
Максимум	32	2,220929037
Коэффициент корреляции	0,065	

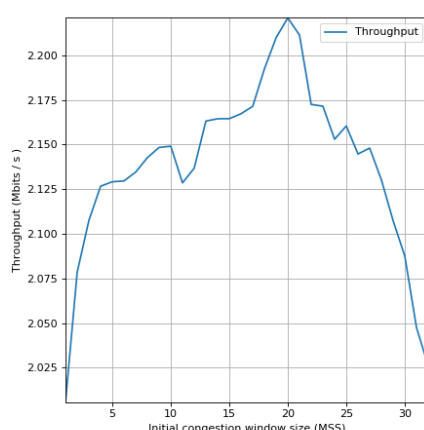


Рисунок 1. Зависимость пропускной способности при различных значениях размера окна

Для обработки результатов моделирования была написана программа на языке Python, которая усредняет собранные данные пропускной способности (throughput) по размерам окна (initial congestion window size), строит график пропускной способности канала на основе усредненных данных (рис.1) и при помощи метода наименьших квадратов строит аппроксими-

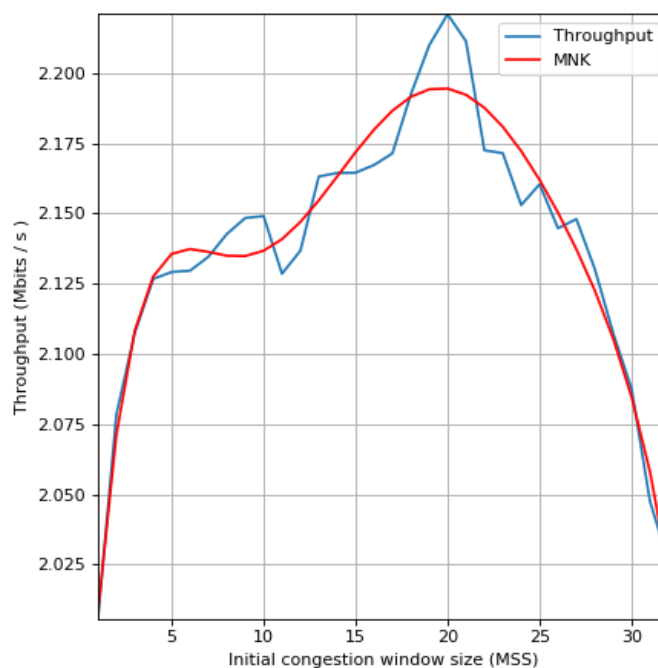
рующую кривую пропускной способности в зависимости от начального размера окна перегрузки (рис. 2).

Тот факт, что коэффициент корреляции очень мал (табл. 1), означает, что между начальным размером окна перегрузки и пропускной способности нет линейной зависимости. Поэтому возникает задача нахождения аппроксимирующей функции для собранных статистических данных с целью ее дальнейшего использования для экстраполяции в виде полинома  $f(x)=ax^6+bx^5+cx^4+dx^3+kx^2+lx+m$ .

Полученная функция аппроксимации имеет вид:

$$f(x)=-2.311 \cdot 10^{-8}x^6+2.558 \cdot 10^{-6}x^5-0.107 \cdot 10^{-4}x^4+2.329 \cdot 10^{-3}x^3-2.442 \cdot 10^{-2}x^2+0121x+1.9(1)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ ): 0.9506.



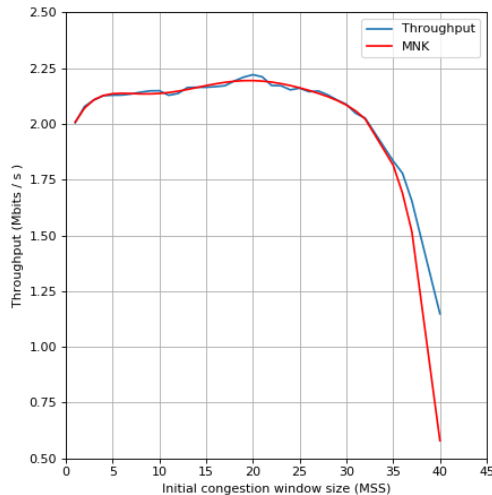
**Рисунок 2. График аппроксимации полиномиальной функцией шестой степени**

Для нахождения пропускной способности канала для данных, лежащих вне диапазона собранных значений начального размера окна перегрузки, воспользуемся полученной функцией  $f(x)(1)$ .

**Таблица 2**

**Сравнение значений, полученных с помощью экстраполяции с фактическими значениями пропускной способности**

Начальный размер окна перегрузки, MSS	35	36	37	40
Значение функции $f(x)$	1,8154	1,6887	1,5166	0,5791
Фактическое значение функции	1,8338	1,7759	1,6543	1,1486
Отклонение	0,0183	0,0898	0,1378	0,5696
Относительное отклонение, %	1,00%	4,91%	8,33%	49,59%



**Рисунок 3. Экстраполяция полиномиальной функцией шестой степени на 8 шагов вперед**

На небольших интервалах метод наименьших квадратов дает достаточно точную экстраполяцию, но при увеличении интервала значение экстраполирующей функции в точках все сильнее расходится с фактическими значениями в этих точках (табл. 2). Исходя из этого, можно сделать вывод, что текущую экстраполирующую функцию шестого порядка (1) можно использовать для определения значений пропускной способности канала при выборе значений размеров окна перегрузки лежащих недалеко от значений, собранных в ходе имитационного моделирования.

### **Библиографический список**

1. **Таненбаум, Э.** Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл.– СПб.: Питер, 2012. – 960 с.
2. **Старостин, Н.В.** Архитектурно-зависимая декомпозиция в методах суперкомпьютерного моделирования / Н.В. Старостин, М.А. Панкратова // Механика, управление и информатика (см. в книгах). – 2014. –Т.6. – № 6(51). – С. 146-153.
3. **Крылов, В.В.** Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. –288 с.

**Е.А. Kumagina, К.М. Pypin**

### **INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF THE CHANNEL BANDWIDTH ON THE INITIAL SIZE OF THE CONGESTION WINDOW**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The simulation of data exchange between two network devices was carried out in order to collect statistical data on the status of the connection. The analysis, approximation and extrapolation of the collected data were carried out in order to study further changes in the connection parameters. In the course of the analysis, the dependence of the channel capacity on the initial size of the congestion window in the form of a polynomial of degree six was obtained and one of the options for changing the throughput with a further change in the initial value of the congestion window was proposed.

**Key words:** simulation modeling, transport protocol, throughput, congestion window.

Ю.М. Макарова, Д.Е. Шапошников

## БИКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ПОИСКА ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЧЕСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛОВ ЧАСТОТ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

**Цель работы:** Анализ и выбор параметров фильтров с учётом качественной информации о предпочтительности частот при проектировании и эксплуатации радиотехнической системы.

**Методология:** Проанализирована проблема и построена математическая модель выбора рационального варианта параметров и характерные для эксплуатации радиотехнической системы, разделены на два подмножества, характеризующие параметры технической эксплуатации («затраты») и параметры качественных результатов работы устройства («эффективность»). Для каждой из групп проводится объединение критериев и затем бикритериальный анализ вариантов решения. Использована методология автоматического вычисления весовых коэффициентов важности с использованием качественной информации о предпочтениях на множестве частных критериев.

**Результаты:** Предложена и обоснована бикритериальная схема принятия решения, разработана система поиска оптимально-компромиссного решения при выборе вариантов параметров фильтров при проектировании и функционирования радиоэлектронных устройств.

**Выводы:** Методика позволяет учитывать изменение внешних и проектировочных условий и параметров радиотехнической системы для получения их рационального варианта в автоматическом режиме.

**Ключевые слова:** цифровая фильтрация, аналоговые фильтры, многокритериальная оптимизация, эффективные решения.

### Введение

В связи с наблюдаемым в последнее время быстрым и значительным ростом числа электронных устройств связи, электромагнитная шумовая обстановка существенно ухудшается, особенно в больших городах. В ряде случаев имеют место умышленно создаваемые помехи, затрудняющие работу радиоэлектронных систем или даже препятствующие их работе. Данные обстоятельства значительно повышают требования к селективным свойствам радиоэлектронных устройств, в частности, систем передачи данных и радиолокационного оборудования, и требуют современных подходов к выбору рабочих частотных полос и структуры сигнала. Необходимость совершенствования технологий справедлива и для акустических приёмо-передающих систем, в частности, подводных. В этом случае высокие требования к частотным характеристикам обусловлены, в первую очередь, изменчивостью и неоднородностью среды распространения, недостатком точной информации о её параметрах, а также высокой и неоднородной по частотам зашумленностью среды.

Одним из приёмов повышения помехоустойчивости приёмо-передающих радиоэлектронных систем является изменение несущей частоты, выполняемое по одному из установленных принципов [1]. При этом возможны следующие варианты.

1. Использование двух приёмо-передающих каналов, настроенных на различные частоты и работающих попеременно. Переключение каналов производится вручную оператором или автоматически на основании данных анализатора электромагнитной обстановки, который фиксирует наличие помехи в приёмном канале. Примером такого подхода является низкочастотная система подводной связи, рассмотренная в работе [2].

2. Рабочая частота изменяется непрерывно по заранее заданному закону с относительно медленной скоростью.

3. Несущая частота изменяется скачкообразно от одного значения к другому, при этом на каждой выбранной частоте передача ведётся достаточно долго [1]. Например, в технологии ППРЧ (FHSS) допустимая полоса частот разделена на относительно большое число подполос, выбор которых в каждый момент времени осуществляется индивидуально по псевдослучайному закону [3].

4. Смена частоты осуществляется быстро по случайному закону. Примером является переход с одной частоты на другую от импульса к импульсу в локационных системах.

Фильтры являются неотъемлемой частью радиоэлектронных систем. Основное назначение фильтра заключается в частотной селективности, то есть пропускании сигналов на одних частотах (полоса пропускания) и подавлении на других (полоса подавления).

### **Модель принятия решения по выбору параметров фильтров**

При проектировании фильтров, как цифровых, так и аналоговых, требуется принятие решения о выборе значений параметров фильтра, являющихся оптимальными (рациональными) с точки зрения лица, принимающего решение. Для цифровых фильтров искомыми параметрами являются коэффициенты фильтра, в случае использования аналоговых фильтров – значения номиналов электронных компонент (например, резисторов и емкостей для активных фильтров).

Принципы применения и изменения (адаптации) параметров аналоговых и цифровых фильтров значительно отличаются. Параметры аналогового фильтра рассчитываются один раз при проектировании, затем осуществляется производство аппаратуры и ввод оборудования в эксплуатацию. Коэффициенты цифровых фильтров можно находить один раз перед началом работы устройства, либо их можно изменять в ходе эксплуатации, перепрограммируя фильтр и тем самым меняя его частотные характеристики с целью адаптации к изменению внешних параметров системы передачи. Последний случай имеет место в вышеупомянутых системах с изменениями рабочей полосы и несущей частоты.

Таким образом, целью принятия решения является определение рационального варианта значений параметров фильтров при проектировании и эксплуатации.

Как известно, модель принятия решения с точки зрения теории содержит четыре основных компоненты: варьируемые параметры, их область допустимых значений, систему целей и критериев, а также субъект, принимающий решение.

### **Параметры фильтров как варьируемые переменные и их область допустимых значений**

Примем, что в исследуемой математической модели, с точки зрения данной предметной области, объектом выбора является набор (вектор)  $n$  параметров фильтрации, которые используются в данном техническом устройстве:

$$x = (x_1, \dots, x_n). \quad (1)$$

Вектор параметров  $x$  должен принадлежать некоторой области допустимых решений  $D$ , которая задаётся априорно и определяется на этапе проектирования. В частных случаях об-

ласть  $D$  может представлять собой дискретную область значений достаточно большой мощности, гиперкуб, а также предполагает возможное наличие сложных нелинейных ограничений на параметры [4].

При проектировании аналоговых фильтров поиск по дискретному множеству решений осуществляется в случае, когда для номиналов компонент выставляется требование принадлежности к стандартным рядам ЕХ (Е12-Е96), то есть по выпускаемым промышленностью радиодеталям. В виде дискретной области значений также могут быть сформулированы ограничения на разрядность коэффициентов цифровых фильтров.

Для большинства задач синтеза цифровых фильтров характерны прерывные множества допустимых значений коэффициентов фильтрации. Нелинейные ограничения могут быть обусловлены требованием масштабирования по каскадам усиления цифрового или аналогового фильтров [2], либо требованием близости фазо-частотной характеристики (ФЧХ) к линейной (в случае, когда ФЧХ не включена в критерии эффективности), либо другими менее распространенными специфическими условиями, необходимыми для решения конкретной технической задачи.

### Цели и критерии как характеристики качества выбранного решения

Следующим пунктом анализа задачи принятия решений является система целей и критериев. Как известно, цель характеризует поведение субъекта принятия решения (лица, принимающего решение, ЛПР) и последствия такого действия в предметной области. Критерием (частным критерием) называется характеристика (одна из числовых характеристик), выраженная в числовом виде и имеющая явное целевое направление (минимизации или максимизации). Рассмотрим задачу принятия решения по определению параметров фильтрации  $x$  как задачу многокритериального выбора [5].

При рассмотрении целей и критериев принятия решения в описанной задаче необходимо отметить, что применение каждого допустимого сочетания варьируемых параметров имеет свои технические характеристики, которые можно разделить на две принципиальные группы: первые условно можно характеризовать как «затраты», вторые – как «эффект». Частные критерии первой группы система стремится минимизировать в данных условиях места и времени, частные критерии второй группы - максимизировать.

1. Примем, что с точки зрения данной предметной области в качестве «затрат» используется набор (вектор)  $M$  числовых характеристик (частных критериев затрат) относительно варианта  $x$ :

$$P(x) = (P_1(x), \dots, P_M(x)). \quad (2)$$

Для фильтров предлагается ввести следующие частные критерии данной группы:

- время обработки сигнала;
- энергопотребление: особо актуально для автономно работающих устройств;
- размеры устройства: в системах специального назначения часто имеются жесткие требования к массогабаритным характеристикам устройств.

Предположим также, что построена функция объединения  $M$  частных критериев затрат в обобщенный критерий затрат  $G(x) = G(P(x))$ , который, в частных случаях, может являться обобщенным аддитивным критерием оптимальности:

$$G(x) = \sum_{i=1}^M y_i P_i(x), \quad (3)$$

или обобщенным логическим критерием (критерием максимальной осторожности) [5]:

$$G(x) = \max_{1 \leq i \leq M} (y_i P_i(x)), \quad (4)$$

Также широко распространённым способом объединения числовых характеристик технических систем в скалярную величину является обобщённый критерий, построенный по методу «идеальной точки»:

$$G(x) = \sum_{i=1}^M y_i |P_i^* - P_i(x)|, \quad (5)$$

где вектор  $P^* = (P_1^*, \dots, P_M^*)$  является наилучшим (возможно, теоретически и практически недостижимым) вариантом характеристик («идеальной точкой»).

Здесь вектор  $y = (y_1, \dots, y_N)$  представляет собой весовые коэффициенты относительной важности частных критериев затрат, заранее назначаемые при проектировании и выбираемые из области  $D_y$ :

$$y \in D_y = \left\{ y \in R^M \left| y_i \geq 0, i = 1, \dots, M; \sum_{i=1}^M y_i = 1 \right. \right\}. \quad (6)$$

2. Эффективность выполнения требуемых условий для выбранных параметров  $x$  – это другая группа частных критериев.

Рассмотрим вектор  $n$  числовых характеристик (частных критериев эффективности фильтрации) относительно варианта  $x = (x_1, \dots, x_n)$ :

$$Q(x) = (Q_1(x), \dots, Q_N(x)). \quad (7)$$

При проектировании фильтров критериями эффективности являются значения функции качества на заданном дискретном наборе частот [2, 6]. В полосе пропускания функция качества определяется как квадратичное отклонение получаемой частотной характеристики фильтра от требуемой, которое надо минимизировать. Для цифровых БИХ фильтров и аналоговых фильтров имеет место проблема отклонения ФЧХ от линейной, что приводит к искажению сигнала, поэтому требуемыми частотными характеристиками можно назначить как АЧХ, так и линейную ФЧХ, либо ФЧХ, близкую к линейной с некоторым заданным допустимым отклонением. В полосе подавления и переходных полосах следует минимизировать не отклонение, а модуль самого коэффициента пропускания, который и выступает в роли функции качества и подлежит минимизации.

Предположим также, что по аналогии с критериями «затрат» построена функция объединения  $N$  частных критериев качества в обобщённый критерий эффективности  $F(x) = F(Q(x))$ , который также, в частных случаях, может являться обобщённым аддитивным критерием оптимальности:

$$F(x) = \sum_{j=1}^N w_j Q_j(x), \quad (8)$$

или обобщённым логическим критерием (критерием максимальной осторожности) [5]:

$$F(x) = \max_{1 \leq j \leq N} (w_j Q_j(x)), \quad (9)$$

Здесь вектор  $w = (w_1, \dots, w_N)$  представляет собой весовые коэффициенты относительной важности частных критериев затрат, заранее назначаемые при проектировании и выбираемые из области  $D_w$ :

$$w \in D_w = \left\{ w \in R^N \left| w_j \geq 0, j = 1, \dots, N; \sum_{j=1}^N w_j = 1 \right. \right\}. \quad (10)$$



Весовые коэффициенты  $y = (y_1, \dots, y_M)$  и  $w = (w_1, \dots, w_N)$ , отражают относительную важность частных критериев «затрат» и «эффективности» соответственно. Здесь важность понимается в смысле аксиоматической теории важности [7], что позволяет считать: если известна дополнительная информация вида « $i$ -й критерий не менее важен, чем  $j$ -й критерий ( $Q_i \geq Q_j$ )», то для соответствующих весовых коэффициентов выполняется соотношение:

$$\begin{aligned} Q_i \geq Q_j &\Leftrightarrow w_i \geq w_j; \\ P_i \geq P_j &\Leftrightarrow y_i \geq y_j. \end{aligned} \quad (11)$$

Предполагаем также, что весовые коэффициенты принадлежат соответствующим областям их допустимых значений:

	$y \in D_y = \left\{ y \in R^M \left  y_i \geq y_0 > 0, i = 1, \dots, M; \sum_{i=1}^M y_i = 1 \right. \right\}.$	(12)
	$w \in D_w = \left\{ w \in R^N \left  w_j \geq w_0 > 0, j = 1, \dots, N; \sum_{j=1}^N w_j = 1 \right. \right\}.$	(13)

Здесь величины  $y_0$  и  $w_0$  являются пороговыми значениями и обеспечивают эффективность (а не слабую эффективность) допустимых решений  $x$  [7].

Обычно, при рассмотрении целевых функций «затрат» и «эффективности» все частоты считаются эквивалентными (равнозначными) по важности, то есть, весовые коэффициенты для частных критериев, отвечающих за соответствие частотных характеристик требованиям на разных частотах, равны между собой [2, 6, 8]. Однако, зачастую выполнение требуемых характеристик на одних частотах представляется более важным, чем на других. В статье [9] предлагается ввести разные веса для разных полос частот, но авторы ограничиваются лишь двумя вариантами: для полосы пропускания и полосы подавления. В реальных условиях и ситуациях распределение значимости по частотной оси может быть гораздо сложнее.

Например, на частотах из полосы пропускания и рядом с ней из переходных зон соответствие значений коэффициента пропускания требованиям может иметь большее значение, чем в отдалённых областях спектра. В областях интенсивного шума, на порядки превосходящего полезный сигнал, подавление является важнее, чем в зонах из полосы заграждения, в которых шум значительно слабее. Таким образом, частоты из областей интенсивного шума играют большую роль при выборе значений характеристик фильтров и, следовательно, имеют предпочтительность при назначении критерия оптимальности.

Кроме того, изменение весов (то есть важности выполнения требуемых условий) для различных групп частот может использоваться для технологии OFDM, равно как и для её разновидности COFDM и обобщения N-OFDM. OFDM предполагает передачу символов по нескольким подполосам одновременно [10]. Возможно распределение по подполосам данных с различной важностью. Например, по одной полосе передаются служебные данные, требующие точности, а по другим – видео и аудио данные, где единичные ошибки не так критичны. Определённую полосу можно выделить под передачу данных, задающих некоторый флаг, который принимает только 2 значения: 0 или 1; данный вид информации будет менее подвержен шуму, и следовательно, требования к уровню подавления «хвостов» от соседних зон для данной полосы меньше. Интеллектуальный выбор частот для систем с OFDM востребован также в энергосберегающих методах передачи данных [11].

Более сложная проблема заключается в том, что при рассмотрении цифровой фильтрации, выполняемой в устройстве в режиме реального времени, функциональность и параметры цифровых фильтров могут изменяться в ходе эксплуатации. При смене несущей частоты ме-

няются не только требования к частотной характеристике фильтра, но и веса важности для различных частот. Необходимо найти новые коэффициенты, позволяющие реализовать новую требуемую селективность, при условии новых весов. При этом расчёт оптимальных значений параметров цифровых фильтров должен осуществляться также в режиме реального времени.

### Принцип назначения весовых коэффициентов

Весовые коэффициенты важности  $y = (y_1, \dots, y_M)$  и  $w = (w_1, \dots, w_N)$  могут быть установлены априорно путём назначения их точных значений проектировщиком. Однако, часто такое назначение осуществить трудно, так как одинаковые предпочтения могут быть реализованы различными и далёкими друг от друга наборами весовых коэффициентов. В [5] описан подход, позволяющий осуществлять автоматическое назначение весовых коэффициентов с учётом качественной (то есть, неколичественной и, возможно, неполной) информации о предпочтениях по важности на множестве весовых коэффициентов.

При предположении, что весовые коэффициенты зависят от конкретного варианта варьируемых параметров  $x$ , можно рассматривать их (весовые коэффициенты) как неконтролируемые факторы и сформулировать следующий принцип: для каждого исходного варианта вычисляется такой набор весовых коэффициентов важности, что значение обобщенного критерия оптимальности является наихудшим среди всех возможных значений обобщенного критерия при всех возможных наборах весовых коэффициентов.

В частности, при использовании аддитивного критерия оптимальности и обобщённого критерия «эффективности» для каждого варианта  $x$  вычисляется свой набор весовых коэффициентов и затем решается исходная задача:

$$x^* = \arg \max_{x \in D} \left\{ \min_{w \in D_w} \sum_{j=1}^N w_j Q_j(x) \right\}. \quad (14)$$

То есть для каждого исходного варианта, численные значения весовых коэффициентов при формировании обобщённого критерия «эффективности» определяются из решения экстремальной задачи

$$w = w(x) = \arg \min_{w \in D_w} \left\{ \sum_{j=1}^N w_j Q_j(x) \right\}. \quad (15)$$

В отличие от обобщённого критерия «затрат», выбор предпочтительности частных критериев «эффективности» может быть неочевиден или невозможен заранее на этапе проектирования, а должен осуществляться в процессе эксплуатации в текущей обстановке. Тем не менее, по аналогии, при использовании аддитивного критерия оптимальности для обобщённого критерия «затрат» для каждого варианта  $x$  вычисляется свой набор весовых коэффициентов и затем решается исходная задача:

$$x^* = \arg \max_{x \in D} \left\{ \min_{y \in D_y} \sum_{i=1}^M y_i P_i(x) \right\}. \quad (16)$$

Будем считать, что от ЛПР получена дополнительная качественная информация, устанавливающая для некоторых  $L_w$  пар частных критериев «эффективности» (необязательно для всех  $C_N^2$  допустимых пар) предпочтение  $l$ -го критерия над  $j$ -м на всем множестве  $D$  допустимых решений:

$$e_l = \{Q_i \geq Q_j\}, l = \overline{1, L_w} \leq N(N-1)/2. \quad (17)$$

Информация (17) является качественной, так как из нее следует, что  $j$ -й критерий важнее  $j$ -го критерия, но нельзя сказать, во сколько раз. Тогда качественная информация (17) в соответствии с соотношением (11) позволяет определить область допустимых значений весовых коэффициентов  $w$  следующим образом:

$$D_w^2 = \left\{ w \in R^N \left| \begin{array}{l} w_i \geq w_0 \geq 0, i = \overline{1, N}; \sum_{i=1}^N w_i = 1; \\ \langle w_i \geq w_j \rangle_{e_l}, l = \overline{1, L_w} \end{array} \right. \right\}. \quad (18)$$

Если область  $D_w^2$  не пуста, то информация (17) непротиворечива. В этом случае весовые коэффициенты  $w \in D_w$  будем называть согласованными с качественной информацией.

Аналогично определяется область допустимых значений весовых коэффициентов для группы частных критериев «затрат»:

$$D_y^2 = \left\{ y \in R^M \left| \begin{array}{l} y_i \geq y_0 \geq 0, i = \overline{1, M}; \sum_{i=1}^M w_i = 1; \\ \langle w_i \geq w_j \rangle_{e_l}, l = \overline{1, L_y} \end{array} \right. \right\}. \quad (19)$$

Данный подход описан в [5], там же приведены результаты по формированию аналитических выражений для частных случаев расчёта весовых коэффициентов и решения задачи (15).

### **Бикритериальный подход к определению рационального варианта выбора параметров цифровых фильтров**

Таким образом, для каждого варианта  $x \in D$ , при помощи обобщённых критериев строятся две характеристики  $F(x)$  и  $G(x)$ , что позволяет перейти к бикритериальной задаче выбора рационального варианта значений параметров фильтров. Для её решения и окончательного выбора варианта  $x^*$  применим метод главного критерия, то есть, метод оптимизации наиболее важного частного критерия при условии, что значения другого частного критерия не хуже заданного порогового значения.

В случае, если принимается решение, что в данный момент и в данных условиях более предпочтительны «затраты» и их минимизация, то тогда решается задача

$$x^* = \arg \min_{x \in D} F(x), \quad (20)$$

при условии, что

$$Q_j(x) \geq Q_j^0, j = 1, \dots, N. \quad (21)$$

То есть, для параметров фильтров осуществляется выбор оптимальных значений таких, которые минимизируют затраты при условии выполнения минимального порога эффективности  $G^0$ .

Если же более предпочтительна «эффективность» и её максимизация, то тогда решается задача

$$x^* = \arg \max_{x \in D} G(x), \quad (22)$$

при условии, что

$$P_i(x) \geq P_i^0, i = 1, \dots, M. \quad (23)$$

То есть, для параметров фильтров осуществляется выбор оптимальных значений, максимизирующих обобщённую эффективность при условии использования максимальных порогов критериев затрат.

## Заключение

Предложен подход, позволяющий проводить комплексный анализ задачи назначения величин параметров аналоговых и цифровых фильтров с учётом многих критериев и качественной информации об относительной предпочтительности. Бикритериальная модель позволяет разделить все частные критерии на зоны ответственности и компетентности различных субъектов принятия решений и решить проблемы использования нечисловой информации о предпочтительности и адаптации модели к условиям внешней среды и оперативного изменения параметров задач. Отличия данного подхода состоят в разделении частных критериев на две группы «затраты-эффективность» и решения задачи методом главного критерия между этими группами.

## Библиографический список

1. **Орлов, И.Я.** Защита информационных радиосистем от помех: учебное пособие. / И.Я. Орлов. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2006. – 200 с.
2. **Bugrov, V.** Design of an Anti-aliasing Active Filter for a Hydroacoustic Receiving Station Using Discrete Non-linear Mathematical Optimization /V. Bugrov, Iu. Makarova // Elektrotehniški Vestnik. Ljubljana, Slovenija. – 2018. – № 85(3): P. 84-88.
3. **Proakis, J., Salehi M.** Digital Communications. Fifth Edition. / J. Proakis, M. Salehi. – McGraw-Hill Education, 2007. – 1150 p.
4. **Батищев, Д.И.** Методы оптимального проектирования / Д.И. Батищев. – М: Радио и связь, 1984. – 248 с.
5. **Батищев, Д. И.** Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений: монография / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. - Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
6. **Бугров, В.Н.** Целочисленные цифровые фильтры: монография. / В.Н. Бугров. – Lambert Academic Publishing, 2017. – 152 с.
7. **Подиновский, В. В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
8. **Suman Kumar Saha,** Gravitation search algorithm: Application to the optimal IIR filter design/ Suman Kumar Saha, Rajib Kar, Durbadal Mandala, S.P.Ghoshal // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – 2014. – vol. 26, issue 1 – P. 69-81
9. **Nirmala P.** Efficient FIR filter design methodology using dynamic regional harmony search algorithm with opposition and local learning (DRHS-OLL) /P. Nirmala, Dr. R. Rani Hemamalini // International Journal of Engineering and Technology (IJET). – 2014. – vol. 6, no 4 – P. 1799-1810
10. **Schulze, H., Luders C.** Theory and Applications of OFDM and CDMA. /H. Schulze, C. Luders / John Wiley & Sons, Ltd. The Atrium, England. – 2005. – 408 p.
11. **Lu, V.** Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Based on Joint Subcarrier and Power Allocation in OFDM Systems / Lu V., Gong Yi, Wu J., Peng H., Hua J., // IEEE Trans. Wireless Commun. Vol. 5. – Febr. 2017. – P. 2763-2770.

**Ju. Makarova, Dm. Shaposhnikov**

**BICRITERIAL PROBLEM OF FINDING FILTER PARAMETERS USING  
QUALITATIVE INFORMATION ON FREQUENCY INTERVAL PREFERENCES**

Lobachevskystate university of Nizhni Novgorod

**Objective:** Analysis and selection of filter parameters, taking into account qualitative information about the preference of frequencies in the design and operation of a radio system.

**Methodology:** The problem is analyzed and a mathematical model is constructed for choosing a rational variant of the parameters, characteristic of the operation of the radio engineering system, divided into two subsets, characterizing the parameters of technical operation ("costs") and the parameters of the quality results of the device ("efficiency"). For each of the groups, the criteria are combined and then a bicriterial analysis of the solution options is performed. The methodology of automatic calculation of weighting coefficients of importance using qualitative information about preferences on a set of criteria is used.

**Results:** A bicriteria decision-making scheme is proposed and justified, a search system for an optimal compromise solution is developed when choosing filter options for the design and operation of electronic devices.

**Conclusions:** The technique allows you to take into account changes in external and design conditions and radio engineering parameters to obtain their rational option in automatic mode.

**Keywords:** analogue and digital filter design, multicriteria optimization, effective solutions.

Е.А. Неймарк, А.А. Прохоров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОВНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА  
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Класс задач дискретной оптимизации широко распространен как в научной, так и в прикладной областях технической деятельности человека. Отдельный интерес представляют задачи класса NP, точное решение которых на достаточно больших размерностях найти в настоящее время невозможно ввиду несоизмеримо высокой вычислительной сложности этих задач, по крайней мере, относительно текущих технических возможностей. В связи с этим широко применяются эвристические алгоритмы поиска приближенного решения этих задач. В статье рассматриваются принципы работы простого генетического алгоритма, а также его модификации – островной модели генетического алгоритма. Приведен набор задач для тестирования алгоритмов и сравнительный анализ результатов тестирования.

**Ключевые слова:** Дискретная оптимизация, задача коммивояжера, генетический алгоритм, островная модель генетического алгоритма.

**Введение**

Островная модель - известный и эффективный способ реализации генетического алгоритма как на последовательном, так и на параллельном компьютере. В параллельной реализации островной модели каждый процессор выполняет генетический алгоритм и поддерживает свою популяцию поиска. Процессоры взаимодействуют между собой посредством периодического обмена частями своих популяций. Такой процесс обмена называется миграцией. Например исходная популяция поиска  $N_{total}$  для последовательной машины может быть разбита на  $M$  под-популяций и поделена между  $M$  процессорами размером  $N_{island}^i = \frac{N_{total}}{M}$  [1]. В островной модели вводятся 2 параметра: интервал миграции – число итераций алгоритма (поколений) между миграциями, и объем миграции – число особей, которыми острова будут обмениваться при миграции.

Параллельная реализация островной модели часто показывает лучшую производительность поиска, чем последовательная, как в плане качества найденного решения, так и в плане усилия т.е. общее число оценок точек, отобранных в пространстве поиска. Одной из причин является то, что острова поддерживают некую степень независимости и таким образом исследуют разные области пространства поиска, и в то же время их поиск синхронизирован посредством миграций.

Частичная изолированность популяций говорит о том, что островная модель может быть использована на задачах, которые свободно разбиваются на множество подзадач, которые могут быть решены независимо. В этом случае островная модель пользуется преимуществом линейного разбиения задачи для увеличения производительности путем распараллеливания, а затем собирает конечное решения посредством миграций.

## Модель разбиения популяции генетического алгоритма

Для исследования поведения генетического алгоритма опишем модель динамики популяции. Обозначим функцию  $G$  как траекторию динамики популяции классического генетического алгоритма. Функция  $G$  оперирует вектором  $p = (p^1, p^2, \dots, p^n)$ , где  $p^i$  – доля копий особи  $i$  в популяции,  $i = 1..n$ . Во времени популяция будет изменяться дискретно, т.е. в каждый такт времени  $t$  популяция будет принимать вид:  $p^t$ ,  $t \in Z^+$ . Используя функцию  $G$ , получаем:  $p^{t+1} = G(p^t)$ , где  $p^{t+1}$  – следующее поколение популяции  $p$ , которое можно рассмотреть как ожидаемое распределение особей в популяции на такте  $t+1$  [1].

С помощью функции генетического алгоритма  $G$  мы можем оценить вклад классического генетического алгоритма, запущенного на стартовых популяциях, взятых из разных областей пространства популяций. Конечная цель исследования – это моделирование идеальной островной модели генетического алгоритма. Эта модель предполагает разбиение исходной популяции генетического на ряд под-популяций, соотнесенных с островами. Каждый остров, по своей сути, есть процесс выполнения определенной версии классического генетического алгоритма определенной под-популяции. Миграция проходит между островами по некой схеме, с параметрами, выбранным исходя из временных и пространственных соображений.

### Рассматриваемые задачи оптимизации

Для оценки эффективности работы островной модели генетического алгоритма в целом, и, в частности относительно классического генетического алгоритма рассмотрим некоторые задачи коммивояжера [2], а именно класс двумерных Евклидовых задач, т.е. каждый пункт представляет точку на плоскости с координатами  $x^*$ ,  $y^*$ .

### Постановка задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n} \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n} \\ u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1, u_i \geq 0, i, j = \overline{2, n} \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right.$$

При реализации алгоритма на задаче коммивояжера будем использовать перестановочное кодирование, при котором гены в хромосоме будут принимать целочисленные значения, соответствующие номеру города, который в маршруте будет посещен  $i$ -м, где  $i$  – локус гена,  $i = 1..n$ .

### Исследуемые алгоритмы

В данной работе будут реализованы и исследованы всевозможные комбинации сборок простых генетических алгоритмов с генерацией начальной популяции по принципу рулетки из следующих наборов операторов и стратегий [3]:

- Разбиение: ассортативное «+», ассортативное«-», инбридинг, аутбридинг, панмиксия.
- Скрещивание: ОХ-кроссовер, СХ-кроссовер, РМХ-кроссовер.
- Стратегии формирования следующего поколения: принцип элитизма, стратегия непрерывающихся поколений, стратегия свободного выбора.

- Мутация: точечная мутация, инверсия, сальтация.
- Селекция: бинарный турнир, селекция рулеткой.

Исследование будет проведено на ряде задач коммивояжера из каждого класса, описанного выше. По результатам этого исследования будут выбраны К-наиболее эффективных сборки, и на их основе будут реализованы и исследованы островные модели, содержащие всевозможные комбинации следующих настроек:

- Топология миграции: кольцо, звезда, случайный обмен.
- Принцип миграции: случайная миграция, лучший-лучший, лучший-худший, миграция по принципу рулетки, разрежение.

### Эксперимент

Эксперимент оценивает исследуемые алгоритмы по критериям качества найденного решения, скорости сходимости алгоритма и состоит из трех частей.

Эксперимент №1: запустить каждую из 270 указанных вышеборок простого генетического алгоритма по **№п** прогонов на **№з** задачах из каждого класса, и рассмотреть запуск с лучшим найденным решением для каждого алгоритма; условием выхода является либо схождение популяции алгоритма к решению, либо истечение **№и** числа итераций. Оценить результаты запусков, а именно: качество полученного решения, количество обработанных итераций, и на основе этих результатов выбрать **№а** наиболее эффективных алгоритмов

Эксперимент №2: запустить каждую из 15 указанных вышеборок островной модели генетического алгоритма на **№з** задачах из каждого класса; условием выхода будет являться либо схождение к решению популяций каждого острова, либо истечение **№и** числа итераций. Оценить результаты аналогично первой части эксперимента и на основе результатов выбрать наиболее эффективную сборку островной модели.

Эксперимент №3: сравнить эффективность работы выбранной островной модели с простым генетическим алгоритмом и другими эвристическими методами на **альтернативном** наборе задач коммивояжера из каждого класса, соотнеся результаты аналогично частям 1 и 2.

### Результаты

Эксперимент №1: Ввиду большого числа различныхборок было принято решение задать каждой сборке уникальный идентификатор (от 1 до 270). В таблице ниже алгоритмы представлены своим идентификатором (который можно однозначно восстановить в набор варьируемых параметров, поскольку порядок перебора классов операторов и вариантов из этого класса заранее определен)

Подсчитанный критерий имеет дробную часть и, тем самым, может отличаться от данных библиотеки TSPLIB [4], так как в эксперименте рассматриваются задачи не в матричном, а евклидовом виде, соответственно расстояние между городами считается по теореме Пифагора.

Число рассматриваемых задач в эксперименте **№з** = 4.

Число прогонов алгоритма на каждой задаче **№п** = 10.

Максимальное число итераций алгоритма **№и** = 5000.



Число лучших алгоритмов для отбора  $N_a = 5$ .

Таблица 1

Результаты эксперимента №1

Задача / Эталонное решение	#1 (ID / Найденное решение / Число итераций)	#2 (ID / Найденное решение / Число итераций)	#3 (ID / Найденное решение / Число итераций)	#4 (ID / Найденное решение / Число итераций)	#5 (ID / Найденное решение / Число итераций)
Bayg29/ 9074.14804787284	75 / 9076.98292 / 5000	129 / 9104.35954 / 5000	93 / 9105.87600 / 5000	111 / 9105.87600 / 5000	57 / 9107.19441 / 5000
Berlin52 / 75443.6590190409	75 / 75772.0184 / 5000	219 / 78895.6167 / 5000	74 / 81362.7436 / 5000	183 / 82263.3707 / 234	111 / 82500.0735 / 5000
Att48 / 33523.7085074356	165 / 34794.4272 / 5000	219 / 34904.6087 / 5000	87 / 35185.3273 / 5000	129 / 35204.0422 / 5000	69 / 35775.5059 / 5000
Eil51 / 429.983311983384	249 / 447.806989 / 5000	81 / 447.899756 / 5000	87 / 448.773738 / 5000	219 / 450.188358 / 5000	57 / 451.340213 / 5000

В табл. 1 указаны эталонные (лучшие из известных) решения задач, а так же 5 лучших найденных решений каждой задачи, идентификатор сборки, которая нашла это решение и число итераций, за которое это решение было найдено. Исходя из результатов эксперимента можно выявить лучшие сборки алгоритма, результаты работы которых довольно близки к эталонным значениям. Большинство алгоритмов завершили свою работу по истечении числа  $N_{и}$  допустимых итераций, что говорит о том, что потенциально эти алгоритмы могут найти более качественное решение.

Эксперимент №2: Исходя из результатов эксперимента 1 было решено отобрать сборки алгоритмов, которые войдут в островную модель по следующему принципу: либо алгоритм нашел лучшее решение из всех для какой либо задачи, либо находил одно из лучших решений для нескольких задач, стабильно показывая хорошие результаты.

Таким образом, были отобраны алгоритмы с идентификаторами: 75, 165, 249, 219, 87, 111, 57.

В табл. 2 представлено выборка операторов для каждой из данных сборок.

Таблица 2

Описание операторов выбранныхборок генетических алгоритмов

ID	Разбиение	Скращивание	Стратегия формирования следующего поколения	Мутация	Селекция
75	Ассортативное«+»	ОХ	Стратегия свободного выбора	Инверсия	$\beta$ -турнир
165	Панмиксия	СХ	Стратегия свободного выбора	Инверсия	$\beta$ -турнир
249	Аутбридинг	ОХ	Стратегия свободного выбора	Сальтация	$\beta$ -турнир
219	Аутбридинг	СХ	Стратегия свободного выбора	Инверсия	$\beta$ -турнир
87	Ассортативное«+»	ОХ	Стратегия свободного выбора	Сальтация	$\beta$ -турнир

111	Инбридинг	СХ	Стратегия свободного выбора	Инверсия	β-турнир
57	Ассортативное«+»	СХ	Стратегия свободного выбора	Инверсия	β-турнир

Аналогично эксперименту 1, сборки островных моделей также были пронумерованы от 1 до 15.

Таблица 3

## Результаты эксперимента №2

Задача / Эталонное решение	#1 (IDs / Найденное решение)	#2 (IDs / Найденное решение)	#3 (IDs / Найденное решение)	#4 (IDs / Найденное решение)	#5 (IDs / Найденное решение)
Bayg29 / 9074.1480478728	6, 5, 9, 10, 8, 4, 1, 11, 12 / 9074.1480478728	3, 7 / 9076.98292	14 / 9108.77254	13 / 9111.60741	2 / 9120.33884
Berlin52 / 75443.659019040	5, 12, 8, 7 / 75443.659019040	6 / 75863.00594	10 / 77166.85877	4 / 77419.9827	2 / 77765.04499
Att48 / 33523.708507435	5 / 33697.392131383	12 / 33698.77541	8 / 33701.26176	6 / 33772.0529	11 / 34024.75033
Eil51 / 429.98331198338	8 / 434.26321297370	12 / 438.0683916	10 / 438.793652	3 / 441.016119	9 / 441.211327

В табл. 3 указаны 5 лучших найденных решений для каждой задачи, а так же совокупностьборок островных моделей, которые нашли это решение за **N** итераций.

Эксперимент №3: Исходя из результатов эксперимента 2, выделим лучшую сборку с идентификатором 8. Сравним результаты работы этой модели с результатом работы условно лучшей сборки простого генетического алгоритма с идентификатором 75, а так же с другими эвристическими алгоритмами, такими как метод ближайшего соседа, метод включения ближайшего соседа и метод самого дешевого включения.

Таблица 4

## Результаты эксперимента №3

Метод	Найденное решение задачи eil76	Найденное решение задачи kroa100	Найденное решение задачи gr120	Найденное решение задачи ch130
Метод ближайшего соседа	721.42009201521	26291.0966701658	2119.6202349807	7304.52376013881
Метод включения ближайшего соседа	885.72371926049	39719.2608103663	2638.0163856677	10219.2516281812
Метод самого дешевого включения	826.60787506521	39850.208147204	2624.1762649696	10293.4950890109
Генетический алгоритм	638.86998659271	26881.6891502354	2946.5431708484	7419.27600824176
Островная модель	599.65868535353	22523.3395719081	1997.3934055039	7106.23047040559

Проанализировав результаты третьего эксперимента (табл. 4) можно сделать вывод, что простой генетический алгоритм хоть и способен находить решение лучше базовых эвристик, как, например, для задачи eil76, но не обладает достаточной стабильностью, в чем выигрывает островная модель, стабильно находя решение более качественное, чем другие из представленных эвристических алгоритмов.

### Выводы

В данной работе был проведен обзор известных операторов и настроек генетических алгоритмов и островной модели, реализована их функциональная часть. Были выведены наиболее эффективные сборки простых генетических алгоритмов, сконструирована островная модель, оперирующая этими сборками, были подобраны оптимальные параметры миграции для данной островной модели. Также было проведено сравнение результатов работы полученной модели с другими эвристическими алгоритмами и подтверждено превосходство островной модели над ними.

### Библиографический список

1. **Whitley, D.** The Island Model Genetic Algorithm: On Separability, Population Size and Convergence /D. Whitley, S. Rana, R. B. Heckendorn // Department of Computer Science Colorado State University Fort Collins, Colorado 80523 USA
2. **Булгаков, И.В.** Решение задачи коммивояжера с использованием генетических алгоритмов / И.В. Булгаков, Е.А. Неймарк // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 1998. № 2. С. 186.
3. **Неймарк, Е.А.** Улучшение качества начальной популяции эволюционно-генетического алгоритма для задачи коммивояжера // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 50. С. 69-73.
4. The TSPLIB Traveling Salesman Problem Instances // Zuse Institute Berlin. – URL: <http://elib.zib.de>

**E.A. Neumark, A.A. Prokhorov**

### INVESTIGATION OF ISLAND MODEL GENETIC ALGORITHM IN THE SOLUTION OF DISCRETE OPTIMIZATION PROBLEMS

N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The class of discrete optimization problems is widely distributed in both scientific and applied fields of human technical activity. Of particular interest is NP-problems, the exact solution of which is currently impossible to find on sufficiently large dimensions due to the incommensurably high computational complexity of these problems at least relative to current technical capabilities. In this regard, heuristic algorithms for finding approximate solutions to these problems are widely used. The article discusses operation principles of a simple genetic algorithm, as well as its modification – the island model of genetic algorithm. A set of tasks for algorithms testing and a comparative analysis of test results are presented.

**Keywords:** discrete optimization, travelling salesman problem, genetic algorithm, island model genetic algorithm.

## ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТАКСИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ (ПРОСТОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ)

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В статье анализируется проблема моделирования предложений и их графического представления в аспекте описания авторских стилей. На основе краткого обзора существующих алгоритмов интерпретации синтаксических единиц, принятых соглашений и параметров, описывающих предложение, демонстрируются преимущества данного метода анализа. Также рассматривается возможность модернизации некоторых положений теории графического представления синтаксических структур, предложенной И.П. Севбо, с целью расширения списка параметрических характеристик предложений и уточнения их количественных показателей.

**Ключевые слова:** авторский стиль, граф, деревья зависимостей, простое предложение, синтаксическая конструкция, синтаксическая позиция, функциональный стиль.

Грамматика зависимостей была создана как закономерное продолжение и развитие традиционного синтаксиса и основана на положениях теории словосочетания и синтаксических связях. А.М. Пешковский первым из отечественных лингвистов предложил моделирование синтаксических конструкций [2], большой вклад в развитие структурного синтаксиса внесли работы Л. Теньера, различные способы интерпретации синтаксических единиц предлагались рядом ученых (А.М. Мухин, Н.Н. Прокопович, О. Есперсен, И.Б. Долинина и др.).

Профессором И.П. Севбо в 70-80-е годы прошлого века для анализа синтаксических особенностей авторских стилей был разработан метод описания и представления синтаксических структур в виде деревьев зависимостей [3]. Основные принципы построения грамматики зависимостей сведены к следующим положениям:

- предложение строится из единиц таксономического уровня – словоформ, при этом служебные слова рассматриваются наравне со знаменательными частями речи;
- слова в предложении связаны отношением подчинения (согласования, управления, примыкания);
- в предложении есть одно абсолютно независимое слово – сказуемое, следствием чего является наличие двух типов связей: ветвлений и цепочек подчинений;
- для каждого слова задается набор сильных управлений, отражающих его поведение в речи при построении конкретных предложений;
- иерархическая структура зависимостей между словами предложения изображается в виде дерева зависимостей [3, с. 8-9].

Несовпадение третьего положения теории с подходом А.М. Пешковского, у которого независимым членом предложения считается подлежащее, являющееся верхним узлом схемы [2], что также расходится с современным определением синтаксических позиций в предложении, в соответствии с которым абсолютно независимым в предложении также является подлежащее, представляется достаточно оправданным по двум основным причинам. Во-первых, среди функционирующих во всех стилях односоставных предложений намного больший процент составляют процессуальные, в которых монопредикат формально представлен сказуемым, для которого пришлось бы вводить мнимую вершину, что совсем не корректно для односоставных

личных и невозможно для односоставных безличных и инфинитивных предложений. И, во-вторых, группа второстепенных членов предложения, относящихся к сказуемому (обстоятельства, дополнения, определения при дополнениях), как правило, больше группы второстепенных членов подлежащего (определения и чаще всего обстоятельства меры и степени, обозначающие признак признака).

Для интерпретации структуры предложений был принят ряд «соглашений», необходимых при любой индексации. Даже если в некоторых случаях приходится сводить неоднозначно понимаемый языковой факт к одному из возможных вариантов, это позволяет провести формализацию синтаксических структур, используя элементы теории графов, и представить их в виде деревьев зависимостей. И.П. Севбо отмечает, что «любой тип синтаксического анализа независимо от рассматриваемых в нем минимальных единиц и связей сталкивается с проблемой неоднозначного понимания некоторых предложений» [3, с. 30].

Автором разработанной теории были приняты следующие соглашения:

- одним узлом изображаются фразеологизмы, наречия, образованные из разных падежных форм одного и того же существительного, сложные союзы, предлоги;
- аналитические формы сравнительной и превосходной степени, сложные формы будущего времени глаголов изображаются двумя узлами;
- частицы, так же как и предлоги, рассматриваются как отдельные слова наравне со знаменательными и представляются в виде самостоятельного узла;
- одним узлом изображается сочетание слов, состоящее из имени, отчества и фамилии, сложные прилагательные, которые пишутся через дефис;
- терминологические словосочетания, семантическая слитность которых не вызывает сомнений, изображаются двумя и более узлами, глагольные сочетания, как правило, имеющие стилистическую окраску (*одержать, победу, возлагать надежду*), также изображаются разными узлами [3, с. 34-37].

Целью интерпретации синтаксических структур была стилистическая диагностика: анализ и описание авторских стилей (Л.Н. Толстого, Ф.М. Достоевского, А.П. Чехова и др.), которое проводилось по определенным параметрам, определяемым по рисунку дерева зависимостей, с использованием вероятностно-статистических показателей (выборочное среднее, выборочная дисперсия, выборочное среднее квадратичное, допустимое отклонение).

В качестве стилистических параметров, по которым проводилась идентификация авторских стилей, были выбраны следующие:

- количество слов в фразе (фразой является законченное предложение, количество слов определялось по узлам);
- количество простых предложений в сложном;
- количество уровней в дереве (количество узлов в максимально длинном пути дерева);
- ширина ветвления у корня (количество слов, подчиняемых сказуемому, включая подлежащее);
- максимальное количество перемен направлений пути;
- максимальная протяженность дуги в дереве;
- количество однородных групп в дереве (число мнимых слов в дереве зависимостей) [3, с.147-149].

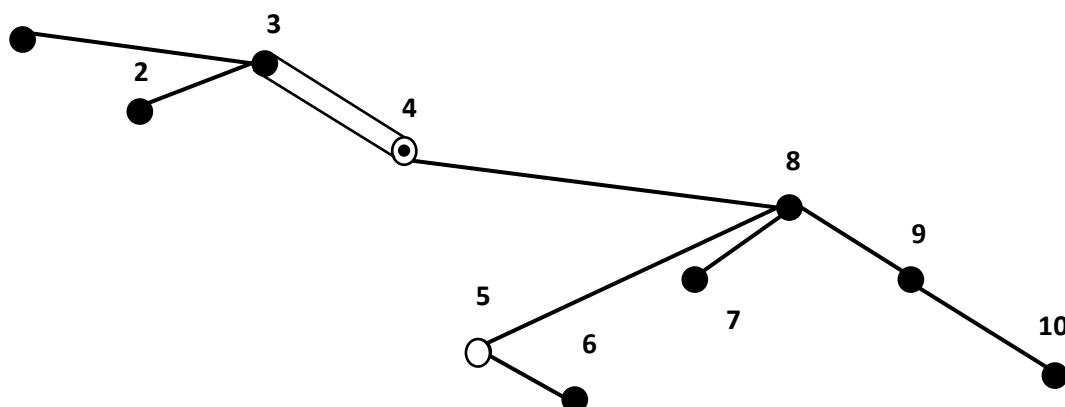
Как отмечает И.П. Севбо, данные параметры разнотипны по содержанию: одни описывают внешние неструктурные признаки, другие характеризуют внутреннюю структуру предложения.

Для стилистического описания на синтаксическом уровне текста перечисленные параметры, несомненно, в той или иной степени характеризуют авторский почерк, но результаты подобно-

го анализа, как представляется, могут быть использованы лишь для формирования гипотезы (например, атрибуционной), прежде всего потому, что эти параметры не обязательно будут дифференцирующими для данного автора. Подтверждение или опровержение гипотезы должно проводиться другими методами с использованием того или иного аппарата математических средств.

Кроме того, нельзя забывать о по-прежнему актуальной задаче, заключающейся в разработке алгоритмов автоматического анализа моделей синтаксических структур, тем более что в настоящее время существует множество различных систем распознавания образов. Подобный опыт имеется в теории и практике описания лингвистических объектов математическими методами, в частности, атрибуция романа «Тихий Дон», проведенная в 80-е годы прошлого века коллективом норвежских ученых во главе с Г. Хьетсо [4]. Рассмотрение результатов проведенной атрибуции с точки зрения степени их достоверности не является целью данной работы, но, заметим, что анализу подвергались грамматические единицы, такие, как длина предложения, позиционное расположение грамматических категорий в предложении, отдельные предложно-падежные сочетания.

Дерево зависимостей, описывающее структуру предложения, согласно разработанному И.П. Севбо алгоритму интерпретации, выглядит следующим образом (рис. 1).



Стояла такая темень, что в комнате не было видно окон

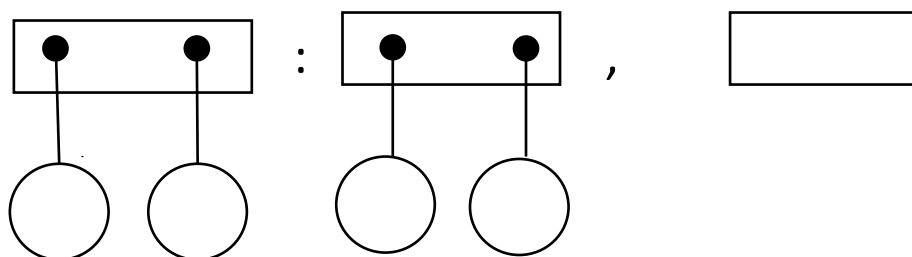
Рисунок 1. Структурная схема сложного предложения

Для прочтения данной схемы необходимо знать систему условных обозначений, используемых И.П. Севбо: закрашенный кружок обозначает полнозначные слова, включая частицы и формообразующие элементы (1-3, 6,7-10 узлы), не закрашенный кружок используется для обозначения предлогов, плюс в круге – для обозначения сочинительных союзов (4 узел), точка в круге – для обозначения подчинительных союзов и союзных слов, перечеркнутый кружок – для обозначения нулевого знака при эллипсисе, сплошная линия – подчинение слов, две сплошных – подчинение предложений, пунктирная линия – однородные члены предложения, сплошная и пунктирные линии – сочинительная связь между предложениями, точечная – вводные конструкции.

Моделирование синтаксических структур является в настоящее время по-прежнему актуальной задачей, имеющей несомненную практическую ценность как в теории и практике преподавания синтаксиса в высшей школе, так и для решения конкретных исследовательских вопросов. Достаточно эффективно оно проводится на уровне сложного предложения: используется два вида схем, горизонтальная, полностью соответствующая позиционному расположению предикативных частей, и вертикальная, которая не имеет условного обозначения интерпозиции придаточных предложений и, следовательно, не отмечает ее, но более наглядно выделяющая смысловые отношения в сложном предложении и менее сложная в силу отсутствия отражения в ней некоторых элементов структуры сложноподчиненных предложений (коррелятивов, морфологических категорий опорных слов и др.). Приведем пример горизонтальной и вертикальной схем предложения (рис. 2).

*Митька сидел на диване и почесывал колено, стараясь не смотреть на Лужина, который тоже не знал, куда смотреть, и придумывал, чем занять рыхлое дитя: он стал соображать, нет ли в столовой конфет, подумал, не пустить ли в гостиной граммофон, но мальчик на диване его гипнотизировал одним своим присутствием [1, с.127].*

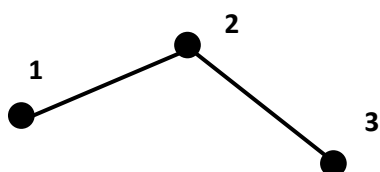
[ +сущ ], (который +гл ± К, (куда ), +гл ± К, ), ( чем ): [ +гл ± К, (ли ), +гл ± К, (ли ), но [ ]



**Рисунок 2. Горизонтальная и вертикальная схемы сложного предложения**

Данные схемы характеризуют такие структурные параметры сложного предложения, как количество предикативных частей, количество сложноподчиненных предложений расчлененной и нерасчлененной структуры, количество разных видов связи (сочинительной, подчинительной, бессоюзной). Подсчет параметров не очень трудоемкий, его можно провести как интеллектуально, так и автоматически, при наличии соответствующей программы распознавания графических образов. Эти параметры также не обязательно будут дифференцирующими для данного автора. Несмотря на то, что модели полностью отражают структуру сложного предложения, они не содержат структурных характеристик входящих в них предикативных частей.

Синтаксические модели в виде деревьев зависимостей, разработанные И.П. Севбо, содержат информацию как о структуре простых предложений, так и о структуре предикативных частей, но в силу трудоемкости изображения и сложности последующего анализа они не используются в практике интерпретации синтаксических единиц. Кроме того, одинаковые модели могут обозначать разные синтаксические структуры, что может привести к разному прочтению схем (рис. 3)



## Ученые - вот чума

**Рисунок 3. Структурная схема простого предложения с составным именным сказуемым с нулевой связкой**

Вершинный узел в данной схеме занимает частица *вот*, хотя в соответствии с алгоритмом интерпретации вершину должно занимать сказуемое – составное именное сказуемое с нулевой связкой (*чума*), что представляется несколько не логичным. Кроме того, согласно принятым соглашениям этой модели могут соответствовать разные предложения, например: *Вчера был дождь* (двусоставное полное предложение, простое глагольное сказуемое, инверсия), *Вчера было холодно* (односоставное безличное полное предложение), *Я вернулся домой* (двусоставное полное предложение, простое глагольное сказуемое, прямой порядок слов), *Мне ответили отказом* (односоставное неопределенно-личное полное предложение).

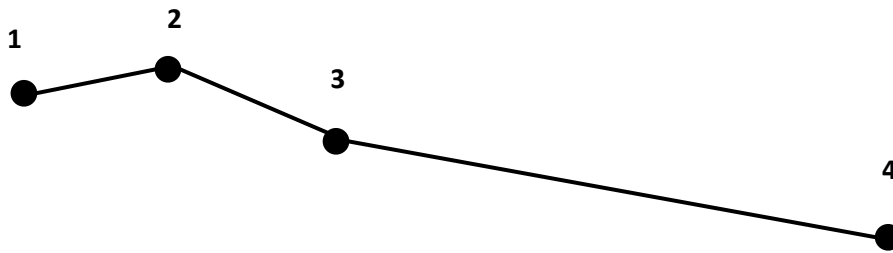
Представляется возможным попытаться, несколько изменив список соглашений, расширить набор параметров, которые описывают внутреннюю структуру простых предложений, и уточнить их количественные показатели.

В данной статье рассмотрению подлежат только параметры, касающиеся характеристик простого двусоставного предложения. Простые односоставные предложения, являющиеся важнейшей функциональной стилистической характеристикой, а возможно, и индивидуально-авторской в художественном или публицистическом стиле (авторские аналитические обзоры, комментарии), сложные предложения, их виды, средства связи и др., будут описаны в дальнейшем.

Рассмотрим такой параметр, как количество слов в фразе. Если говорить о синтаксических характеристиках, то слово такой характеристикой не является, учитывая также тот факт, что, в соответствии с принятыми соглашениями, словами считаются также незначащие части речи, не выполняющие самостоятельную синтаксическую функцию. Показательным может стать параметр, характеризующий количество синтаксических позиций в предложении, и для определения его необходимо вернуться к проблеме изображения отдельного слова в дереве, это касается предложных форм имен существительных, сложных форм одного слова, синтаксически несвободных языковых (составные сказуемые и количественно-именные словосочетания) и речевых словосочетаний (метафоры, терминологические словосочетания, описание предметов существенными признаками), частиц.

С точки зрения выражения синтаксического значения не существует различий между простой и сложной формами будущего времени – это одна синтаксическая позиция, поэтому сложная форма будущего времени должна соответствовать одному узлу и изображаться одной точкой. Конечно, мы в модели не будем фиксировать такое расположение, когда формообразующий глагол *быть* и инфинитив оторваны друг от друга: *Я буду всегда тебе помогать*. Но это является незначительным несоответствием, будем считать, что сказуемое занимает вторую позицию в предложении: вопрос к обстоятельству и дополнению задается не от слова *буду*, а от словоформы *буду помогать* - *когда? кому?* (рис. 4).

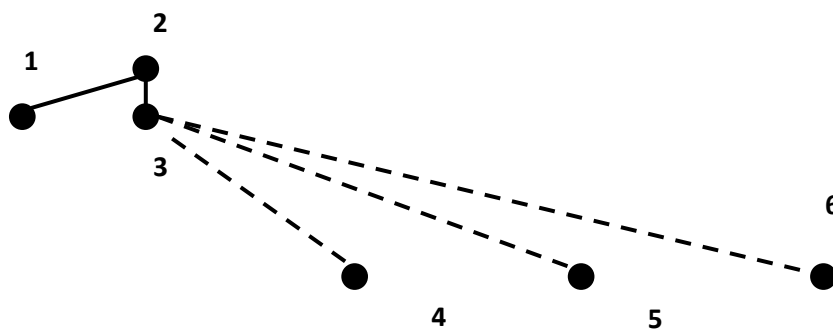




## Я буду всегда помнить вас

Рисунок 4. Структурная схема простого предложения с составным именным сказуемым с нулевой связкой

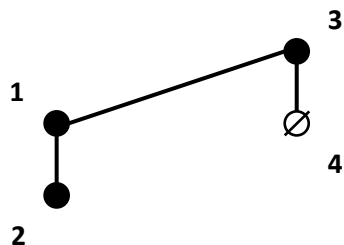
Составные сказуемые тоже логично изображать одним узлом, т.к. это они занимают одну синтаксическую позицию, но, с другой стороны, с точки зрения характеристики синтаксического почерка автора, представляет интерес такой параметр, как количество простых и составных предикатов, поэтому предлагается ввести для него идентифицирующее обозначение: от узла, обозначающего корень дерева, – грамматически главное слово в составном глагольном и именном предикате, по вертикали отметить точкой зависимый компонент – инфинитив или именную часть. В случае неполноты сказуемого этот узел также обозначается, но иначе – как эллиптическая конструкция. Исключения составят составные именные предикаты с нулевой связкой (*Иванов – инженер*), которую тоже необходимо фиксировать, чтобы было соответствие параметра количество составных предикатов, хотя отсутствие глагола быть в подобных случаях не считается неполнотой, для чего необходимо ввести дополнительное обозначение. Это является необходимым, так как в качестве измеряемой характеристики может быть введен параметр количество неполных синтаксических конструкций, который также может характеризовать синтаксический почерк автора или какой-то функциональный стиль. Приведем примеры таких конструкций (рис. 5, 6)



## Москва была таинственная, огромная, снежная

Рисунок 5. Структурная схема простого предложения с составным именным сказуемым с однородностью в именной части

В вершине дерева (узел 2) находится связочный глагол *быть*, узел 3 мнимый, необходимый для изображения однородности, составное именное сказуемое отмечено курсивом. В этом предложении две синтаксические позиции.

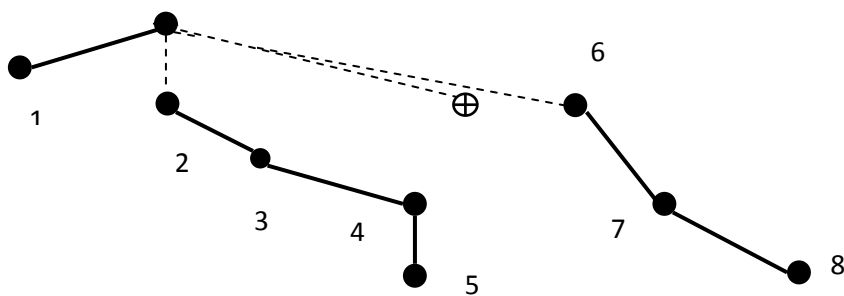


*Все это правда*

Рисунок 6. Структурная схема простого предложения с составным именным сказуемым с нулевой связкой

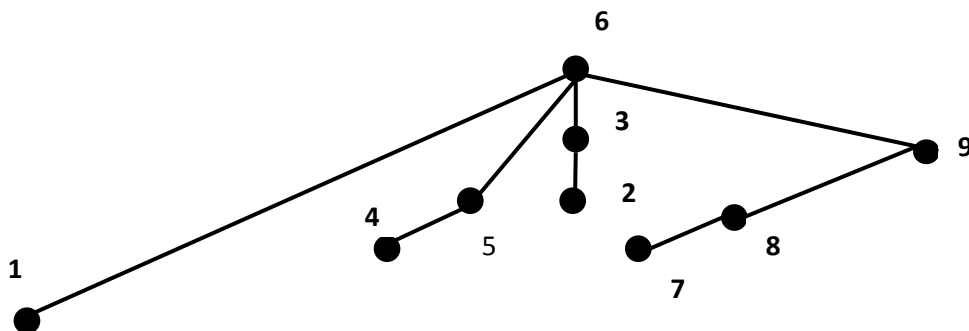
Узлы 1-2 соответствуют несвободному словосочетанию, занимающему позицию подлежащего *все это*, перечеркнутый кружок обозначает нулевую связку в составном именном сказуемом *правда*.

Аналогично предлагается изображать речевые синтаксически несвободные конструкции (в предложениях выделены курсивом): узлом, расположенным вниз по вертикали на один уровень. Рисунок дерева будет выглядеть следующим образом (рис. 7, 8).



*Иван Иванович осмотрел меня в последний раз и велел выписать из больницы*

Рисунок 7. Структурная схема простого предложения с синтаксически несвободным речевым словосочетанием (обстоятельством)



## По-прежнему *первым лицом* в четвертой школе *был* наш заведующий Николай Антонович

**Рисунок 8. Структурная схема простого предложения с синтаксически несвободным языковым и речевым словосочетанием (сказуемым)**

Тогда в дереве зависимостей могут быть разграничены языковые несвободные словосочетания (узел, обозначающий лексически главный, но зависимый компонент, идет по вертикали от корня) и речевые (узел, обозначающий зависимый компонент, идет по вертикали от любого другого узла, кроме корня).

Мы получаем в некоторой степени усложнение рисунка дерева, но, с другой стороны, можно убрать узлы, соответствующие предлогам и частицам, что приведет к упрощению структуры и, соответственно, прочтения рисунка. Предлоги, несмотря на то, что могут быть оторваны от словоформы (*подошли к заброшенному саду*), не занимают самостоятельной синтаксической позиции. Частицы могут являться средством выражения модальности предложения, но формализовать этот параметр пока не представляется возможным, поэтому эти узлы тоже предлагается убрать.

Таким образом, рисунок дерева в достаточно явном виде содержит следующие параметры, являющиеся обязательными при характеристике простого двусоставного предложения: количество членов предложения, количество инверсий в предикативной паре, количество простых и составных предикатов, количество несвободных словосочетаний (языковых и речевых), количество полных и неполных предложений.

Предполагается ввести специальные обозначения для односоставных предложений для определения таких параметров, как односоставные и двусоставные предложения, которые характеризуют как авторский почерк, так и функциональный стиль.

Если говорить о проблеме определения авторства анонимного и псевдонимного произведения, то для формирования атрибуционной гипотезы не нужны такие сложные операции по формализации, вполне достаточно подсчета абсолютной частоты определенных элементов и интуиции лингвиста. Используя графы зависимостей, мы можем в какой-то степени, с той или иной степенью приближенности, описать авторский стиль и, представляется, что с большей степенью достоверности, дать характеристику текста по функциональной принадлежности.

### Библиографический список

1. **Набоков, В.В.** Защита Лужина. Собрание сочинений в 4-х т., т.2. М.: Правда, 1990.

2. **Пешковский, А.М.** Русский синтаксис в научном освещении / А.М. Пешковский. - М.: Учпедгиз, 1956. – 511 с.
3. **Севбо, И.П.** Графическое представление синтаксических структур и стилистическая диагностика / И.П. Севбо. - Киев: Наукова думка, 1981. – 192 с.
4. **Хьетсо, Г.** Кто написал “Тихий Дон” / Г. Хьетсо. – М.: Книга, 1989. –186.

**A.V. Sineleva**

### **GRAPHIC MODELING OF SYNTACTIC STRUCTURES (SIMPLE OFFER)**

Nizhniy Novgorod state university n. a. N.I. Lobachevsky

The article analyzes the problem of modeling sentences and their graphical presentation in the aspect of the description of copyright styles. Based on a brief overview of existing algorithms for interpreting syntactic units, accepted conventions and parameters describing a sentence, the advantages of this analysis method are demonstrated. Also considered is the possibility of modernization of some provisions of the theory of graphic representation of syntactic structures proposed by I.P. Sevbo, with the aim of expanding the list of parametric characteristics of sentences and clarifying their quantitative indicators.

**Keywords:** author style, graph, dependency trees, simple sentence, syntactic construction, syntactic position, functional style.

Н.В. Старостин, М.М. Годовицын, А.С. Филатова

## АЛГОРИТМ ТРАССИРОВКИ ЦЕПЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕКОВ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Рассматривается проблема трассировки цепей интегральной схемы. Предлагается технология перетрассировки, основанная на расширении коммутационных ресурсов имеющейся сетки трассировки за счет введения специальных виртуальных треков. В работе описывается алгоритм решения задачи, который включает процедуры расчета трасс на расширенной сетке трассировки и вытеснения трасс с виртуальных треков на реальные треки.

**Ключевые слова:** трассировки цепей, интегральная схема, виртуальные треки.

### Введение

Одним из этапов типового маршрута проектирования интегральной схемы на стандартных ячейках является трассировка цепей микросхемы. Под трассировкой понимается процесс проектирования топологии проводящих соединений, связывающих контактные площадки компонент схемы.

Тенденции, с одной стороны связанные с ростом размеров и сложностью схем, а с другой стороны ориентированные на миниатюризацию геометрических размеров микросхем, приводят к увеличению числа объектов на кристалле и плотности их упаковки в пространстве кристалла. При этом наблюдается рост взаимного влияния соседних трасс друг на друга – в этих обстоятельствах задача перетрассировки отдельных фрагментов с учетом взаимного расположения трасс становится особо актуальной.

Перетрассировка с учетом взаимного расположения трасс призвана решить задачу изыскания таких ресурсов коммутационного поля, на базе которых можно реализовать проблемные цепи без топологических и иных нарушений, включая критические задержки передачи сигналов.

### Задача перетрассировки

Рассмотрим частный случай задачи трассировки с одним слоем металлизации. Исходными данными для задачи перетрассировки являются: горизонтальные и вертикальные треки, образующие сетку трассировки; зоны запрета металлизации на сетке трассировки, включая металл трасс заземления и питания; закрепленные за узлами сетки трассировки контактные площадки компонентов схемы; перечень цепей схемы, с указанием для каждой цепи набора контактов; реализованные металлом трассы некоторого подмножества цепей. Под трассой цепи понимается связная система металлических проводников, связывающая все контакты цепи и проходящая исключительно в рамках заданной структуры сетки трассировки и не имеющая контактов с зонами запрета и трассами иных цепей.

В задаче требуется перестроить имеющиеся трассы так, чтобы появилась возможность для реализации трасс ранее нетрассированных цепей. Главная задача трассировки состоит в реализации трасс всех цепей.

Точные и приближенные алгоритмы трассировки представляют главным образом академический интерес, и в реальных условиях для решения практических задач не используются из-за экспоненциального роста вычислительных издержек при росте размера задачи.

Основные практически значимые эвристические алгоритмы трассировки можно разделить на два класса. Первый класс составляют алгоритмы, осуществлявшие поиск решения непосредственно на сетке трассировки. К таким алгоритмам относятся каналные и магистральные [1,2], волновые [3,4] и др. Главная проблема данных алгоритмов – преждевременная фиксация трасс, что приводит к быстрому исчерпанию ресурсов коммутационного поля. В результате нередки ситуации, когда неудачно проведенная трасса перекрывает возможность реализации других цепей.

Ко второму классу относятся алгоритмы [5,6], которые выполняют расчет системы трасс в два этапа – вначале осуществляют укладку трасс на непрерывной плоскости (дает возможность между любой парой непересекающихся трасс всегда провести третью трассу), а затем решают задачу переноса решения из непрерывного пространства в дискретное, определяемое сеткой трассировки. Фактически первый этап позволяет задать в некотором смысле план реализации цепей, но при этом базовая проблема преждевременного исчерпания ресурсов коммутационного поля на втором этапе все также имеет место.

Оба класса описанных алгоритмов нередко на практике сталкиваются с проблемой получения недостроенных трасс, которая решается многократной перетрассировкой системы трасс во всей или в отдельно взятой области в автоматизированном режиме (с участием эксперта). Подобные решения характеризуются большими производственными издержками, приводящими в итоге к удорожанию всего процесса конструкторского проектирования изделий микроэлектроники.

### **Концепция топологической перетрассировки**

Анализ различных вариантов решения проблемы недостроенных трасс позволяет сформулировать следующие тезисы. Во-первых, перетрассировка на исходной сетке, как правило, малоэффективна. Во-вторых, перетрассировка в метрическом пространстве бессмысленна, так как имеет место проблема отображения непрерывного решения в дискретное пространство. Однако, реализация цепей в непрерывном пространстве ограничивается только топологией графа (гиперграфа) цепей. Если решение существует, то есть эффективный алгоритм отыскания решения задачи. Это обеспечивается свойством непрерывного пространства, которое дает возможность между любой парой непересекающихся трасс всегда провести третью. Воспользуемся этим аспектом для решения задачи перетрассировки.

Для расширения возможностей коммутационного поля предлагается ввести в имеющуюся сетку трассировки новые треки – будем их называть виртуальными. Для чего, между каждой парой соседних имеющихся треков, вставим дополнительный виртуальный трек, который фактически с некоторой степенью условности моделирует особенности непрерывного пространства.

В результате технология перетрассировки выглядит следующим образом: на первом этапе коммутационное поле с частично построенным решением дополняется виртуальными треками; на втором этапе выбирается недостроенная цепь и находится ее трасса; на третьем этапе вытесняются фрагменты трасс, попавшие на виртуальные треки. Второй и третий этапы вы-

полняются до тех пор, пока не будут перебраны все проблемные цепи. Рассмотрим подробно все этапы представленной технологии.

### Дополнение виртуальными треками

Для временного расширения возможностей коммутационного поля введем между каждой парой соседних имеющихся треков дополнительный (виртуальный) трек. На рисунке (см. рис. 1) представлена сетка трассировки до (а) и после (б) введения виртуальных треков.

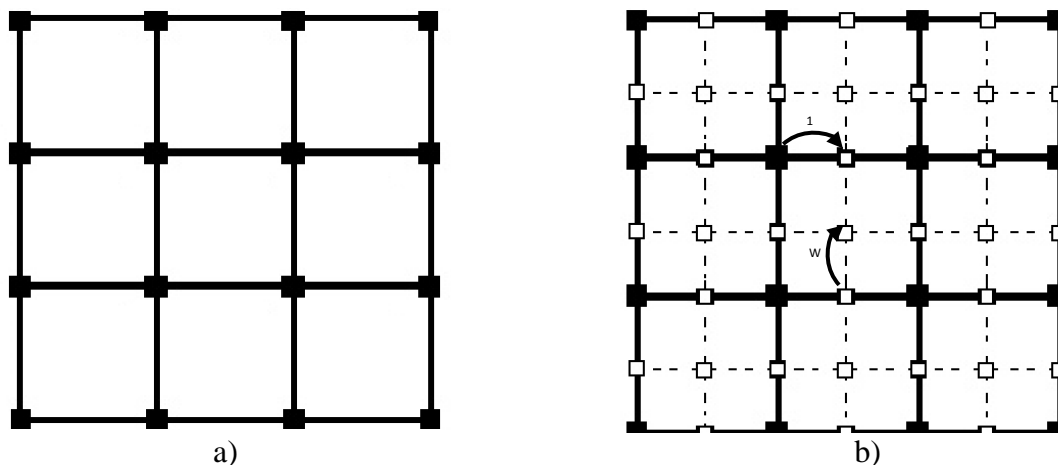


Рисунок 1. Дополнение сетки трассировки виртуальными треками

В результате получим новую сетку трассировки (см. рис. 1), в которой помимо реальных узлов (закрашенные) есть виртуальные (незакрашенные) – они опираются на вертикальные и/или горизонтальные виртуальные треки. Ребра сетки трассировки, которые инцидентны виртуальным узлам, опирающихся одновременно на два (вертикальный и горизонтальный) виртуальных трека, будем называть виртуальными (отмечены пунктиром).

### Трассировка на сетке с виртуальными треками

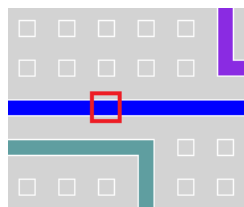
Трассировку одной цепи в данной сети предлагается осуществлять на базе волнового алгоритма Ли [4]. Этот алгоритм представляет собой метод поиска путей на сетке, основанный на алгоритме поиска в ширину (BFS). С учетом характера BFS алгоритм Ли гарантирует получение результата с минимальной длиной пути от исходной точки до целевой. Идея алгоритма Ли заключается в моделировании волны из исходных узлов в целевые, которые соединяются впоследствии общим проводником.

Трассировку многоконтактной цепи предлагается осуществлять последовательно. Выбирается некоторый начальный контакт – он металлизировается. Далее осуществляется волновая трассировка от всех не металлизированных контактов до металла этой цепи – найденный фрагмент добавляется в трассу. Последний шаг продолжается до тех пор, пока все контакты цепи не будут соединены между собой, либо окажется, что их соединение невозможно.

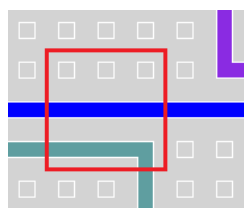
Классический волновой алгоритм предлагается расширить известной модификацией [6], которая учитывает веса ребер сетки трассировки, которые могут интерпретироваться как условные расстояния между соседними узлами. Ограничим использование виртуальных треков, для чего искусственно увеличим веса для виртуальных ребер сетки трассировки.

## Вытеснение трасс с виртуальных треков

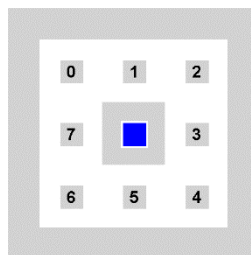
После успешной трассировки на сетке с виртуальными треками требуется вытеснить металл построенной трассы со всех виртуальных треков без нарушения целостности всех реализованных трасс. Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм.



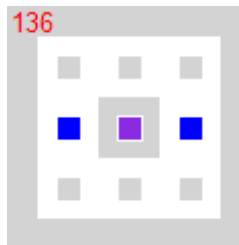
1. Для простоты рассмотрим частную задачу – требуется освободить от трассы заданный узел сетки трассировки (выделен красным).



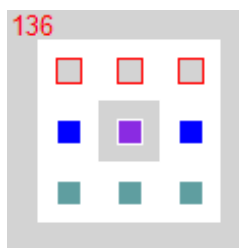
2. Рассмотрим область сетки трассировки размером 3x3 с центром в заданном узле сетки трассировки. Множество узлов сетки трассировки в рамках заданной области без центрального узла будем называть окрестностью заданного узла. Трассой окрестности будем называть множество узлов окрестности, по которым проходит трасса цепи, включающая центральный узел окрестности.



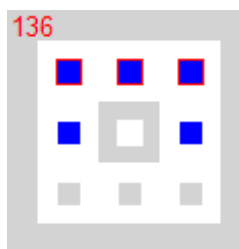
3. Пронумеруем все узлы окрестности так, как показано на рисунке – числами от 0 до 7.



4. Закодируем трассу окрестности 8-битным числом: в позициях, соответствующих трассе окрестности, находятся 1, в остальных позициях 0, тогда общее количество вариантов трасс равно  $2^8=256$ . Учитывая симметрию относительно поворота и относительно центра окрестности, а также еще некоторые особенности, число уникальных окрестностей будет относительно мало, чтобы для каждой можно было четко ответить, возможно ли освободить центр заданной окрестности, и если да, то каким образом. На рисунке трасса окрестности проходит через 3 и 7 узлы, тогда код трассы окрестности равен  $2^3+2^7=136$ .

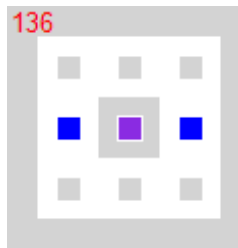


5. Рассмотрим узлы окрестности под номерами 0,1,2. Маркером окрестности будем называть 3-битное число: в  $i$ -ой позиции стоит 0, если в  $i$ -ом узле либо находится металл трассы окрестности, либо через этот узел не проходит ни одна трасса. На рисунке маркер окрестности равен 0.

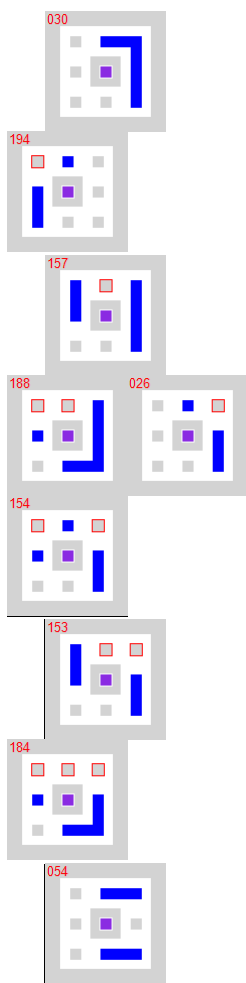


6. Наша цель – так скорректировать трассу, чтобы центральный узел был свободен от металла. В рамках окрестности заданного узла эта задача решается металлизацией узлов окрестности. При этом проходящая по окрестности трасса должна сохранить связность. Сузим задачу – позволим металлизировать только узлы под номерами 0,1,2. На рисунке металлизации подвергаются все узлы 0,1,2.





Классом окрестности будем называть 3-битовое число: в  $i$ -й позиции стоит 1, если в  $i$ -м узле нужно провести металл трассы окрестности для сохранения ее связности при удалении металла из центрального узла, 0 – если проводить металл нет необходимости. Для окрестности может существовать несколько вариантов металлизации. Таким образом, в общем случае она может входить в один или несколько классов. Окрестность на рисунке принадлежит классу  $2^0+2^1+2^2 = 7$ .



Общее число классов  $8 + 1$ . Каждый класс показывает, каким именно образом необходимо металлизировать окрестность для сохранения связности трассы. Последний (девятый) класс включает окрестности, для которых допустимого варианта металлизации не существует. Числа вида (код окрестности и номера её классов) будем называть шаблоном. Число уникальных шаблонов равно числу уникальных кодов окрестностей. В шаблоне код окрестности позволяет однозначно идентифицировать всевозможные варианты корректной металлизации окрестности. На рисунке примеры представителей всех классов.

Поворотом шаблона будем называть процедуру перенумерации узлов окрестности по циклическому сдвигу на число позиции 2, 4 или 6:  $01234567 \rightarrow 67012345 \rightarrow 45670123 \rightarrow 23456701$ .

Используя алгоритм решения частной задачи, решим общую. Каждый узел виртуального трека, по которому проходит металл, будем пытаться вытеснить на реальный трек. Если это возможно, то вытесняем, иначе добавляем в очередь узлов, требующих смещения, все мешающие для этого вытеснения узлы. Далее извлекаем из очереди очередной узел и для него вновь решаем задачу, пытаюсь сдвинуть его трассу в заданном направлении (поворот шаблона). Данный цикл выполняется до тех пор, пока очередь не пуста.

Данный алгоритм конечен, так как либо все металлизированные узлы виртуального трека окажутся освобождены, и задача решена, либо очередь узлов рано или поздно опустеет (ввиду конечности сетки трассировки).

## Реализация

Описанный выше алгоритм был реализован на языке C#. Создано приложение, главной задачей которого была апробация предложенной технологии топологической перетрассировки. Далее представлены скриншоты, демонстрирующие пример работы приложения.

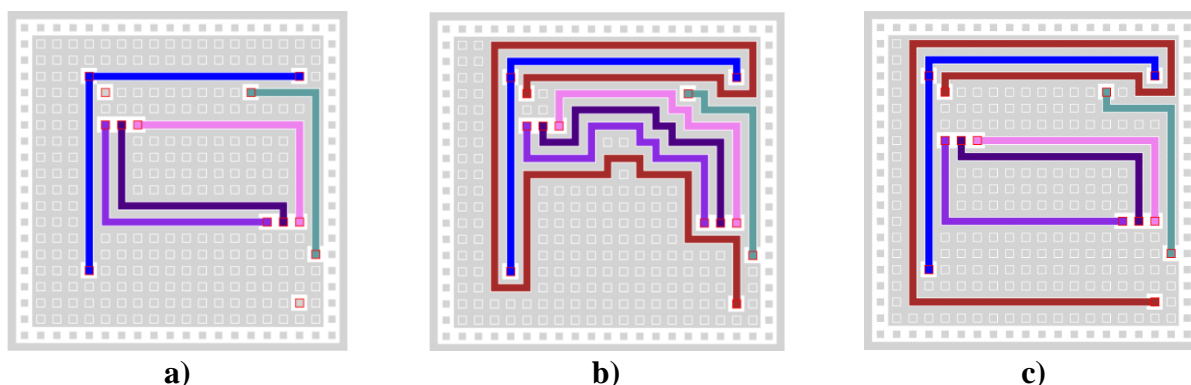


Рисунок 2. Демонстрация результатов работы топологической перетрассировки

На рисунке показаны типовой пример этапов работы алгоритма. На изображении (а) представлены исходные данные задачи. Заметим, что имеется нетрассированная цепь. Изображение (б) демонстрирует результат работы алгоритма, а именно, была реализована нетрассированная ранее цепь, при сохранении целостности изначально реализованных трасс. Не трудно заметить, что после работы алгоритма перетрассировки длины цепей увеличились. На изображении (с) показан результаты работы алгоритма оптимизации цепей, который реализуется классической циклической перетрассировкой.

Подводя итог, заметим, что экспериментальные исследования подтвердили предположения о том, что предложенная технология на основе виртуальных треков обеспечивает рациональное использование ресурсов коммутационного поля.

## Заключение

В работе рассмотрена проблема повышения качества трассировки цепей интегральных схем. Предложена технология перетрассировки цепей на основе виртуальных треков, которая демонстрирует эффективное использование ресурсов коммутационного поля. В качестве направления перспективного развития видится расширение технологии в контексте многослойной трассировки и апробация созданных решений в реальных задачах.

## Библиографический список

1. **К. Mikami, К. Tabuchi:** A computer program for optimal routing of printed circuit conductors, Proc. IFIP Congress 1968, pp. 1475–1478, 1968.
2. **D.W. Hightower:** A solution to line-routing problems on the continuous plane, Proc. 6th Annual Design Automation Conference (DAC '69), pp. 1–24, 1969.
3. **F.O. Hadlock:** A shortest path algorithm for grid graphs, Networks, Vol. 7, No. 4, pp. 323–334, 1977.
4. **C.Y. Lee:** An algorithm for path connections and its applications, IRE Transactions on Electronic Computers, Vol. EC–10, No. 3, pp. 346–365, 1961.

5. **Т. Нама, Н. Етох:** Topological routing path search algorithm with incremental routability test, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, pp. 142-150, Feb 1999

6. **Старостин, Н.В.** Использование гиперграфов для решения задачи ортогональной трассировки больших интегральных схем с нерегулярной структурой, Радиотехника и электроника: т. 53, № 5. / Н.В. Старостин, В.В. Балашов. – М: Наука, 2008. – С. 618-623.

**N.V.Starostin, M.M. Godovitsyn, A.S. Filatova**

**ALGORITHM FOR ROUTING CIRCUITS OF INTEGRAL SCHEMES  
BASED ON VIRTUAL TRACKS**

National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The article deals with the problem of tracing circuits of an integrated circuit. Re-routing technology based on the expansion of the commutational resources of the existing trace network by introducing special virtual tracks is proposed. The paper presents the algorithm for solving the problem that includes procedures for calculating traces on an extended trace grid and forcing out traces from virtual tracks to real.

**Keywords:** circuit routing, integrated circuit, virtual tracks.

Н.В. Старостин, Е.С. Сударский

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ТОЧНОГО АЛГОРИТМА СБАЛАНСИРОВАННОГО РАЗБИЕНИЯ ГРАФА

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Рассматривается проблема поиска точного решения задачи сбалансированного разбиения графа. Предлагается реализация метода ветвей и границ, в которой процедура ветвления сфокусирована на выделении такого подграфа, для которого эффективно строятся качественные оценки, тем самым обеспечивая сокращение вычислительных издержек на поиск точного решения задачи.

**Ключевые слова:** метод ветвей и границ, сбалансированное разбиения графа.

### Введение

Классическая задача сбалансированного дихотомического разбиения графа заключается в распределении вершин неориентированного графа без петель  $G(V, E)$  по двум подграфам, размеры которых отличаются друг от друга не более чем на 1. Решение задачи описывается бинарным вектором  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , где  $i$ -й компонент соответствует  $i$ -й вершине, а значение определяет подграф, в который распределяется вершина. На решение  $\bar{x}$  накладываются следующие ограничения

$$\frac{n}{2} - 1 \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq \frac{n}{2} + 1; \quad (1)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = \overline{1, n}.$$

Цель задачи заключается в минимизации сечения – множество ребер графа, концы которых принадлежат разным подграфам разбиения:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} |x_i - x_j| \xrightarrow{x \in \{0,1\}^n} \min. \quad (2)$$

Задача (1)-(2) принадлежит к классу NP-трудных [1] проблем. В терминах модели разбиения графа формируется множество значимых практических задач, решение которых в реальных условиях не представляется возможным точными алгоритмами в силу больших размеров разбиваемых графов. Так, например, в маршрутах конструкторского проектирования микроэлектронных изделий на этапе компоновки требуется распределить элементы интегральной схемы по отдельным кристаллам [2], при этом число элементов схемы измеряется десятками, сотнями миллионов. Эти обстоятельства оправдывают применение быстрых эвристических подходов, таких как разнообразные конструктивные схемы, основанные на поэтапном формировании подграфов разбиения [3, 4], итерационные алгоритмы Кернигана-Лина [5] и Фидуччия-Мэтьюза [6], основанные на улучшении решения путем перемещения вершин между двумя подграфами.

В последнее время особую практическую значимость приобрели многоуровневые методы [2, 7, 8], идея которых заключается в последовательной редукции больших задач к задачам приемлемых порядков, решение редуцированных задач и поэтапная реализация найденных

решений в терминах исходной задачи. При этом подходе наличие точных и при этом экономических алгоритмов для решения редуцированных задач становится центральной проблемой.

### Точная переборная схема с отсечением

Допустим имеется некоторая перестановка (нумерация)  $\bar{p} = (p_1, \dots, p_n)$  вершин исходного графа. Переборная схема состоит в построении двоичного дерева всевозможных решений исходной задачи в соответствии с порядком, заданном перестановкой  $\bar{p}$  –  $i$ -й уровень дерева решений, определяется вершиной  $p_i$ . При построении дерева в каждом узле на любом из уровней проверяется возможность получения допустимого решения и считается нижняя оценка формируемого решения.

Все узлы последнего уровня дерева решений, а также узлы, в которых идентифицируется ситуация отсутствия в поддереве (подпространстве) глобального оптимума, считаются терминальными – нижележащее поддерево решений отсекается от поиска.

Глобальный оптимум гарантированно отсутствует в поддеревьях с корнем в узле, для которого произошло нарушение ограничений (1). Также не имеет смысла искать глобальной оптимум в ветках, для которых нижние оценки решений оказались хуже, чем уже найденное рекордное значение.

В качестве нижней оценки для узла поддерева предлагается следующая процедура: 1) выделяется подграф, индуцированный подмножеством распределенных по подграфам вершин; 2) вычисляется размер сечения для выделенного подграфа; 3) к вычисленному значению прибавляется минимальное число дополнительных ребер, которые могут быть распределены как в один, так и в другой подграф без учета связей с еще не распределенными вершинами. Полученное таким образом значение принимается за нижнюю оценку для всего поддерева с корнем в текущем узле дерева решений.

### Технология расслоения уровней в схеме с отсечением

Как показывает практика, использование качественных нижних оценок в точных переборных схемах с отсечением позволяет значительно сократить перебор узлов в дереве решений [9]. Однако, как правило, качественные оценки требуют больших ресурсов на их вычисления, что в итоге сказывается на итоговых издержках работы всей переборной схемы.

Эффективные процедуры получения качественных оценок легче получить для частных случаев. Для каждой такой «дешевой» оценки требуется «быстрая» процедура проверки на соответствие частному случаю, в рамках которого оценка имеет смысл. В результате можно построить схему, при которой в каждом узле выполняется серия проверок на идентификацию частных случаев, с последующим вычислением оценки. Главным минусом такой технологии является лишние проверки, которые в итоге отразятся в ощутимых издержках общей переборной схемы.

Предлагается другой подход, который состоит в том, чтобы так перенумеровать вершины исходного графа, чтобы в процессе формирования дерева решений на каждом уровне с высокой вероятностью обеспечивалась ситуация получения того или иного частного случая задачи. Это позволит резко сократить число используемых оценок на уровнях и, как следствие, получить экономную в смысле вычислительных затрат точную схему решения задачи.

Рассмотрим случай нетерминального узла дерева решений – когда есть часть вершин уже распределенных по подграфам и есть часть нераспределенных вершин. Допустим подграф,

индуцированный нераспределённым множеством вершин пустой/полный. В этом случае можно предложить следующую процедуру вычисления точной оценки решения задачи для данного поддерева.

Допустим все неразбитые вершины образуют независимое множество мощности  $s$ .

На первом шаге необходимо посчитать разницу в количестве добавляемых внешних ребер при добавлении вершины в первый и второй подграф. На втором шаге необходимо отсортировать вершины по возрастанию посчитанного на первом шаге параметра. На третьем шаге считаем количество вершин  $k$ , которые можно добавить в первый подграф, добавляем первые  $k$  вершин в первый подграф, оставшиеся вершины добавляем во второй подграф.

Очевидно, что первый шаг выполним за время  $O(s)$ . Проведем сортировку алгоритмом пирамидальной сортировки, тогда для шага 2 необходимо  $O(s \log s)$  времени. Третий шаг, очевидно, требует  $O(s)$  времени. В итоге сложность алгоритма можно оценить как  $O(s \log s)$ . Временная сложность алгоритма квазилинейна.

Вычислительная сложность процедуры расчета оценки имеет квазилинейную сложность, тем чем раньше с точки зрения уровня встретиться подобная нетерминальная вершина, тем большее поддерево с экспоненциальным числом узлов можно отсечь.

Для обеспечения данной задачи требуется выделить в исходном графе максимальное независимое множество (или максимальный полный подграф).

Классическая задача о поиске максимального независимого множества заключается в выделении такого подмножества вершин неориентированного графа без петель  $G(V, E)$ , что между вершинами этого подмножества в исходном графе отсутствуют ребра. Решение задачи описывается бинарным вектором  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , где  $i$ -ый компонент соответствует  $i$ -ой вершине, а значение определяет, принадлежит ли вершина подмножеству. На решение  $\bar{x}$  накладываются следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j a_{ij} = 0; \quad (3)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = \overline{1, n}.$$

Цель задачи заключается в максимизации подмножества независимых вершин:

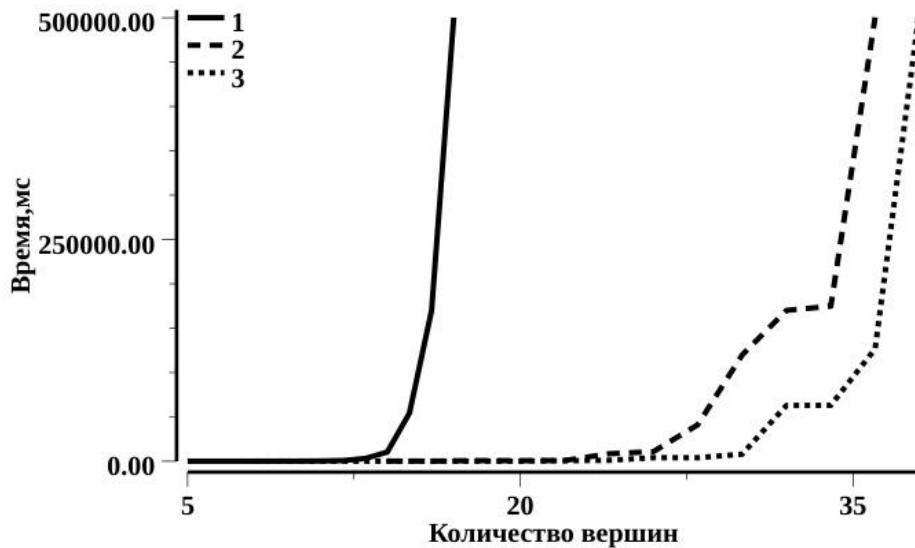
$$\sum_{i=1}^n x_i \xrightarrow{x \in \{0,1\}} \max_{\#} \quad (4)$$

Задача(3)-(4), также как и исходная задача (1)-(2), являются NP-трудной [1], в основу предлагаемых для её решения алгоритмов положим известную конструктивную схему, основанной на локально-оптимальной стратегии [6] формирования множества вершин с заданными свойствами. Первый предлагаемый алгоритм (случайный выбор) в случайном порядке последовательно выбирает и добавляет вершины (если это возможно) в формируемое независимое множество. Вторым алгоритм (жадный выбор) на каждом шаге выбирает вершину с наименьшим количеством смежных вершин, помещает её в независимое множество и затем удаляет её и все смежные с ней вершины из графа.

В результате технология решения задачи (1)-(2) выглядит следующим образом. На первом этапе решается задача (3)-(4) и как результат ее решения получается решение в виде подмножества вершин. На втором этапе формируется перестановка (нумерация)  $\bar{p}$  таким образом, что все вершины из выделенного подмножества попадают в самый конец перестановки. Тем самым полученная перестановка  $\bar{p}$  определит два слоя в дереве решений: первый слой, в узлах которого используется нижняя оценка для общего случая; второй слой – фактически отсекаемый слой, на котором сразу происходит вычисление точной оценки. На третьем этапе выполняется точная переборная схема с отсечением.

## Вычислительный эксперимент

Апробация описанных точных переборных схем проводилась на случайно сгенерированных графах. Алгоритм генерировал графы с заранее заданным числом вершин  $n$  и числом ребер  $m$ , при этом тестирование проводилось для многих значений  $m$  из интервала  $[0, \frac{n(n-1)}{2}]$ . Ограничений на степень вершины графа не накладывалось.



Графики вычислительных издержек (время) точных схем

Алгоритмы были реализованы на языке go lang [10] и тестировались на идентичной машине и при отсутствии фоновых задач в режиме отключенного сборщика мусора.

На графике (см. рис.) показана усредненная зависимость времени поиска оптимального решения от количества вершин в графе. Линия 1 (непрерывная) соответствует точной переборной схеме с отсечениями. Линия 2 (штрихи) соответствует технологии расслоения уровней в схеме с отсечениями, при формировании независимого множества на базе случайного выбора. Линия 3 (точки) соответствует технологии расслоения уровней в схеме с отсечениями, при формировании независимого множества жадным способом. Из рисунка видно, что технология расслоения уровней в схеме с отсечениями, вне зависимости от метода формирования независимого множества, показывает значительный выигрыш по времени в сравнении с классической переборной схемой с отсечениями.

## Заключение

Рассмотрена проблема повышения эффективности поиска точного решения задачи сбалансированного дихотомического разбиения графа. Предложенная технология расслоения уровней в переборной схеме на дереве решений с отсечением вариантов обеспечила очевидное сокращение издержек при поиске оптимальных 2-разбиений на классе случайно сгенерированных графов. В качестве направления дальнейшего развития видится развитие технологии расслоения в рамках поиска новых качественных оценок и перехода к многослойной (больше 2) вариантам реализации алгоритма.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-00656.*

## Библиографический список

7. **Гэри, М.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон . -М.: Мир, 1982
8. **Батищев, Д.И.** Многоуровневый генетический алгоритм решения задачи декомпозиции гиперграфа / Д.И. Батищев, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2007. № 1. С. 3-13.
9. **Батищев, Д.И.** Способы повышения эффективности генетического поиска оптимального k-разбиения графа / Д.И. Батищев, Н.В. Старостин // Межвузовский сборник н. трудов “Прикладные задачи моделирования и оптимизации”, Воронеж, 2000 г., Часть 2, стр. 4-17.
10. **Schloegel, K., Karypis, G., Kumar, V.** (2000). Graph Partitioning for High Performance Scientific Simulations.
11. **Kernighan, B. W.; Lin, Shen** (1970). "An efficient heuristic procedure for partitioning graphs". Bell System Technical Journal. 49: 291–307.
12. **Fiduccia С.М., Mattheyses R.М.** A linear-time heuristic for improving network partitions // Proc. of 19th IEEE Design Automation Conference. Piscataway: IEEE Press, 1982. 175–181.
13. **Батищев, Д.И.** Многоуровневый алгоритм решения задачи компоновки интегральных схем / Д.И. Батищев, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 3 (29). С. 48-52.
14. **Старостин, Н.В.** Разработка и исследование гибридных методов решения задач проектирования систем и устройств информатики, моделируемых графовыми моделями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2001.
15. **Старостин, Н.В.** Архитектурно-зависимая декомпозиция в методиках суперкомпьютерного моделирования. Вычислительные технологии в естественных науках / Н.В. Старостин, М.А. Панкратова // Механика, управление и информатика, т.6, №6. – М: Институт космических исследований РАН, 2014. – С. 146-153.
16. The Go Programming Language Specification. – <http://www.iso.org/> (accessed February, 2020).

**N.V. Starostin, E.S. Sudarskii**

### **DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF EXACT ALGORITHMS FOR BALANCED GRAPH PARTITIONING**

Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod

The problem of searching exact solution of balanced graph partitioning is considered. implementation of branch and bound method, where branching procedure is focused on highlighting such subgraph for which highquality estimation are built, is proposed, thus providing reductions computational overhead for searching exact solution.

**Keywords:** branch and bound method, balanced graph partitioning.



## ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТАДИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СОВОКУПНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОГО ТИПА

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"  
г. Нижний Новгород

Формулируется математическая модель двухстадийного обслуживания  $n$ -элементной совокупности объектов. На первой стадии каждый объект подлежит обслуживанию стационарным процессором-источником, по завершению которого он адресуется для реализации второй стадии обслуживания к тому или иному доступному стационарному процессору-потребителю из  $n$ -элементной пространственно рассредоточенной совокупности. С каждым процессором-потребителем ассоциируется линейная функция штрафа. Модель описывает, в частности, состояние производственно-транспортного комплекса на момент принятия решений при планировании использования группы судов для перевозки в заданные пункты нерудных строительных материалов, добываемых на русловом месторождении гидромеханизированным способом. В рамках построенной модели ставится оптимизационная задача синтеза стратегии обслуживания и описывается подход к её синтезу. Приводится пример численной реализации.

**Ключевые слова:** двухстадийное обслуживание, дискретная оптимизация, задача диспетчеризации.

1. Исследуется проблема оптимизации распределения между процессорами (исполнителями) формируемых пар невзаимозаменяемых работ. В качестве примера укажем производственный комплекс, в котором фиксированная по составу группа разнотипных грузовых речных судов (многосекционных составов) [1] выделена для транспортировки в известные пункты складирования (потребления) песчано-гравийной смеси (ПГС), загружаемой плавучим добычным снарядом (ЗС) [2] на русловом полигоне.

В процессе очередного сеанса суточного планирования работы флота должно быть определено:

- в каком порядке следует подавать к ЗС поступившие под погрузку ПГС суда группы,
- в какой пункт складирования следует направить каждое конкретное судно после его загрузки ПГС с целью минимизации суммарных издержек по всем судам группы.

Для регулярного формирования оперативных планов рассматриваемого типа с учетом складывающейся эксплуатационной обстановки актуальной является задача создания специализированной цифровой платформы поддержки организационного управления, включающей в себя:

- модуль моделирования технологического процесса,
- алгоритм решения соответствующим образом поставленной экстремальной задачи синтеза расписания подачи судов под погрузку ПГС и последующего их распределения по пунктам складирования.

2. С целью формализации описанной в п. 1 производственной цепочки введем в рассмотрение  $n$ -элементную совокупность  $O_n$  объектов  $o_1, o_2, \dots, o_n$ , обозначаемых в случаях, когда

это целесообразно, как  $1, 2, \dots, n$ ). Каждый объект подлежит однократному без прерываний одностадийному обслуживанию (загрузкой) стационарным процессором-источником  $H$  (ЗС).

К моменту начала обслуживания процессор  $H$  и все объекты совокупности  $O_n$  находятся в состоянии готовности. В каждый момент времени процессор может обслуживать только один объект и его непроизводительные простои запрещены; необходимости в переналадках процессора  $H$  нет. Необслуженный объект не может покинуть очередь. Для каждого объекта  $o_i, i = \overline{1, n}$  известна величина  $\tau(i)$  продолжительности его обслуживания.

Объекты, прошедшие обслуживание, далее направляются к существенно удаленным от процессора  $H$  процессорам-потребителям (далее потребителям), составляющим совокупность  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ . К каждому потребителю должен быть направлен только один объект; каждому объекту должен быть назначен только один потребитель. Считается известной  $(n \times n)$ -матрица  $E = \{e_{ij}\}$ , в которой элемент  $e_{ij} = 1$ , если объектом  $o_i$  технически может быть обслужен потребителем  $p_j$ , в противном случае  $e_{ij} = 0$  ( $i \in [1, 2, \dots, n], j \in [1, 2, \dots, n]$ ).

Полагается, что матрица  $E$  такова, что определяемая ею каноническая задача о назначениях имеет полные решения, т.е. каждому потребителю можно взаимно однозначно предписать объект, который может быть им обслужен. Для каждого потребителя  $p_j, j = \overline{1, n}$  известна линейная функция индивидуального штрафа  $\psi_j(t) = a_j t$  за обслуживание продолжительностью  $t$ .

Полагаются известными  $(n \times n)$ -матрицы  $V = \{v_{ij}\}$  и  $W = \{w_{ij}\}$ , где  $v_{ij}$  – длительность перемещения объекта  $o_i$  от точки нахождения процессора  $H$  до места расположения потребителя  $p_j$ , а  $w_{ij}$  – продолжительность обслуживания объектом  $o_i$  процессором-потребителем  $p_j$ ; в случае  $e_{ij} = 0$  полагается, что  $v_{ij} = w_{ij} = \infty$  ( $i \in [1, 2, \dots, n], j \in [1, 2, \dots, n]$ ).

Время в рассматриваемой модели считается дискретным, измеряется в тактах. Все её числовые характеристики считаются принимающими только целочисленные значения.

Стратегию обслуживания объектов совокупности  $O_n$  определим как кортеж  $S = \{[q(k), r(k)], k = \overline{1, n}\}$ , где  $q(k)$  – индекс объекта, обслуживаемого процессором  $H$   $k$ -м по очереди,  $r(k)$  – индекс процессора-потребителя, которому данный объект назначен для обслуживания; при этом выполняется условие  $e_{q(k), r(k)} = 1, k = \overline{1, n}$ .

Реализации стратегий  $S$  считаем компактными [3]. В таком случае с каждой из них ассоциируется:

- величина суммарного штрафа по всем потребителям  $\sum_1^n \psi_j(t^*(S, j))$ ,
- арифметически определяется обозначаемый через  $t^*(S, j)$  момент завершения обслуживания каждого потребителя  $p_j, j = \overline{1, n}$ .

Возникающая оптимизационная задача записывается в виде

$$\min_S \sum_1^n \psi_j(t^*(S, j)). \quad (1)$$

3. При любой стратегии  $S$  штраф по каждому процессору-потребителю  $p_j$  можно разбить на две компоненты:

- штраф  $\alpha_1(i, j)$  за период от начального момента времени ( $t = 0$ ) до момента завершения обслуживания процессором  $H$  направляемого в адрес этого потребителя объектом  $o_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ ;
- штраф  $\alpha_2(i, j)$  за период от момента завершения обслуживания данного объекта процессором  $H$  до момента завершения его обслуживания процессором-потребителем  $p_j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ .

Суммы первых и вторых компонент штрафов по всем потребителям  $p_j, j = \overline{1, n}$  обозначим соответственно  $\Omega$  и  $\theta$ .

Принципиально важным является следующее обстоятельство: каждая из величин  $\alpha_2(i, j)$  не зависит от момента завершения обслуживания процессором **H** направляемого к процессору-потребителю  $p_j$  объекта  $o_i$ , т.е.  $\alpha_2(i, j) = a_j \sigma_{ij}$ , где  $\sigma_{ij} = (v_{ij} + w_{ij})$ .

Закрепление объектов  $o_1, o_2, \dots, o_n$  совокупности  $O_n$  за потребителями  $p_1, p_2, \dots, p_n$  совокупности **P** определяется взаимно однозначным отображением  $\pi$  множества  $\{1, 2, \dots, n\}$  в себя [1]: объект  $o_i$  направляется в адрес потребителя  $p_{\pi(i)}$ , и значение суммы  $\theta$  является функцией от  $\pi$ , т.е.  $\theta = \sum_1^n \alpha_2(i, \pi(i))$ . Возникающая задача синтеза отображения  $\pi$ , соответствующего задаче минимизации

$$\min \theta(\pi), \quad (2)$$

является определяемой  $(n \times n)$ -матрицей  $\mathbf{Z} = \{z_{ij}\}$  канонической задачей о назначениях с аддитивным минимизируемым критерием, в которой  $z_{ij} = a_j(v_{ij} + w_{ij})$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Известный алгоритм решения этой задачи имеет не более чем кубично зависящую от  $n$  оценку вычислительной сложности.

Как очевидно, только оптимальное решение  $\pi^*$  задачи (2) обеспечивает оптимальное распределение объектов  $o_1, o_2, \dots, o_n$  совокупности  $O_n$  по потребителями  $p_1, p_2, \dots, p_n$  совокупности **P** и определяет таким образом следующую подлежащую решению задачу минимизации величины суммы  $\Omega$ .

Алгоритм решения этой задачи [4-6], традиционно именуемой задачей мастера, представляет собой процедуру упорядочения последовательности объектов  $o_1, o_2, \dots, o_n$  совокупности  $O_n$  по убыванию отношений  $a_{\pi(i)} / \tau(i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Если обозначить через  $o_{i_1}, o_{i_2}, \dots, o_{i_n}$  найденную таким образом последовательность обслуживания процессором **H** объектов совокупности  $O_n$ , то оптимальную в задаче (1) стратегию  $S^*$  представляет кортеж  $\{[i_k, \pi^*(i_k)], k = \overline{1, n}\}$ .

4. В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим модель производственно-транспортной системы, включающей в себя два объекта  $o_1, o_2$  и два процессора-потребителя  $p_1, p_2$  с числовыми характеристиками вида

$$\tau(1) = 15, \tau(2) = 16, a_1 = 3, a_2 = 2$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 4 & 9 \\ 10 & 20 \end{pmatrix}, \mathbf{W} = \begin{pmatrix} 6 & 6 \\ 5 & 10 \end{pmatrix}.$$

Арифметически получаем  $\sigma_{11} = 10$ ,  $\sigma_{12} = 15$ ,  $\sigma_{21} = 5$ ,  $\sigma_{22} = 30$  и, соответственно, матрица второго порядка канонической задачей о назначениях с аддитивным минимизируемым критерием имеет вид

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 3 \times 10 & 2 \times 15 \\ 3 \times 15 & 2 \times 30 \end{pmatrix}.$$

Оптимальным в этом примере является назначение  $\pi^*$ , закрепляющее за объектом  $o_1$ , потребителя  $p_2$ , а за объектом  $o_2$  – потребителя  $p_1$ . Такое закрепление даёт равное 75 значение второй компоненты суммарного штрафа  $\theta$ . В возникающей задаче мастера  $a_{\pi(1)} / \tau(1) = 2/15$  и  $a_{\pi(2)} / \tau(2) = 3/16$ .

Поскольку вторая дробь больше первой, то первым на процессоре **H** должен обслуживаться объект  $o_2$ , а вторым – объект  $o_1$ , и минимальное значение первой компоненты суммарного штрафа  $\Omega$  оказывается равным 78.

В итоге получаем, что оптимальной оказывается следующая стратегия двухстадийного обслуживания рассматриваемой совокупности  $O_2$ .

Первым процессором **H** обслуживается объект  $o_2$ , и затем он направляется к потребителю  $p_1$

Вторым процессором  $H$  обслуживается объект  $o_1$  и затем он направляется к потребителю  $p_2$ .

Оптимальное значение критерия в задаче (1) в рассмотренном примере получаем как сумму  $75+78 = 153$ .

5. В развитие рассмотренной модели теории расписаний [7] практический интерес представляют такие задачи маршрутизации перевозок [8], как двухстадийное обслуживание конечного детерминированного потока объектов, а также совокупности и потока пакетов объектов [9, 10], в том числе с учетом директивных сроков и накопленных за предшествующий период индивидуальных издержек.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

### **Библиографический список**

1. Справочник по серийным транспортным судам. Т. 4. М.: Транспорт, 1975. 179 с.
2. **Бессонов, Е.А.** Энциклопедия гидромеханизированных работ / Е.А. Бессонов. - М.: 1989. ру, 2005. 520 с.
3. **Коган, Д. И.** Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко // Дискретная математика. 1996. Т. 8. №3. С. 135-147.
4. **Конвей, Р.В.,** Теория расписаний / Р.В. Конвей. - М.: Наука, 1975. 360 с.
5. **Танаев, В.С.** Теория расписаний. Одностадийные системы / В.С. Танаев. - М.: Наука, 1984. 382 с.
6. **Савин, В.И.** Определение оптимальной очередности обработки судов / В.И. Савин. - Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1965. 30 с.
7. **Танаев, В.С.** Теория расписаний. Многостадийные системы / В.С. Танаев. - М.: Наука, 1989. 328 с.
8. **Зак, Ю.А.** Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок / Ю.А. Зак. - М.: Книжный дом «Либроком», 2012. 394 с.
9. **Коган, Д.И.** Оптимизационные задачи однопроцессорного обслуживания объектов, образующих составы / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко // VIII Московская международная конференция (ORM 2016), Труды, том 2. Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН. С. 246 -247.
10. **Коган, Д.И.** Модели и оптимизационные задачи однопроцессорного обслуживания пакетов объектов / Д.И. Коган [и др. ] // Автоматика и телемеханика. 2016. №11.С. 142-157.

**K.S. Ulyanov, Yu.S. Fedosenko**

### **TWO-STAGE SERVICE OPTIMIZATION MODEL FOR SET OF OBJECTS OF TRANSPORT TYPE**

Volga state university of watertransport, NizhnyNovgorod

A mathematical model of two-stage service of an n-element set of objects is formulated. At the first stage, each object is to be serviced by a stationary processor-source. After that it is dispatched

to one of available stationary processors-consumers from an n-element spatially dispersed complex for the implementation of the second stage. A linear penalty function is associated with each processor-consumer. The model describes, in particular, the state of the production-transport complex at the decision-making moment during planning the usage of a vessel group for transportation to specified destinations of non-metallic building materials mined in the riverbed by hydromechanical method. Within the framework of the constructed model, the optimization problem of synthesizing a service strategy is posed and an approach to its synthesis is described. An example of numerical implementation is given.

**Keywords:** two-stage service, discrete optimization, scheduling task

А.А. Вавилов<sup>1</sup>, Ю.С. Федосенко<sup>1</sup>, В.П. Хранилов<sup>2</sup>

## О ЗАДАЧЕ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ОДНОПРОЦЕССОРНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МНОЖЕСТВА НЕЗАВИСИМЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ МЯГКИХ ДИРЕКТИВНЫХ СРОКОВ

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

В рамках направления математической теории управления ресурсами создается новая математическая модель однопроцессорного обслуживания конечного множества независимых объектов при наличии мягких директивных сроков; по каждому объекту известны длительность обслуживания и значение линейной функции штрафа за единицу времени пребывания в системе. План обслуживания всех объектов считается согласованным, если соответствующая ему максимальная из парных разностей функций штрафа, на множестве всех объектов не превышает заданного значения. На основе схемы метода ветвей и границ конструируется решающий алгоритм, приводится численный пример его реализации и экспериментально полученная оценка эффективности при значениях параметров модели обслуживания, соответствующих типовым нормативам и эксплуатационным ситуациям грузовой обработки судов на внутреннем водном транспорте.

**Ключевые слова:** согласование плана обслуживания, совокупность независимых объектов, метод ветвей и границ, директивный срок.

1. Рассматриваемая задача возникла в связи с потребностью совершенствования технологий управления речными перевозками в период массового вывоза зерновых грузов зарубежным потребителям.

В пункте погрузки прибывшие порожнем суда в определенной очередности подаются к специализированному терминалу, техническими средствами которого зерно из накопителей (приречных зерновой элеваторов [1]) загружается в трюмы для последующей транспортировки в тот или иной морской порт для перевалки в крупнотоннажные суда, выполняющие экспортные перевозки.

В описанной технологической схеме задействованы суда, каждое из которых характеризуется индивидуальными технико-экономическими параметрами и, что принципиально важно, организационно закреплено в той или иной форме за своим агентом – лицом принимающим решения. Взаимоотношения между агентами в процессе транспортно-технологической деятельности осуществляется в рамках устава объединяющей их ассоциации. В частности, предполагается, что при разработке плана (расписания) погрузки поступивших порожних судов какие-либо иные привилегии в обслуживании того или иного судна, кроме потенциальных и ранее накопленных экономических потерь не учитываются. Таким образом, к моменту начала подачи порожних судов под погрузку между агентами с учетом отмеченного выше обстоятельства должно быть достигнуто соглашение о персональной структуре расписания (плана) и порядке реализации очереди к

специализированному терминалу. В отличие от хорошо известного случая директивного планирования подачи судов под погрузку [2] в рассматриваемом случае задача диспетчеризации обслуживания сводится к выработке расписания, взаимосогласованного всеми агентами в рамках соответствующих положений устава их объединяющей ассоциации. Понятно, что такие ограничительные положения могут учитывать те или иные особенности реализации транспортно-технологических процессов в специфических условиях речного бассейна, парка доступных судов и соответственно влияют на выбор подхода к оптимизации и критериев оценки согласованности, в том числе, среди описанных в литературе [3-5].

Используемый ниже подход к синтезу взаимосогласованного плана подачи судов под погрузку основан на концепции справедливого распределения экономических потерь, формализация которого наряду с описанием математической модели проводится в п. 2.

2. Имеется конечная совокупность  $O_n$  независимых объектов  $o_1, o_2, \dots, o_n$  подлежащих однофазному обслуживанию стационарным процессором  $\Pi$  [6].

Для каждого объекта  $o_i, i = \overline{1, n}$  определены целочисленные параметры:

$\tau_i$  – норма длительности обслуживания,

$a_i$  – штраф за единицу времени пребывания в системе обслуживания,

$t_i^d$  – мягкий директивный срок завершения обслуживания,

$b_i$  – штраф за единицу времени превышения директивного срока,

$\lambda_i$  – суммарный штраф, накопленный в результате реализации предыдущих сеансов согласования планов обслуживания.

Считается, что к моменту  $t = 0$  все объекты совокупности  $O_n$  находятся с состоянием готовности к началу реализации стратегии обслуживания.

Обслуживание каждого объекта осуществляется без прерываний; в каждый момент времени процессор может обслуживать не более одного объекта; по завершению обслуживания объект немедленно освобождает процессор  $\Pi$ ; немотивированные простои объектов и процессора запрещены.

Расписание обслуживания совокупности  $O_n$  определяем как перестановку  $\rho = \{i(1), i(2), \dots, i(n)\}$  совокупности индексов  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ; при его реализации объект  $o_{i(k)}$  обслуживается в очередь  $i(k)$ . Каждое допустимое расписание  $\rho = \{i(1), i(2), \dots, i(n)\}$  однозначно определяет для объекта  $o_{i(k)}, k = \overline{1, n}$  моменты начала и завершения его обслуживания, которые далее будут обозначаться  $t_{beg}(i(k), \rho)$  и  $t^*(i(k), \rho)$  соответственно. Указанные моменты последовательно, в порядке возрастания значений параметра  $k$  вычисляются по формулам

$$t_{beg}(i(1), \rho) = 0, \quad t^*(i(k), \rho) = t_{beg}(i(k), \rho) + \tau_{i(k)}, \quad t_{beg}(i(k+1), \rho) = t^*(i(k), \rho); \quad k = \overline{1, n-1}.$$

Соответственно, длительность пребывания объекта  $o_{i(k)}, k = \overline{1, n}$  в системе обслуживания определяется величиной  $t^*(i(k), \rho)$ .

Для объекта  $o_{i(k)}, k = \overline{1, n}$ , обслуживаемого по расписанию  $\rho$ , значение функции штрафа при  $t^*(i(k), \rho) > t^d(i(k), \rho)$  определяется по соотношению

$A_{(i(k),\rho)} = C_{(i(k),\rho)} + b_{i(k)}(t^*(i(k),\rho) - t^d(i(k),\rho))$  , где  $C_{(i(k),\rho)} = a_{i(k),\rho} t^*(i(k),\rho) + \lambda_i$  , и  $A_{i(k),\rho)} = C_{i(k),\rho}$  – в противном случае.

Каждое расписание  $\rho$  характеризуется набором значений парных разностей функций штрафов

$$|A_{(i(k),\rho)} - A_{(j(k),\rho)}|, i(k), j(k) = \overline{1, n}, i(k) \neq j(k). \quad (1)$$

Согласованным считается такой план обслуживания  $\rho^*$  , при котором максимальное значение среди парных разностей (1) по всем объектам совокупности  $O_n$  не превышает заданной величины  $\delta$  , т.е.

$$K(\rho^*) \leq \delta. \quad (2)$$

Очевидно, что условию согласования (2) может отвечать несколько планов обслуживания или таковой план отсутствует вовсе; в этом случае в качестве продолжения возникает задача нахождения минимального значения параметра  $\delta$  , при котором неравенство (2) выполняется.

3. Конструируемый общий решающий алгоритм задачи (2) основан на методе ветвей и границ [7]. Процесс решения задачи при таком подходе представляется как фрагмент построения дерева вариантов для поиска согласованного плана обслуживания. Начальная вершина дерева вариантов определяется исходными данными. Путь от корня до любой вершины дерева определяет начальную часть плана обслуживания. Следуя [8], паспорт вершины  $\psi$  дерева вариантов именуем кортеж  $\langle R, L, \rho, K(\rho), \delta, \omega \rangle$  , в качестве компонент которого используются соответственно порядковый номер вершины  $R$  , уровень дерева поиска  $L$  и  $\omega$  бинарный признак ветвления:  $\omega = 1$  , если ветвление в вершине выполнено и  $\omega = 0$  в противном случае, т.е. вершина является открытой.

Схема пошаговой реализации общего решающего алгоритма представляется в виде следующей последовательности процедур:

*Шаг 1.* Инициализация значений характеристик объектов  $o_i$  ,  $i = \overline{1, n}$  и параметров алгоритма  $\delta, r, \varepsilon$  .

*Шаг 2.* Синтез плана обслуживания методом ветвей и границ.

*Шаг 2.1.* Инициализация корня дерева вариантов с порядковым номером вершины  $R = 1$  и уровнем  $L = 0$  .

*Шаг 2.2.* Выполнение ветвления на уровень  $L + 1$  к вершине  $R + 1$  .

*Шаг 2.3.* Если  $L = n$  , переход к шагу 3 , иначе переход к шагу 2.4.

*Шаг 2.4.* Если  $K(\rho) \leq \delta$  , переход к шагу 2.2 , иначе возврат на уровень  $L - 1$  .

*Шаг 3.* Если план обслуживания найден, переход к шагу 5 , иначе переход к шагу 4.

*Шаг 4.* Методом дихотомии продолжить синтез плана обслуживания.

*Шаг 4.1.*  $\delta = \delta + r$  .

*Шаг 4.2.* Поиск согласованного плана обслуживания методом ветвей и границ.

*Шаг 4.3.* Если согласованный план обслуживания найден, переход к шагу 4.4 , иначе переход к шагу 4.1.

*Шаг 4.4.* Если  $r \leq \varepsilon$  , согласованный план обслуживания найден, переход к шагу 5 , иначе переход к шагу 4.5.

*Шаг 4.5.*  $r = [r / 2]$  .

*Шаг 4.6.*  $\delta = \delta - r$  и переход к шагу 4.2.

*Шаг 5.* Завершение работы алгоритма.



4. Пример результата выполнения решающего алгоритма с численными данными из табл. 1 при  $\delta = 30$ ,  $r = 2$ ,  $\varepsilon = 1$ :  $\rho^* = \{O_2, O_3, O_1, O_4\}$ .

Таблица 1

$\tau_i$	$t_i^d$	$a_i$	$b_i$	$\lambda_i$
3	8	3	3	7
4	5	8	4	12
2	6	5	2	6
1	10	1	1	2

5. Экспериментальная оценка вычислительной сложности предложенного алгоритма проводилась с целью анализа зависимости среднего времени  $t_{cp}$  его отработки от размерности совокупности  $O_n$ ; при этом соблюдались одинаковые условия выполнения вычислений:  $\delta = 20$ ,  $r = 50$ ,  $\varepsilon = 1$ . Для каждого значения  $n$  было проведено по 100 полных вычислительных серий, в каждой из которых с равной степенью вероятности для каждого объекта  $o_{i(k)}$ ,  $k = \overline{1, n}$  в интервале  $[0, 15]$  задавалось соответствующее значение  $\lambda_{i(k)}$ ,  $k = \overline{1, n}$ . Результаты вычислительных экспериментов представлены в табл. 2, из которых следует вывод о том, что предложенный алгоритм имеет экспоненциально зависящую вычислительную сложность.

В известных эксплуатационных ситуациях на внутреннем водном транспорте размерность  $n$  не превышала 12 единиц, что свидетельствует о практической значимости разработанного алгоритма для решения рассмотренной задачи синтеза расписаний при наличии мягких директивных сроков в реальных условиях оперативного планирования подачи судов под погрузку.

Таблица 2

$n$	6	7	9	9	10	11	12	13	14	15
$t_{cp}$ , сек	0,001	0,003	0,021	0,11	0,619	2,380	29,370	209,340	1453,660	16351,083

В развитие рассмотренной модели, а также алгоритмов синтеза согласованных планов обслуживания при существенно более высоких значениях размерностей  $n$  представляет интерес разработка общего решающего алгоритма на основе метаэвристических концепций [9], а также построение и исследование адекватных эксплуатационным ситуациям различных модификаций рассмотренной модели. К таким, например, относятся совокупности пакетов объектов [10, 11].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

### Библиографический список

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
2. **Савин, В.И.** Определение оптимальной очередности обработки судов / В.И. Савин. - Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1965. 30 с.
3. **Коновальчук, Е.В.** Модели и методы оперативного управления проектами / Е.В. Коновальчук, Д.А. Новиков. - М.: ИПУ РАН, 2004. 63 с.

4. Эрроу, К. Дж. Коллективный выбор и индивидуальные ценности / К.Дж. Эрроу. - М., 2004. С. 15.
5. Юдин, Д.В. Выбор и компромисс // Известия академии наук. Теории и системы управления. 2004. № 3. С. 113–119.
6. Коган, Д. И. Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко // Дискретная математика. 1996. Т. 8. №3. С. 135-147.
7. Сигал, И.Х. Введение в прикладное дискретное программирование / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. - М.: Наука, 2007. 237 с.
8. Коган, Д.И. Общая схема реализации алгоритмов динамического программирования в задачах синтеза стратегий обслуживания объектов, поступающих пакетами / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко // Сборник научных трудов: материалы Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Вып. 2 (XXII). М.: МИРЭА, 2016. С. 154-157.
9. Щербина, О.А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации (обзор) // Таврический вестник информатики и математики». 2014. №1 (24). С. 56-72.
10. Коган, Д.И. Однопроцессорное обслуживание потока пакетов объектов: модели и синтез оптимальных стратегий / Д.И. Коган, М.А. Трухина, Ю.С. Федосенко // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. II. №3. С. 108-117.
11. Коган, Д. И. Модели и оптимизационные задачи однопроцессорного обслуживания пакетов объектов / Д.И. Коган, М.А. Трухина, Ю.С. Федосенко // Автоматика и телемеханика. 2016. № 11. С. 142–157.

А.А. Vavilov<sup>1</sup>, Yu.S. Fedosenko<sup>1</sup>, V.P.Khranilov<sup>2</sup>

## ON THE PROBLEM OF DISPATCHING OF ONE-PROCESSOR SERVICE OF A MULTIPLE INDEPENDENT OBJECTS IN THE PRESENCE OF SOFT DEADLINES

<sup>1</sup>Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The article presents a mathematical model of one-processor service of a finite set of independent objects in the presence of soft deadlines; the duration of the service and the value of the linear penalty function per unit time spent in the system are known for each object. The service plan for all objects is considered consistent if the corresponding maximum of the pair differences of the penalty functions on the set of all objects does not exceed a given value. The decisive algorithm is constructed on the basis of the branch-and-bound method, a numerical example of its implementation and an experimentally obtained efficiency estimate are given for the values of the service model parameters that correspond to standard standards and operational situations of cargo handling of ships in inland water transport.

**Keywords:** approving the service plan, multiple independent objects, method of branches and borders, deadline.

Ю.С. Федосенко, Д.К. Хандурин

## РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА РЕШЕНИЙ МИНИМАКСНОЙ ЗАДАЧИ О БИНАЗНАЧЕНИЯХ

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород

Описываются решающие алгоритмы для задачи о биназначениях. Приводятся результаты их реализации и оценки длительности выполнения при размерностях задачи, типовых для воднотраспортной логистики.

**Ключевые слова:** задача о биназначениях, динамическое программирование, схема ветвей и границ, воднотранспортная логистика.

1. Заданы два  $n$ -элементных множества работ  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  и  $n$ -элементное множество исполнителей  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ , каждый из которых должен выполнить одну работу множества  $P$  и одну работу из множества  $Q$ . Известны  $(n \times n)$ -матрицы оценок  $A = \{a_{ij}\}$  и  $B = \{b_{ij}\}$  выполнения исполнителем  $i$  работ  $p_j$  и  $q_j$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, n}$  соответственно.

Каждое назначение  $\pi_p, \pi_q$  исполнителей на работы из множеств  $P$  и  $Q$  представляет собой взаимно однозначное отображение в себя множества  $\{1, 2, \dots, n\}$ . Если  $\pi_p(i) = j$ , то на работу  $p_j$  следует назначать исполнителя  $i$ . Равенство  $\pi_q(i) = j$  означает, что работу  $q_j$  должен выполнить тот же самый исполнитель  $i$ .

При реализации биназначения  $\langle \pi_p(i), \pi_q(i) \rangle$  исполнитель  $i$ ,  $i = \overline{1, n}$  последовательно выполняет сначала работу с номером  $\pi_p(i)$  и затем приступает к выполнению работы с номером  $\pi_q(i)$ . Неоправданные перерывы при выполнении этой последовательности работ запрещены.

Задача о биназначениях с минимаксным критерием записывается в виде [1]

$$\min_{\pi_p, \pi_q} (\max_{\alpha} [a_{\alpha \pi_p(\alpha)} + b_{\alpha \pi_q(\alpha)}]). \quad (1)$$

Если матрицами оценок  $A$  и  $B$  установлены стоимости выполнения работ исполнителями, то в результате решения задачи (1), будет найдено биназначение, которое обеспечивает минимальную стоимость выполнения общей совокупности работ  $\{p_1, p_2, \dots, p_n, q_1, q_2, \dots, q_n\}$ .

Синтез точного решения задачи (1) можно реализовать рассматриваемыми ниже в п. 2 и в п. 3 алгоритмами, сконструированными на основе концепций соответственно динамического программирования [2] и ветвей и границ [3].

2. Переходя к построению алгоритма динамического программирования, введем в рассмотрение  $W_1, W_2$  – произвольные  $i$ -элементные подмножества из  $\{1, 2, \dots, n\}$ , а через  $Z(i, W_1, W_2)$  обозначим подзадачу (1), в которой между исполнителями множества  $\{1, 2, \dots, i\}$  следует распределить работы с номерами из  $W_1$  и  $W_2$ ; при этом каждый исполнитель должен выполнить работу из множества  $P$  с номером, входящим в подмножество  $W_1$ , и затем выполнить работу из множества  $Q$  с номером, входящим в подмножество  $W_2$ . Определяемый подмножествами  $W_1, W_2$  комплекс работ следует выполнить с минимальной суммарной стоимостью.

Оптимальное значение критерия  $D(i, W_1, W_2)$  в задаче  $Z(i, W_1, W_2)$  – функция Беллмана для (1). Как очевидно,

$$D(1, \{j\}, \{k\}) = a_{1j} + b_{1k}; \quad j, k \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

и согласно принципу динамического программирования функция Беллмана определяется рекуррентным соотношением вида

$$D(i, W_1, W_2) = \min_{\alpha, \beta} (\max[(a_{i\alpha} + b_{i\beta}), D(i-1, \{W_1 \setminus \alpha\}, \{W_2 \setminus \beta\})]), \quad (3)$$

где  $(\alpha, \beta)$  – произвольные пары индексов из множества  $W_1 \times W_2$ .

Приведенные соотношения (2) и (3) предполагают реализацию схемы прямого счета без рассмотрения состояний, недостижимых из начального.

Выполнение решающей задачи (1) алгоритма начинается с определения величин  $D(1, \{j\}, \{k\})$  для всех одноэлементных множеств  $W_1$  и  $W_2$ . Затем, в порядке возрастания параметра  $i$  ( $i = 2, 3, \dots, n$ ) для всех возможных наборов  $W_1$  и  $W_2$  по соотношению (3) определяются значения функции  $D(i, W_1, W_2)$ .

В итоге значение функции Беллмана  $D(n, \{1, 2, \dots, n\}, \{1, 2, \dots, n\})$  представляет собой решение задачи (1).

В процессе вычислений для каждого набора  $(i, W_1, W_2)$  следует фиксировать пару  $(\alpha, \beta)$ , на которой реализуется минимум правой части соотношения (3). Это позволит после вычисления оптимального значения  $D(n, \{1, 2, \dots, n\}, \{1, 2, \dots, n\})$  определить соответствующее биназначение.

Сложность [4] описанного алгоритма динамического программирования определяется числом вычисляемых значений функции Беллмана и, соответственно, характеризуется величиной  $O(4^n)$ .

В качестве иллюстрации приведем результат решения задачи (1) вышеописанным алгоритмом с квадратными матрицами стоимостей выполнения работ 4-го порядка вида

$$A = \begin{pmatrix} 70 & 35 & 10 & 68 \\ 72 & 68 & 69 & 12 \\ 42 & 62 & 8 & 96 \\ 50 & 60 & 98 & 84 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 69 & 73 & 32 & 15 \\ 85 & 3 & 39 & 96 \\ 13 & 6 & 31 & 28 \\ 3 & 33 & 54 & 51 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Оптимальное значение критерия  $D(4, P, Q) = 53$  в приведенной численной конкретизации рассматриваемой задачи достигается при биназначении вида

$$\pi_p(1) = 2, \pi_p(2) = 4, \pi_p(3) = 3, \pi_p(4) = 1, \pi_q(1) = 4, \pi_q(2) = 2, \pi_q(3) = 3, \pi_q(4) = 1. \quad (5)$$

3. Для реализации концепции ветвей и границ следует конструктивно определить следующие её составляющие компоненты:

- правило вычисления верхних оценок значения критерия в вершинах фрагмента дерева вариантов,
- правило вычисления нижних оценок значения критерия оптимизации в вершинах фрагмента дерева вариантов,
- способ ветвления.

Для вычисления верхней оценки значения критерия в корне дерева вариантов задачи (1) решается определяемая матрицей  $A$  скалярная задача о назначениях с минимаксным критерием. Получаемое таким образом обозначаем  $\pi^*$ . Далее выполняется построение матрицы  $B^*$ , каждый элемент которой  $b_{ij}^*$  находится по формуле  $b_{ij}^* = b_{ij} + a_{i\pi_p^*(i)}$ . Аналогично синтезу  $\pi^*$  в результате решения определяемой матрицей  $B^*$  скалярной задачи о назначениях с минимаксным критерием получается назначение  $\pi_q^*$ .

Итоговое биназначение  $\pi^{**} = \langle \pi_p^*(i), \pi_q^*(i) \rangle$  обеспечивает верхнюю оценку в корне дерева вариантов решаемой задачи.

В качестве нижней оценки в корне дерева вариантов можно принять величину  $\Theta$ , вычисляемую по соотношению

$$\Theta = \max_{\alpha} [\min_{\beta} a_{\alpha\beta} + \min_{\beta} b_{\alpha\beta}].$$

Изложенные способы получения верхней и нижней оценок значения оптимизируемого критерия в корне дерева вариантов очевидным образом индуцируют алгоритмы их отыскания в промежуточных вершинах этого дерева.

Наименьшая из верхних оценок, получаемых в процессе описываемого построения, достаточного для решения задачи фрагмента дерева вариантов, именуется текущим рекордом, и его значение в таком процессе, вообще говоря, уменьшается.

Описанный алгоритм решения задачи завершает работу, как только множество перспективных для дальнейшего ветвления открытых вершин [5] оказывается пустым.

Корень дерева вариантов считается вершиной первого ранга; вершины  $k$ -го ранга порождают при ветвлении вершины ранга  $k+1$ .

Процедура ветвления в произвольной вершине  $k$ -го ранга заключается в построении из нее ветвей, каждая из которых соответствует закреплению за  $k$ -м исполнителем некоторой пары пока свободных работ из множества  $P \times Q$ ; при этом ветви дерева вариантов надо строить только для тех пар  $(p_{\alpha}, q_{\beta})$  свободных работ, для которых сумма  $a_{k\alpha} + b_{k\beta}$  меньше значения текущего рекорда. Вместе с тем, заметим, что число ветвей дерева вариантов, выходящих из произвольной вершины ранга  $k$ , может достигнуть значения  $(n - k) \times (n - k)$ .

Итоговая величина текущего рекорда – оптимальное значение критерия, и путь от корня к вершине дерева вариантов, в которой оно достигнуто, однозначно определяет решение задачи о биназначениях.

4. Для сравнения быстродействия программных реализаций сконструированных алгоритмов динамического программирования и ветвей и границ были выполнены вычислительные эксперименты на тестовом наборе данных; при этом для каждого значения размерности  $n$  из интервала [10, 13] осуществлялся расчет 100 задач, определяемых квадратными  $n \times n$ -матрицами оценок  $A$  и  $B$ , численные значения  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  элементов которых задавались псевдослучайным образом по равномерному закону распределения на полуоткрытом интервале [1, 100].

Значения экспериментально полученных средних длительностей решения задачи (1) представлены в таблице с точностью до секунды.

Размерность задачи	Среднее время решения задачи (1), с	
	Алгоритм динамического программирования	Алгоритм ветвей и границ
10	37	8
11	174	30
12	912	476
13	4377	4314

Приведенные данные демонстрируют практическую значимость разработанных алгоритмов для использования в цифровых системах поддержки планирования распределения скоростных пассажирских судов по маршрутам для выполнения региональных, пригородных и внутригородских перевозок, а также других видов транспортной деятельности.

Особо отметим разработанный алгоритм ветвей и границ: его принципиальным преимуществом является возможность решить задачу «до конца» (если позволяют временные рег-

ламентные ограничения), либо удовлетвориться значением текущего рекорда; причем имеется оценка, сколь удаленным от оптимума может быть это значение.

В приложениях оптимизации использования дискретных ресурсов, допускающих формализацию в рамках задачи (1), но отличающихся повышенными размерностями и, соответственно, требующих для своей реализации практически неприемлемых затрат времени целесообразно сосредоточиться, на наш взгляд, на разработках алгоритмов, основанных на метаэвристических концепциях, а также на ориентированных на суперкомпьютерные технологии реализации вычислительных процессов [4, 5].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-03141.*

### Библиографический список

1. **Коган, Д.И.** Постановка, алгоритмы синтеза решений и вычислительная сложность минимаксных задач о биназначениях / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко, Д.А. Хандурин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 1 (120). С. 31-36.

2. **Беллман, Р., Дрейфус С.** Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. - М.: Наука, 1965. 457 с.

3. **Сигал, И.Х.** Введение в прикладное дискретное программирование / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. - М.: Наука, 2007. 237с.

4. **Vasily N. Zakharov, Igor K. Kuzmichev, Mikhail B. Reznikov, Yury S. Fedosenko** Model of cluster implementation of the algorithm of optimal schedule synthesis in the canonical task of dispatching // Marineintellectualtechnologies. 2018. № 4(42). Т. 2. С. 139-144.

5. **Федосенко, Ю.С.** Опыт оптимизации кластерной вычислительной модели алгоритма дискретного динамического программирования для канонической задачи диспетчеризации / Ю.С. Федосенко, М.Б. Резников, А.С. Пудов // Супервычисления и математическое моделирование. Тезисы XVII Международной конференции. Саров, 15-18 октября 2018, Российский федеральный ядерный центр. Всероссийский НИИ экспериментальной физики. С. 129-130.

**Yu.S. Fedosenko, D.A. Handurin**

### IMPLEMENTATION OF SOLUTION ALGORITHMS MINIMAX BI-ASSIGNMENT PROBLEM

Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

Algorithms for solving the bi-assignment problem are described. The results of their numerical implementation and evaluation of the duration of the task at the dimensions typical for water transport logistics are presented.

**Key words:** bi-assignment, dynamic programming, branch and bound scheme, water transport logistics.

В.А. Чеканин, А.В. Чеканин

## АЛГОРИТМ ДЕКОМПОЗИЦИИ ОРТОГОНАЛЬНОГО МНОГОГРАННИКА ПРОИЗВОЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

**Цель работы:** Разработка алгоритма, обеспечивающего возможность декомпозиции ортогонального многогранника произвольной размерности на множество ортогональных объектов.

**Методология:** Для декомпозиции ортогонального многогранника разработан алгоритм, основанный на применении модели потенциальных контейнеров, используемой при решении задач ортогональной упаковки произвольной размерности.

**Результаты:** Для разработанного алгоритма выполнена программная реализация и подготовлены примеры его работы на двухмерных и трёхмерных ортогональных многогранниках.

**Выводы:** Разработанный алгоритм декомпозиции ортогонального многогранника обеспечивает возможность получения набора крупных ортогональных объектов произвольной размерности.

**Ключевые слова:** ортогональный многогранник, декомпозиция, ортогональный объект, задача ортогональной упаковки.

### Введение

При решении  $D$ -мерной ( $D$  – натуральное число) задачи упаковки объектов произвольной геометрической формы размещаемые объекты могут быть представлены в виде ортогональных многогранников, представляющих собой наборы ортогональных объектов ( $D$ -мерных параллелепипедов) с фиксированным положением друг относительно друга. Эта задача имеет большое число практических приложений в различных областях, включая задачи раскроя промышленных материалов и задачи компоновки [1–3].

Очевидно, что с увеличением числа ортогональных объектов, входящих в ортогональный многогранник, возрастает время, затрачиваемое на проверку возможности размещения ортогонального многогранника в заданной области контейнера [4]. Эта проблема наиболее остро проявляется при использовании воксельной модели [5] для описания ортогонального многогранника в виде набора, представленного большим числом одинаковых  $D$ -мерных кубов. Поэтому для повышения скорости формирования упаковки необходимо выполнять декомпозицию ортогонального многогранника, результатом которой является получение набора крупных ортогональных объектов, занимающих ту же область, что и исходных набор ортогональных объектов ортогонального многогранника.

Задача декомпозиции ортогонального многогранника на множество крупных ортогональных объектов минимальной мощности является частным случаем NP-трудной задачи покрытия ортогонального многогранника ортогональными объектами [6], причём она является NP-трудной даже для ортогонального многогранника без отверстий [7].

Для декомпозиции ортогонального многогранника используются следующие алгоритмы.

### *1. Уровневое выделение областей*

Алгоритм, описанный в статьях [8, 9], осуществляет несколько итераций прохода по ячейкам матрицы, описывающей область, занимаемую ортогональным многогранником, в виде набора уровней [10] (для горизонтального направления объединения осуществляется анализ ячеек матрицы по строкам, для вертикального направления – по столбцам, для диагонального – как по строкам, так и по столбцам), с их последующим объединением в крупные прямоугольные объекты. Недостатком этого алгоритма является то, что он даёт различные результаты при использовании различных направлений объединения ячеек матрицы, при этом отсутствуют какие-либо сведения об эффективности применения отдельных направлений объединения. Данный алгоритм представлен в статье [8] лишь в двухмерном случае.

### *2. Построение проекций в ортогональном многограннике*

Алгоритм, представленный в статье [11], основан на получении ортогональных объектов в результате построения проекций граней ортогонального многогранника на некоторую базовую плоскость (основание). Алгоритм реализован только для ортогональных многогранников в форме так называемых гистограмм, которые представлены в виде наборов ортогональных объектов, имеющих общее основание, что существенно ограничивает область его практического применения. Подобная задача в двухмерной постановке также рассматривается в статье [12] и в трёхмерной постановке в статье [13].

### *3. Отсечение ортогональных объектов с последующим объединением*

В статье [14] предлагается алгоритм, основанный на отсечении секущими плоскостями ортогональных объектов от ортогонального многогранника с последующим их объединением в крупные объекты при выполнении проходов вдоль каждой координатной оси. В процессе отсечения используется несколько секущих плоскостей, перпендикулярных различным координатным осям. Основным недостатком этого алгоритма является появление большого числа небольших промежуточных ортогональных объектов, что замедляет работу алгоритма и требует дополнительных вычислительных ресурсов на их обработку. Другим недостатком этого алгоритма является то, что он является многопроходным, и при объединении ортогональных объектов требует прохода вдоль каждой координатной оси. Этот алгоритм используется для представления ортогональных многогранников, созданных с использованием воксельной модели.

### *4. Использование графов*

Алгоритмы этой группы основаны на разбиении составного объекта на ряд прямоугольных областей, для которых в последующем составляется граф, определяющий их соседство друг с другом. Решение задачи минимизации числа ортогональных объектов в ортогональном многограннике сводится к решению задачи поиска графа с наилучшими характеристиками. Алгоритмы декомпозиции с использованием графов и деревьев встречаются в большом числе публикаций [12, 15, 16], однако они применяются для декомпозиции только двухмерных ортогональных многогранников.

В результате анализа основных алгоритмов, используемых для декомпозиции ортогонального многогранника, были сделаны следующие выводы:

- большинство алгоритмов ориентировано на применение к двухмерным ортогональным многогранникам (ортогональным полигонам);
- многие алгоритмы выполняют декомпозицию ортогонального многогранника, для которого обязательно задаётся ряд ограничительных условий (например, наличие общего основания для всех объектов, отсутствие отверстий и пр.);
- отсутствует алгоритм, обеспечивающий декомпозицию ортогонального многогранника произвольной размерности.



В данной работе разработан алгоритм декомпозиции ортогонального многогранника произвольной размерности на множество крупных ортогональных объектов, основанный на решении задачи ортогональной упаковки объектов с использованием разработанной модели потенциальных контейнеров [17, 18]. Эта модель описывает всё свободное пространство заполняемого объектами контейнера в виде набора всевозможных ортогональных областей с максимально возможными габаритными размерами (т.н. потенциальных контейнеров), которые могут быть использованы для размещения в них объектов.

### Алгоритм декомпозиции ортогонального многогранника произвольной размерности

Будем рассматривать ортогональный многогранник  $V$ , состоящий из  $m$  ортогональных объектов в форме  $D$ -мерных параллелепипедов  $o_k$ ,  $k \in \{1, \dots, m\}$  с габаритными размерами  $\{w_k^1; w_k^2; \dots; w_k^D\}$  (верхний индекс в формулах используется для обозначения размерности), положение которых задаётся в локальной системе координат ортогонального многогранника с помощью векторов  $\{z_k^1; z_k^2; \dots; z_k^D\}$ .

Алгоритм декомпозиции  $D$ -мерного ортогонального многогранника  $V$  на множество крупных ортогональных объектов включает следующие шаги.

**Шаг 1.** Создать пустой  $D$ -мерный ортогональный контейнер 1 с габаритными размерами  $\{W_1^1; W_1^2; \dots; W_1^D\}$ , совпадающими с габаритными размерами  $D$ -мерного параллелепипеда, описывающего исходный ортогональный многогранник  $V$  ( $W_1^d = S^d, \forall d \in \{1, \dots, D\}$ , где  $S^d = \max(z_k^d + w_k^d), \forall d \in \{1, \dots, D\}, k \in \{1, \dots, m\}$ ).

**Шаг 2.** Разместить ортогональный многогранник  $V$  в контейнере 1.

В результате размещения в контейнере 1 будет сформирован набор потенциальных контейнеров  $\{L_1\}$  с габаритными размерами  $\{w_{k_1}^1; w_{k_1}^2; \dots; w_{k_1}^D\}$ ,  $k_1 \in \{L_1\}$ , расположенных в точках  $\{p_{k_1}^1; p_{k_1}^2; \dots; p_{k_1}^D\}$ . Набор потенциальных контейнеров  $\{L_1\}$  описывает пространство контейнера 1, которое не принадлежит размещённому ортогональному многограннику  $V$ .

**Шаг 3.** Создать пустой  $D$ -мерный ортогональный контейнер 2 с габаритными размерами, совпадающими с габаритными размерами контейнера 1 ( $W_2^d = W_1^d, \forall d \in \{1, \dots, D\}$ ).

**Шаг 4.** Разместить в контейнере 2 набор  $D$ -мерных ортогональных объектов с параметрами (положение и габаритные размеры), совпадающими с параметрами потенциальных контейнеров из контейнера 1 (при размещении объектов разрешить их взаимное перекрытие):  $x_i^d = p_{k_1}^d$  и  $w_i^d = w_{k_1}^d, \forall d \in \{1, \dots, D\}, i = 1, \dots, K_1$ , где  $K_1$  – мощность множества  $\{L_1\}$  (число потенциальных контейнеров, находящихся в контейнере 1).

В результате размещения в контейнере 2 будет сформирован набор потенциальных контейнеров  $\{L_2\}$  с габаритными размерами  $\{w_{k_2}^1; w_{k_2}^2; \dots; w_{k_2}^D\}$ ,  $k_2 \in \{L_2\}$ , расположенных в точках  $\{p_{k_2}^1; p_{k_2}^2; \dots; p_{k_2}^D\}$ . Набор потенциальных контейнеров  $\{L_2\}$  описывает пространство контейнера 2, которое принадлежит размещённому ортогональному многограннику  $V$ .

**Шаг 5.** Создать  $D$ -мерный ортогональный многогранник  $V'$ , состоящий из ортогональных объектов с параметрами, совпадающими с параметрами потенциальных контейне-

ров из контейнера 2:  $z_i^d = p_{k_2}^d$  и  $w_i^d = w_{k_2}^d \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, i = 1, \dots, K_2$ , где  $K_2$  – мощность множества  $\{L_2\}$  (число потенциальных контейнеров, находящихся в контейнере 2).

Ортогональный многогранник  $V'$  содержит все возможные ортогональные объекты, на которые он может быть декомпозирован.

**Шаг 6.** Применить операцию сложения [19, 20] ко всем ортогональным объектам, входящим в состав ортогонального многогранника  $V'$ .

В результате будет получен ортогональный многогранник  $O$ , состоящий из неперекрывающихся друг друга ортогональных объектов. Поскольку операция сложения ортогональных объектов применяется к набору всех возможных ортогональных объектов, на которые может быть декомпозирован исходный ортогональный многогранник  $V$ , упорядоченных в порядке убывания занимаемых ими объёмов, полученный ортогональный многогранник  $O$  будет состоять из максимально возможно крупных ортогональных объектов.

### Примеры декомпозиции ортогональных многогранников разработанным алгоритмом

Рассмотрим пример декомпозиции двухмерного ортогонального многогранника, созданного с использованием воксельной модели.

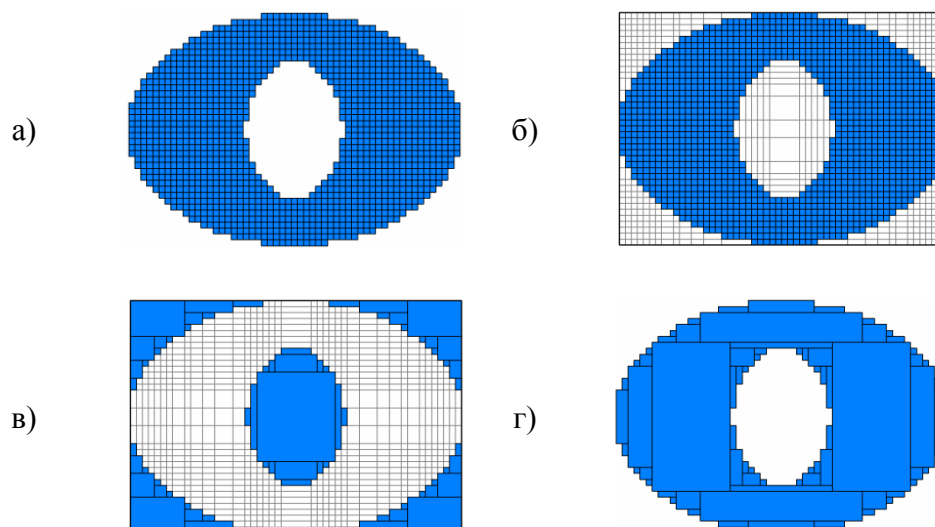
Ортогональный многогранник в форме эллипса с отверстием, представленный на рис.1, а состоит из 1398 одинаковых ортогональных объектов с габаритными размерами  $\{1;1\}$ . При создании ортогонального многогранника были использованы следующие функции:

$$\begin{cases} 2(x-50)^2 + (y-25)^2 - 150 \geq 0; \\ (x-50)^2 + 2(y-25)^2 - 800 < 0, \end{cases}$$

где  $x \in [0;100]$ ,  $y \in [0;50]$ .

На рис. 1, б и в представлено содержимое контейнеров 1 и 2 (потенциальные контейнеры показаны серым цветом без заливки).

В результате работы разработанного алгоритма декомпозиции был получен ортогональный многогранник, состоящий из 72 ортогональных объектов, представленный на рис.1, г.

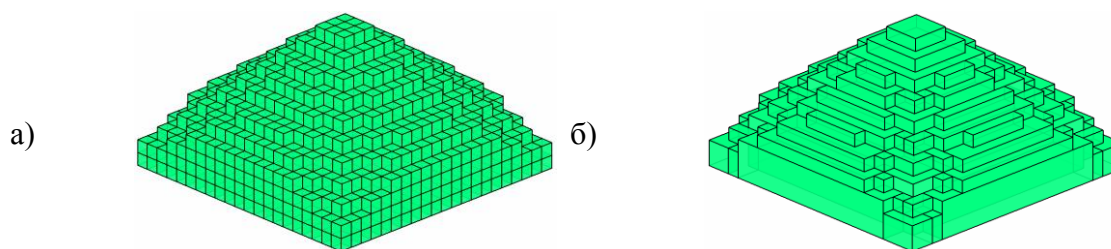


**Рисунок 1. Декомпозиция двухмерного ортогонального многогранника:**  
а – исходный ортогональный многогранник; б – контейнер 1; в – контейнер 2;  
г – полученный ортогональный многогранник

Рассмотрим пример декомпозиции трёхмерного ортогонального многогранника в форме пирамиды, созданного с использованием воксельной модели.

Ортогональный многогранник, представленный на рис. 2, а, состоит из 2653 одинаковых ортогональных объектов с габаритными размерами  $\{1;1;1\}$ . При создании ортогонального многогранника была использована функция  $x^2 + y^2 - 2z^2 \leq 0$ , где  $x \in [-10;10]$ ,  $y \in [-10;10]$ ,  $z \in [-10;0]$ .

В результате декомпозиции был получен ортогональный многогранник, состоящий из 89 ортогональных объектов, представленный на рис. 2, б.

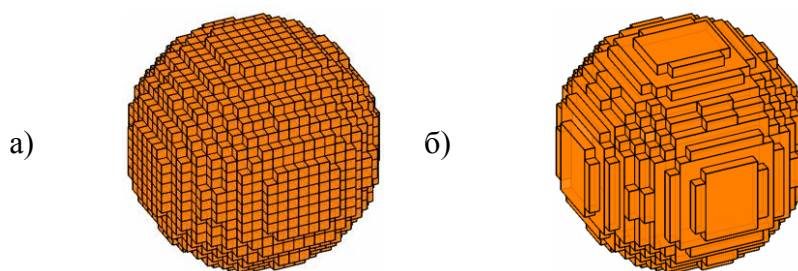


**Рисунок 2. Декомпозиция трёхмерного ортогонального многогранника в форме пирамиды:**  
а – исходный ортогональный многогранник; б – полученный ортогональный многогранник

Рассмотрим пример декомпозиции трёхмерного ортогонального многогранника в форме шара, созданного с использованием воксельной модели.

Ортогональный многогранник в форме пирамиды, представленный на рис. 3, а, состоит из 5233 одинаковых ортогональных объектов с габаритными размерами  $\{1;1;1\}$ . При создании ортогонального многогранника была использована функция  $x^2 + y^2 + z^2 - 100 \leq 0$ , где  $x \in [-10;10]$ ,  $y \in [-10;10]$ ,  $z \in [-10;10]$ .

В результате декомпозиции был получен ортогональный многогранник, состоящий из 181 ортогонального объекта, представленный на рис. 3, б.



**Рисунок 3. Декомпозиция трёхмерного ортогонального многогранника в форме шара:**  
а - исходный ортогональный многогранник; б - полученный ортогональный многогранник

## Выводы

Разработан алгоритм, обеспечивающий декомпозицию ортогонального многогранника на множество ортогональных объектов с наибольшими площадями (объёмами) на основе решения задачи упаковки с использованием модели потенциальных контейнеров. Алгоритм описан и программно реализован инвариантно относительно размерности решаемой задачи, что делает его применимым при решении задач упаковки ортогональных многогранников

произвольной размерности. Разработанный алгоритм применим для декомпозиции ортогональных многогранников произвольной геометрической конфигурации, в том числе, имеющих отверстия или внутренние полости.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00892.*

### Библиографический список

1. **Чеканин, В.А.** Эвристический алгоритм оптимизации решений задачи прямоугольного раскроя / В.А. Чеканин, А.В. Чеканин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 4. – С. 210–213.
2. **Чеканин, В.А.** Эвристики размещения объектов для задачи трехмерной ортогональной упаковки объектов / В.А. Чеканин, Д.С. Киреев // Вестник МГТУ «Станкин». – 2017. – № 2 (41). – С. 98–102.
3. **Соболев, А.Н.** Моделирование конструкций корпусных деталей с использованием расчётных макроэлементов / А.Н. Соболев, М.Г. Косов, А.Я. Некрасов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 3 (30). – С. 98–101.
4. **Чеканин, В.А.** Алгоритмы размещения и удаления ортогональных многогранников произвольной размерности в задачах раскроя и упаковки / В.А. Чеканин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 3 (50). – С. 77–81.
5. **Локтев, М.А.** Функциональный принцип обхода препятствий с применением метода функционально-воксельного моделирования / М.А. Локтев, А.В. Толоч // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 1 (36). – С. 75–80.
6. **Masek, W.J.** Some NP-Complete Set Covering Problems: Manuscript / W.J. Masek // MIT, 1979.
7. **Culberson, J.C.** Covering Polygons is Hard / J.C. Culberson, R.A. Reckhow // Journal of Algorithms. – 1994. – Vol. 17. No. 1. – P. 2–44.
8. **Хасанова, Э.И.** Матричный способ декомпозиции многосвязного полигона на множество прямоугольных областей минимальной мощности / Э.И. Хасанова, Р.С. Валеев // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14. № 2 (37). – С. 183–187.
9. **Валиахметова, Ю.И.** Гибридный алгоритм на основе последовательного уточнения оценок для задач максимального ортогонального покрытия / Ю.И. Валиахметова, С.В. Телицкий, Э.И. Хасанова // Вестник Башкирского университета. – 2012. – Т. 17. № 1. – С. 421–424.
10. **Lodi, A.** Recent advances on two-dimensional bin packing problems / A. Lodi, S. Martello, D. Vigo // Discrete Applied Mathematics. – 2002. – Vol. 123. No. 1–3. – P. 379–396.
11. **Floderus, P.** 3D rectangulations and geometric matrix multiplication / P. Floderus, J. Jansson, C. Levcopoulos, A. Lingas, D. Sledneu // Algorithmica. – 2018. – Vol. 80. No. 1. – P. 136–154.
12. **Durocher, S.** Computing conforming partitions of orthogonal polygons with minimum stabbing number / S. Durocher, S. Mehrabi // Theoretical Computer Science. – 2017. – Vol. 689. – P. 157–168.
13. **Biedl, T.** Partitioning Orthogonal Histograms into Rectangular Boxes / T. Biedl, M. Derka, V. Irvine, A. Lubiw, D. Mondal, A. Turcotte // In: Latin American Symposium on Theoretical Informatics. Springer, Cham. – 2018. – P. 146–160.

14. **Cruz-Matías, I.** Compact union of disjoint boxes: An efficient decomposition model for binary volumes / I. Cruz-Matías, D. Ayala // *Computación y Sistemas*. – 2017. – Vol. 21. No. 2. – P. 275–292.
15. **Wu, S.Y.** Fast algorithms to partition simple rectilinear polygons / S.Y. Wu, S. Sahni // *VLSI Design*. – 1994. – Vol. 1. No. 3. – P. 193–215.
16. **Györi, E.** Generalized guarding and partitioning for rectilinear polygons / E. Györi, F. Hoffmann, K. Kriegel, T. Shermer // *Computational Geometry*. – 1996. – Vol. 6. No. 1. – P. 21–44.
17. **Chekanin, V.A.** An efficient model for the orthogonal packing problem / V.A. Chekanin, A.V. Chekanin // *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. – 2015. – Vol. 22. – P. 33–38.
18. **Чеканин, В.А.** Структура данных для задачи трехмерной ортогональной упаковки объектов / В.А. Чеканин, А.В. Чеканин // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2015. – № 1. – С. 112–116.
19. **Чеканин, В.А.** Алгоритмы построения ортогональных многогранников различной размерности / В.А. Чеканин, А.В. Чеканин // *Информационные системы и технологии – 2019: сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции* – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 709–715.
20. **Чеканин, В.А.** Алгоритмы формирования ортогональных многогранников произвольной размерности в задачах раскроя и упаковки / В.А. Чеканин, А.В. Чеканин // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2018. – № 3 (46). – С. 126–130.

**V.A. Chekanin, A.V. Chekanin**

## **PARTITION ALGORITHM FOR AN ORTHOGONAL POLYHEDRON OF ARBITRARY DIMENSION**

Moscow state university of technology «STANKIN»

**Purpose:** Development of an algorithm providing the partition of orthogonal polyhedron of arbitrary dimension to a set of orthogonal objects.

**Approach:** For partition of orthogonal polyhedron an algorithm based on the application of the model of potential containers which is used in solving the orthogonal packing problems of arbitrary dimension was developed.

**Findings:** For the developed algorithm, a software implementation was performed and examples of its work on two-dimensional and three-dimensional orthogonal polyhedrons were prepared.

**Value:** The developed algorithm for partition an orthogonal polyhedron provides the ability of obtaining a set of large orthogonal objects of arbitrary dimension.

**Key words:** orthogonal polyhedron, partition, orthogonal object, orthogonal packing problem.

Н. Д. Халеев

## РЕАЛИЗАЦИЯ ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРЕБУЕМОЙ ДАЛЬНОСТИ ПОЛЁТА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е.Алексеева

В статье описывается движение беспилотного летательного аппарата со стабилизацией дальности полёта. Описывается порядок формирования дальности с помощью итерационного процесса. Эффективность разработанной процедуры подтверждается результатами моделирования.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, система управления, итерационная процедура, траектория полёта.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты применяются во множестве областей современной жизни [1, 2]. Особой значимостью обладают разработки, позволяющие повысить диапазон и эффективность применения данных устройств в рамках оборонной промышленности. Одним из предприятий, работающих в данном направлении, является ПАО «АНПП «ТЕМП-АВИА», основной задачей которого является модификация систем навигации и управления беспилотных летательных аппаратов [3].

В общем случае траекторное движение разрабатываемых изделий можно разделить на три основных участка, различающихся по типу решаемых задач:

- 1) начальный участок – отработка стартовых и ветровых возмущений;
- 2) участок маршевого полёта – формирование перегрузки для стабилизации заданной высоты полёта, а также движения по траектории в соответствии с заданной в полётном задании формой;
- 3) конечный участок полёта – обеспечение приведения летательного аппарата в точку с заданными в полётном задании координатами путём формирования особых сигналов управления.

Управление автономным полётом беспилотного летательного аппарата осуществляется за счёт изменения направления и величины перегрузки  $n_{зад}$ .

Одним из возможных вариантов движения объекта управления на конечном участке является движение с постоянной дальностью  $D_{треб}$  относительно точки  $T_{зад}$  с известными координатами (рис. 1). Закон управления в этом случае имеет вид

$$n_{зад} = k_1 \cdot \Delta D_{треб} + k_2 \cdot \sin(\Delta\psi), \quad (1)$$

где  $n_{зад}$  – управляющая перегрузка в боковой плоскости, ед. пер.;  $k_1, k_2$  – коэффициенты передачи;  $\Delta D_{треб}, \Delta\psi$  рассчитываются по формулам

$$\Delta D_{треб} = D_{треб} - D_{гор}, \quad (2)$$

$$\Delta\psi = \psi - \psi_{зад}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{гор}}$  – текущая горизонтальная дальность до  $T_{\text{зад}}$ , м;  $\psi$  – угол рыскания (совпадает с направлением полёта), рад;  $\psi_{\text{зад}}$  – угол заданного направления, рад.

Рассмотрим условные обозначения, введённые на рис. 1. Переход на дальность  $D_{\text{треб}}$  и замыкание системы на управление по закону (1) выполняется за счёт разворотов  $T_1$ - $T_2$ ,  $T_3$ - $T_4$  с радиусом  $R_{\text{пов}}$ . Отметим, что при этом летательному аппарату сообщается граничная перегрузка со знаком, зависящим от направления поворота:

$$|n_{z\text{зад}}| = |\pm n_{z\text{max}}| = \text{const}, \quad (4)$$

$$R_{\text{пов}} = \text{const}. \quad (5)$$

Для определения параметра  $D_{\text{треб}}$  необходимо реализовать итерационную процедуру, позволяющую до начала манёвра определить возможность его выполнения и вычислить все необходимые параметры. Вызов данной процедуры выполняется при достижении точки  $T_0$ .

Обозначим время движения по траектории  $T_2$ - $T_3$  за  $t_{\text{движ}}$ . В этом случае требуемую дальность можно рассчитать по следующей формуле:

$$D_{\text{треб}i} = K_D \cdot (R_{\text{пост}} + R_{\text{перем}i}), \quad (6)$$

$$D_{\text{треб}0} = R_{\text{пост}} + R_{\text{пов}}, \quad (7)$$

где  $i$  – номер текущего шага расчёта;  $K_D > 1$  – коэффициент, выбранный с помощью стандартных методов теории регулирования [4];  $R_{\text{пост}}$  – постоянная добавка к дальности, обеспечивающая полёт по закону (1) с соблюдением требований безопасности полёта, м;  $R_{\text{перем}i}$  – переменная составляющая, м. Данный параметр зависит от величины  $t_{\text{движ}}$  и включает в себя добавки к дальности за счёт устаревания информации, ошибок счисления и движения точки  $T_{\text{зад}}$ .

Порядок расчёта  $t_{\text{движ}}$  на любой итерации определяется следующим образом:

$$t_{\text{движ}i} = \frac{L_{\text{движ}i}}{v_{\text{движ}}}, \quad (8)$$

где  $v_{\text{движ}}$  – скорость движения летательного аппарата в точке  $T_0$ , м·с<sup>-1</sup>;  $L_{\text{движ}i}$  – длина участка  $T_0$ - $T_4$ , м. Разобьём данную величину на составляющие:

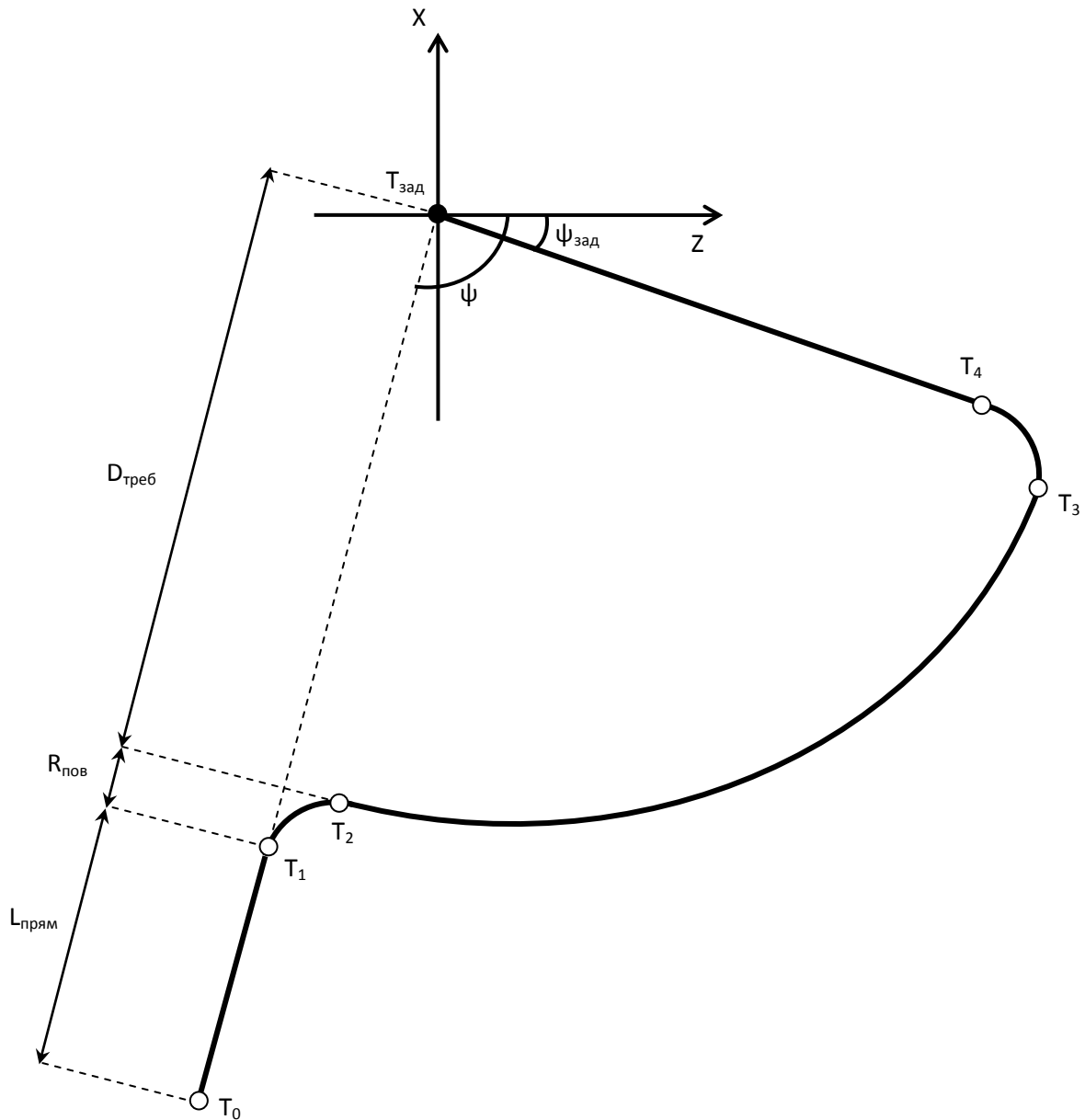
$$L_{\text{движ}i} = L_{\text{прям}i} + \pi R_{\text{пов}} + (\psi_0 - \psi_{\text{зад}}) \cdot D_{\text{треб}i}, \quad (9)$$

где  $L_{\text{прям}i}$  – прямолинейная дальность, обозначенная на рисунке 1, м;  $\pi R_{\text{пов}}$  – длина дуг разворотов  $T_1$ - $T_2$ ,  $T_3$ - $T_4$  при упрощённом порядке расчёта, м;  $(\psi_0 - \psi_{\text{зад}}) \cdot D_{\text{треб}i}$  – протяжённость  $T_2$ - $T_3$ , м. Здесь  $\psi_0$  соответствует углу рыскания в точке  $T_0$ .

Итак, отдельно взятая итерация состоит из последовательного выполнения вычислений в соответствии с формулами (9), (8) и (6). Итерационная процедура обеспечивает сходящийся

по требуемой дальности полёта  $D_{\text{треб}i}$ : процесс, гарантирующий при достаточном количестве шагов расчёта  $k$  получение максимального значения  $D_{\text{треб}k}$  с точностью, позволяющей обеспечить выполнение условия

$$D_{\text{треб}k} - D_{\text{треб}(k-1)} < 10 \text{ м.} \quad (10)$$



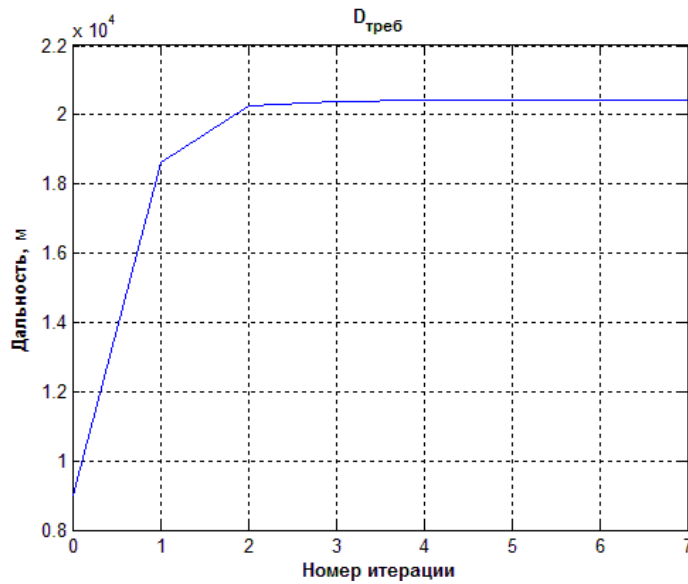
**Рисунок 1. Траектория движения (горизонтальный канал) с постоянной дальностью полёта**

Анализ результатов моделирования итерационного процесса с различными наборами входных данных позволяет определить оптимальную для выполнения неравенства (10) в любых условиях величину параметра  $k = 7$ . График изменения параметра  $D_{\text{треб}i}$  для условий, представленных в таблице, приведен на рис. 2. Процесс удовлетворяет условию (10) при  $k = 5$ , значение  $D_{\text{треб}k}$  составляет  $\sim 20410$  м.



**Начальные условия**

Параметр	$v_{\text{движ}}, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	$R_{\text{пов}}, \text{ м}$	$R_{\text{пост}}, \text{ м}$	$(\psi_0 - \psi_{\text{зад}}), \text{ рад}$
Значение	270	4000	5000	1,8

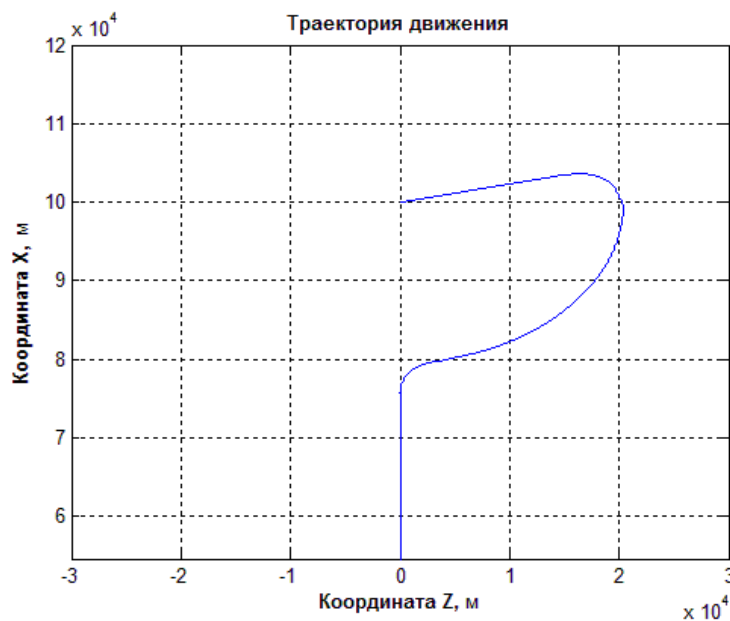


**Рисунок 2. Требуемая дальность полёта**

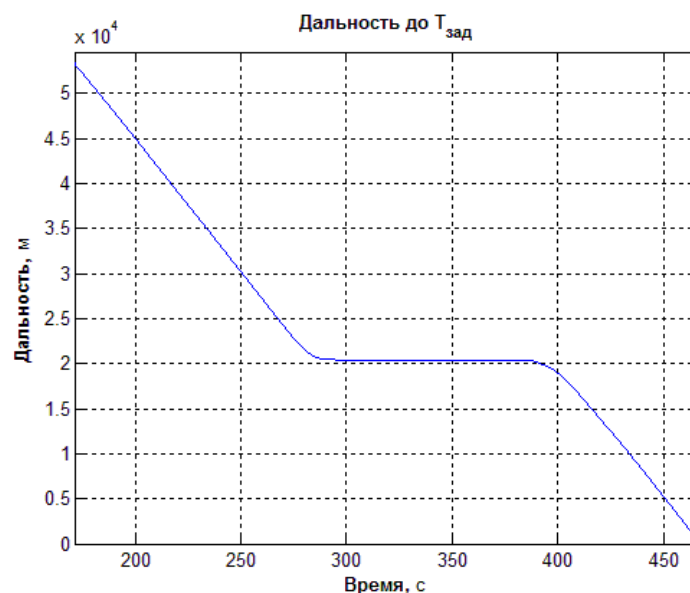
Выполнено включение разработанной процедуры в состав алгоритма движения с постоянной дальностью относительно конечной точки. На рис. 3-4 представлены траектория движения для условий, перечисленных в табл. 1, и горизонтальная дальность полёта при  $D_{\text{гор}T_0} = 53150 \text{ м}$ . Здесь  $D_{\text{гор}T_0}$  – дальность от точки  $T_0$  до  $T_{\text{зад}}$ .

На рис. 4участку  $T_2$ - $T_3$ соответствует время полёта с 296,5с по 386,5с.

Результаты моделирования подтверждают правильность функционирования разработанной итерационной процедуры в составе общего алгоритма движения с постоянной дальностью относительно заданной конечной точки.



**Рисунок 3. Траектория движения (горизонтальный канал) с подключением разработанного алгоритма**



**Рисунок 4. Процесс изменения дальности**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-00916.*

### **Библиографический список**

1. Российские и зарубежные беспилотники [Электронный ресурс] / Военный обзор. URL: <https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/aviaciya/bespilotnye-letatelnye-apparaty>
2. Беспилотный летательный аппарат [Электронный ресурс] / Государство. Бизнес. ИТ. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный\\_летательный\\_аппарат\\_\(дрон,\\_БПЛА\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_(дрон,_БПЛА))
3. ПАО « Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА». URL: <http://www.temp-avia.ru/>
4. **Краснов, Н. Ф.** Управление и стабилизация в аэродинамике / Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой. – М.:Высшая школа, 1978. – 480 с.

**N. D. Khaleev**

### **REALISATION OF ITERATIVE PROCEDURE FOR CALCULATION OF REQUIRED FLIGHT DISTANCE**

ArzamasPolytechnical Institute (branch)«NSTU n. a. R.E. Alekseev», Arzamas

The article describes movement of a pilotless vehicle with stabilization of flight distance. The iterative process of forming required distance is concerned here. Effectiveness of developed procedure is proved by results of mathematical simulation.

**Keywords:** pilotless vehicle, control system, iterative procedure, flight path

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УГЛА СНОСА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

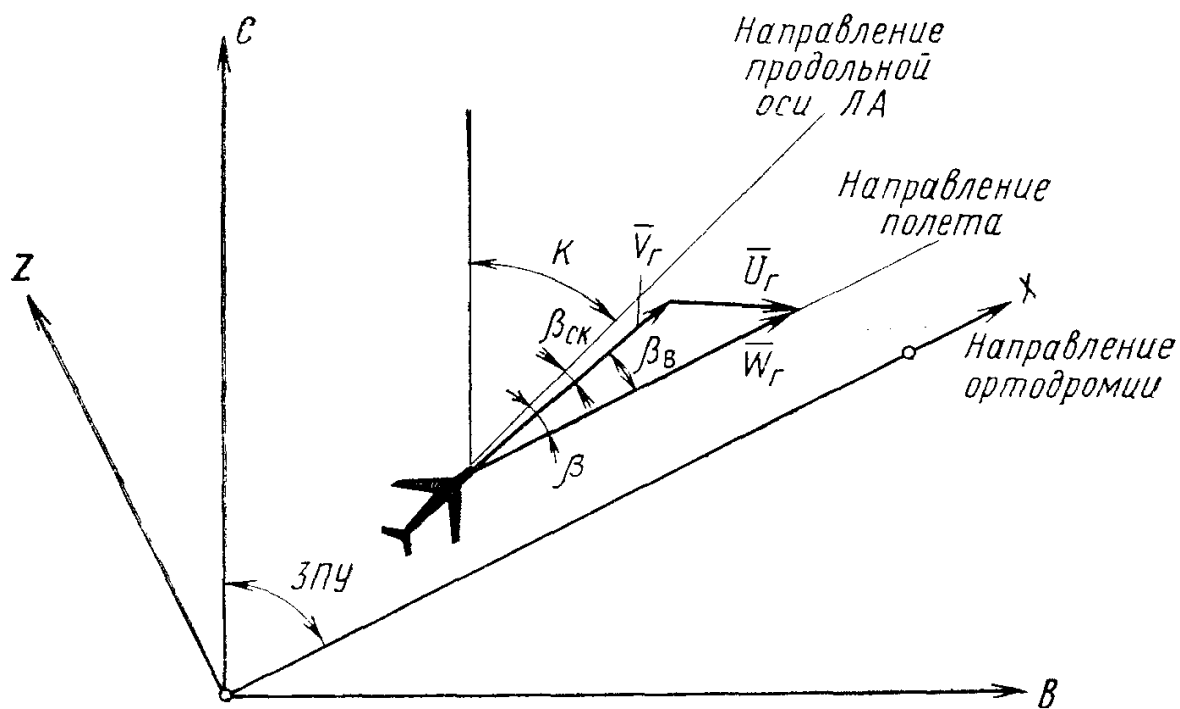
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е.Алексеева

В статье рассматривается методика оценки угла сноса беспилотного летательного аппарата при воздействии ветрового возмущения наблюдателем, основанного на дискретном оптимальном фильтре Калмана.

**Ключевые слова:** угол сноса, заданное направление, фильтр Калмана, боковой ветер, аэродинамические характеристики.

Для многих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стабилизация линии заданного направления и сопряжение прямолинейных участков полета проложенного маршрута [1] в боковом канале являются очень важными задачами траекторного управления. Ветровые порывы разного рода значительно усложняют их выполнение.

Информация о параметрах ветрового возмущения дает возможность учитывать воздействие ветра на БПЛА при решении выше поставленных задач. Такой информацией может стать угол сноса ветром. Углом сноса ветром является составляющая угла пути, вызванная боковым порывом ветра. Наряду с этим необходимо учитывать аэродинамический угол скольжения, который вместе с углом сноса ветром образуют полный угол сноса (рисунок).



Навигационный треугольник скоростей

На рисунке приняты следующие обозначения:

- $\beta$  ( $\beta_k$ ) – угол сноса (кинематический угол скольжения);
- $\beta_{ск}$  – аэродинамический угол скольжения;
- $\beta_B$  ( $\beta_T$ ) – угол сноса ветром;
- $\overline{W}_\Gamma$  – вектор путевой скорости;
- $\overline{V}_\Gamma$  – горизонтальная составляющая вектора воздушной скорости;
- $\overline{U}_\Gamma$  – горизонтальная составляющая вектора скорости ветра;
- $K(\psi)$  – угол курса (рыскания);
- ЗПУ – заданный путевой угол.

Формула для расчета угла пути имеет вид:

$$\Psi = \psi + \beta_k, \quad \text{где} \quad \beta_k = \beta_{ск} + \beta_T.$$

Курсовая система и доплеровский измеритель вектора скорости (ДИСС), при установке их на борту БПЛА, дают информацию для расчета угла пути [2]. Актуальной задачей является определение угла сноса без наличия ДИСС, который его измеряет.

Достаточно точные априорные данные об аэродинамических характеристиках БПЛА позволяют построить наблюдатель, оценивающий недостающую информацию по измерениям с имеющихся датчиков первичной информации. В данной работе рассматривается оптимальный дискретный фильтр Калмана (ОФК) для оценки угла сноса БПЛА.

Линеаризованные уравнения бокового возмущенного движения с учетом воздействия бокового порыва ветра имеют вид [3]:

$$\dot{\beta}_k = Z^\beta (\beta_k - \beta_T) + \omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha + \frac{g}{V} \gamma \cos \vartheta + \Delta Z;$$

$$\dot{\omega}_x = M_x^\beta (\beta_k - \beta_T) + M_x^{\omega_x} \omega_x + M_x^{\omega_y} \omega_y + \Delta M_x;$$

$$\dot{\omega}_y = M_y^\beta (\beta_k - \beta_T) + M_y^{\omega_x} \omega_x + M_y^{\omega_y} \omega_y + \Delta M_y;$$

$$\dot{\gamma} = \omega_x - \omega_y \operatorname{tg} \vartheta,$$

где  $\Delta Z = Z^{\delta_H} \delta_H + Z^{\delta_\vartheta} \delta_\vartheta$  – составляющая боковой силы, вызванная рулями направления и элерона;

$\Delta M_x = M_x^{\delta_H} \delta_H + M_x^{\delta_\vartheta} \delta_\vartheta$  – составляющая момента крена, вызванная рулями направления и элерона;

$\Delta M_y = M_y^{\delta_H} \delta_H + M_y^{\delta_\vartheta} \delta_\vartheta$  – составляющая момента рыскания, вызванная рулями направления и элерона;

$\omega_x, \omega_y$  – угловые скорости крена и рыскания соответственно;

$\alpha, \gamma, \vartheta$  – углы атаки, крена и тангажа соответственно;

$g$  – ускорение свободного падения;

$V$  – модуль путевой скорости;

$Z^\beta$  – частная производная боковой силы по углу скольжения;

$M_x^\beta, M_x^{\omega_x}, M_x^{\omega_y}, M_y^\beta, M_y^{\omega_x}, M_y^{\omega_y}$  – частные производные моментов крена и рыскания по соответствующим величинам.

Для построения наблюдателя, основанного на ОФК, будем использовать систему линейных дифференциальных уравнений в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + E\beta_T, \\ y &= Cx + v, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $x = \begin{bmatrix} \beta_K \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \gamma \end{bmatrix}$  – вектор состояния;

$$A = \begin{bmatrix} Z^\beta & \sin \alpha & \cos \alpha & \frac{g}{V} \cos \vartheta \\ M_x^\beta & M_x^{\omega_x} & M_x^{\omega_y} & 0 \\ M_y^\beta & M_y^{\omega_x} & M_y^{\omega_y} & 0 \\ 0 & 1 & -\operatorname{tg} \vartheta & 0 \end{bmatrix} \text{ – матрица системы;}$$

$$B = \begin{bmatrix} Z^{\delta_H} & Z^{\delta_\vartheta} \\ M_x^{\delta_H} & M_x^{\delta_\vartheta} \\ M_y^{\delta_H} & M_y^{\delta_\vartheta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ – матрица управления;}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрица измерений;}$$

$$u = \begin{bmatrix} \delta_H \\ \delta_\vartheta \end{bmatrix} \text{ – вектор управляющих сигналов;}$$

$$E = \begin{bmatrix} -Z^\beta \\ -M_x^\beta \\ -M_y^\beta \\ 0 \end{bmatrix} \text{ – вектор входа ветрового возмущения;}$$

$v$  – вектор шума измерений с распределением  $N(0, \sigma^2)$ .

Запишем систему (1) в дискретном виде:

$$x_{t+1} = F_t x_t + B_t u_t + w_t,$$

$$y_t = Cx_t + v_t,$$

где  $F_t = I + A_t \cdot \Delta t$ ;

$\Delta t$  – шаг дискретизации;

$w_t$  – вектор шума системы с распределением  $N(0, \sigma^2)$ .

Нижние индексы  $t+1, t, t-1$  в выражениях означают будущий, текущий и предыдущий шаги соответственно.

Перейдем к построению дискретного ОФК [4]. Начальными условиями являются:

$\hat{x}_0$  – начальная оценка состояния;

$P_0$  – ковариационная матрица ошибки оценивания;

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{\beta_k}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ – ковариационная матрица } w_t;$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^2 \end{bmatrix} \text{ – ковариационная матрица } v_t;$$

$\sigma_{\beta_k}$  – среднеквадратическое отклонение угла сноса;

$\sigma_{\omega_x}, \sigma_{\omega_y}, \sigma_{\gamma}$  – погрешности измерения координат состояния датчиками, имеющихся на борту БПЛА.

Оценка угла сноса может быть теперь получена на основе алгоритма, укрупненные шаги которого имеют вид:

**Этап наблюдения:**

По данному наблюдению на шаге  $t$  вычисляются

$$v_t = y_t - C\hat{x}_{t|t-1} \text{ – ошибка обновления;}$$

$$K_t = P_{t|t-1} C^T (C P_{t|t-1} C^T + R)^{-1} \text{ – коэффициент усиления фильтра Калмана;}$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t v_t \text{ – уточненное состояние;}$$

$$P_{t|t} = (I - K_t C) P_{t|t-1} \text{ – ковариация ошибки состояния.}$$

**Этап прогноза:**

$$\hat{x}_{t+1|t} = F_t \hat{x}_{t|t} + B_t u_t \text{ – прогноз состояния;}$$

$$P_{t+1|t} = F_t P_{t|t} F_t^T + Q \text{ – ковариация ошибки прогноза состояния.}$$

Представленная методика позволяет оценить угол сноса, что дает возможность использовать его в законах траекторного управления полетом по линии заданного направления при воздействии ветровых возмущений. Адекватность результатов оценки будет зависеть главным образом от точности априорной информации об объекте управления. Приведенный алгоритм дискретного ОФК отличается простотой реализации на бортовых цифровых вычислительных системах БПЛА.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-08-00528.*

## Библиографический список

1. **Шабашов, А.А.** Методика сопряжения прямолинейных участков полета заданного маршрута беспилотного летательного аппарата // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – С. 38-39.
2. **Колчинский, В.Е.** Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / В.Е. Колчинский, И.А. Мандуровский, М.И. Константиновский. – М., «Сов. радио», 1975. – 432 с.
3. **Ефремов, А.В.** Динамика полета: Учебник для студентов высших учебных заведений / А.В. Ефремов, В.Ф. Захарченко, В.Н. Овчаренко, В.Л. Суханов, Ю.Ф. Шелюхин, А.С. Устинов. – М., Машиностроение, 2011. – 776 с.
4. **Ледерман, У.** Справочник по прикладной статистике. 2 том / Перевод с английского под редакцией С.А. Айвазяна и Ю.Н. Тюрина. – М., «Финансы и статистика», 1990. – 526 с.

**A.A. Shabashov**

### **METHODOLOGY FOR ASSESSING THE DRIFT ANGLE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Arzamas Polytechnical Institute (branch) «NSTU n. a. R.E. Alekseev», Arzamas

The article discusses the methodology for assessing the drift angle of an unmanned aerial vehicle when exposed to wind perturbation by an observer based on a discrete Kalman optimal filter.

**Key words:** drift angle, given direction, Kalman filter, side wind, aerodynamic characteristics.

## 5.3. Информационное моделирование когнитивных процессов

УДК 004.912

К.И. Абросимов, Т.В. Львutiна, А.С. Суркова

### СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА И АЛГОРИТМА РОККИО ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕКСТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе исследованы и программно реализованы два алгоритма классификации текстов: алгоритм «наивной» байесовской классификации и алгоритм Роккио. Для предварительной автоматической обработки текстов, в ходе которой из текста извлекаются слова, являющиеся «характерными» для данного класса, использован критерий хи-квадрат. В ходе экспериментов выявлено оптимальное пороговое значение критерия хи-квадрат (СНІ), по которому производится выборка слов из текста, несущих наибольшую информативность. В работе представлены эксперименты, направленные на сравнение качества классификации текстов. Эксперименты показали, что наименьшие временные затраты на процессы обучения и непосредственно классификации требует алгоритм «наивной» байесовской классификации. При этом качество классификации, то есть доля документов, правильно отсортированных по классам, выше при использовании алгоритма Роккио.

**Ключевые слова:** компьютерная лингвистика, классификация данных, машинное обучение, наивный байесовский классификатор, алгоритм Роккио, критерий хи-квадрат (СНІ).

#### Введение

За последние 20-25 лет появился широкий круг задач автоматической обработки текстов, в виду постоянно повышающегося количества документов в цифровой форме. Одной из таких задач является классификация текстовых данных – задача разделения текстов на естественном языке по тематическим классам из заранее определенной выборки. Изначально основным подходом к решению рассматриваемой была ручная обработка. Подобная ручная классификация дорога и неприменима в случаях, когда необходимо классифицировать большое количество документов с высокой скоростью. На смену данному подходу пришло машинное обучение, где производится автоматическое построение текстового классификатора с помощью обучения на наборе заранее классифицированных документов.

В данной работе рассматриваются два алгоритма классификации текста с учителем: алгоритм «наивной» байесовской классификации и алгоритм Роккио. В работе реализованы классификации, а также предварительная автоматическая обработка текстов. Проведены опыты с различным объемом текстов обучающей выборки.

#### Постановка задачи классификации

Классификация означает отнесение каждого документа к определенному классу с заранее известными параметрами [2]. Эту задачу можно описать следующим образом. Задано конечное множество классов и имеется множество объектов. Для конечного подмножества объек-



тов известно, к какому классу они относятся. Это подмножество называется обучающей выборкой. Классовая принадлежность остальных объектов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества. Классифицировать объект — означает указать номер (или наименование класса), к которому относится данный объект [1]. В задаче классификации текстов в качестве объектов выступают текстовые документы.

Представим формальную постановку задачи классификации текстов:

$D = \{d_1, \dots, d_n\}$  — множество всех текстовых документов.

Каждый документ  $d \in D$  представляет собой последовательность слов  $Wd = (w_1, \dots, w_{nd})$ ,  $nd$  — длина документа  $d$ .

$Y = \{y_1, \dots, y_n\}$  — конечное множество меток классов.  $u * : D \rightarrow Y$  — неизвестная целевая зависимость, значения которой известны только на объектах конечной обучающей выборки  $D_m = \{(d_1, y_1), \dots, (d_m, y_m)\}$ .

Требуется построить алгоритм  $a: D \rightarrow Y$ , способный классифицировать произвольный объект  $d \in D$ .

### Предварительная обработка текстов

**Компьютерная лингвистика (КЛ)** — это научное направление в области математического и компьютерного моделирования интеллектуальных процессов у человека, которое ставит своей целью использование математических моделей для описания естественных языков (ЕЯ) [3]. В последнее время все чаще можно встретить упоминание КЛ в различных научных и практико-ориентированных областях. Это связано с бурным ростом в обществе текстовой информации и необходимостью автоматической обработки текстов на ЕЯ.

Все тексты на ЕЯ имеют большое количество слов, которые не несут информации о данном тексте. Такие слова называют шумовыми. Например, к ним можно отнести предлоги, частицы, союзы. Для того, чтобы достигнуть лучшего качества классификации на первом этапе предварительной обработки текстов нужно удалить такие слова. На втором этапе необходимо привести каждое слово к основе, одинаковой для всех его грамматических форм. Именно эти два модуля обработки текстов были реализованы в программе, выполняющей предварительную обработку текстов. Для решения поставленной задачи классификации текстов такой предварительной обработки достаточно.

В качестве критерия, по которому будет формироваться словарь токенов — значащих признаков, наиболее точно характеризующих данный класс, в работе был применен критерий хи-квадрат (СН). Данный показатель используется для того, чтобы проверить независимость двух случайных событий: появление токена  $X$  и появление класса  $Y$ . Критерий  $\chi^2$  на практике вычисляется по следующей формуле:

$$\chi^2 = \frac{|\Omega| * (A * D - C * B)^2}{(A + C) * (B + D) * (A + B) * (C + D)}, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — множество документов обучающей выборки;  $A$  — количество документов, принадлежащих классу  $Y$  и содержащих термин  $X$ ;  $B$  — количество документов, не принадлежащих классу  $Y$  и содержащих термин  $X$ ;  $C$  — количество документов, принадлежащих классу  $Y$  и не содержащих термин  $X$ ;  $D$  — количество документов, не принадлежащих классу  $Y$  и не содержащих термин  $X$ .

Величина критерия хи-квадрат позволяет судить о том, насколько наблюдаемая и ожидаемая вероятности зависят друг от друга. Если  $\chi^2$  принимает значение, равное нулю, то можно говорить о том, что класс и термин независимы.

Существует еще несколько техник, позволяющих оценить важность терминов для классификации. Например, взаимная информация, информационная выгода. Но, в отличие от этих критериев, выбранный в работе хи-квадрат является нормализованным. Это позволяет сравнивать между собой полученные значения  $\chi^2$  для разных терминов одного класса.

### Алгоритм «наивной» байесовской классификации

Алгоритм наивной байесовской классификации использует формулу Байеса для оценки вероятности принадлежности документа классу на обучающем множестве.

$$P(x|d) = \frac{P(d|x)P(x)}{P(d)}, \quad (2)$$

где  $P(x|d)$  – вероятность того, что документ  $d$  принадлежит классу  $x$  (именно её надо рассчитать);  $P(d|x)$  – вероятность встретить документ  $d$  среди всех документов класса  $x$ ;  $P(x)$  – безусловная вероятность встретить документ класса  $x$  во всем множестве документов;  $P(d)$  – безусловная вероятность документа  $d$  в множестве документов.

Образ документа рассматривается как мультимножество терминов. Целью классификации является поиск наилучшего класса для документа, то есть имеющего наибольшую апостериорную (основанную на опыте) вероятность. То есть сначала рассчитывается вероятность для каждого класса, затем выбирается тот класс, который обладает наибольшей вероятностью.

Поскольку  $P(d)$  не влияет на выбор класса, в данной задаче его можно не учитывать и считать, что

$$x_{map} = \max[P(d|x)P(x)]. \quad (3)$$

Наивным данный алгоритм называют потому, что он использует допущение, что слова, входящие в текст документа, не зависят друг от друга. Исходя из этих рассуждений условную вероятность документа  $P(d|x)$  можно найти как произведение условных вероятностей всех слов (а точнее, выбранных по критерию хи-квадрат терминов), входящих в документ. Тогда (3) можно представить в виде:

$$x_{map} = \max_x \left[ P(x) \prod_{i=1}^n P(w_i|x) \right] \quad (4)$$

Если документ имеет достаточно большую длину, придется перемножать большое количество маленьких чисел. Для того чтобы упростить задачу и уменьшить вероятность возникновения ошибки, в выражении (4) вместо самих условных вероятностей используют логарифм этих вероятностей. Так как логарифм функция монотонная, его применение к обеим частям выражения не изменит параметры, при которых достигается максимум.

$$x_{map} = \max \left[ \log(P(x)) + \sum_{i=1}^n \log(P(w_i|x)) \right] \quad (5)$$

Оценки вероятностей можно найти по формулам:

$$P(x) = \frac{D_x}{D}; \quad P(w_i|x) = \frac{W_{ix}}{\sum_{k \in V} W_{kx}}, \quad (6)$$

где  $D_x$  – количество документов, принадлежащих классу  $x$ ;  $D$  – общее количество документов в обучающей выборке;  $W_{ix}$  – количество раз, которое  $i$ -е слово встречается в документах класса  $x$ ;  $V$  – словарь всей коллекции документов (список уникальных слов).

### Алгоритм Роккио

Алгоритм Роккио рассматривает документы в векторном пространстве терминов и ищет границы между классами как множества точек, равноудалённых от центроидов этих классов. Центроидом класса называется усреднённый вектор, или центр масс членов класса:

$$\mu_{c_i} = \frac{1}{D_{c_i}} \sum_{d_i \in c_i} d_i \quad (7)$$

Граница между двумя классами в многомерном пространстве терминов имеет вид гиперплоскости. Правило классификации заключается в определении области, в которую попадает новый документ, то есть в поиске центроида, к которому образ нового документа ближе, чем к остальным центроидам[4].

### Экспериментальное сравнение работоспособности двух алгоритмов Оценка качества классификации текстов

Эффективность классификатора характеризует его способность принимать правильные решения по классификации текстов. Как правило, эффективность классификаторов оценивается с помощью точности  $\pi$ , полноты  $\rho$  и F-меры. Эти значения легко рассчитать на основании матрицы контингентности, которая составляется для каждого класса отдельно (таблица).

**Таблица контингентности**

	Принадлежит классу (P)	Не принадлежит классу (N)
Предсказана принадлежность классу	TP	FP
Предсказано отсутствие принадлежности к классу	FN	TN

В таблице содержится следующая информация:

TP – truepositive, классификатор верно отнёс объект к рассматриваемому классу;

TN – truenegative, классификатор верно утверждает, что объект не принадлежит к рассматриваемому классу;

FP – falsepositive, классификатор неверно отнёс объект к рассматриваемому классу;

FN – falsenegative, классификатор неверно утверждает, что объект не принадлежит к рассматриваемому классу.

$$\pi = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

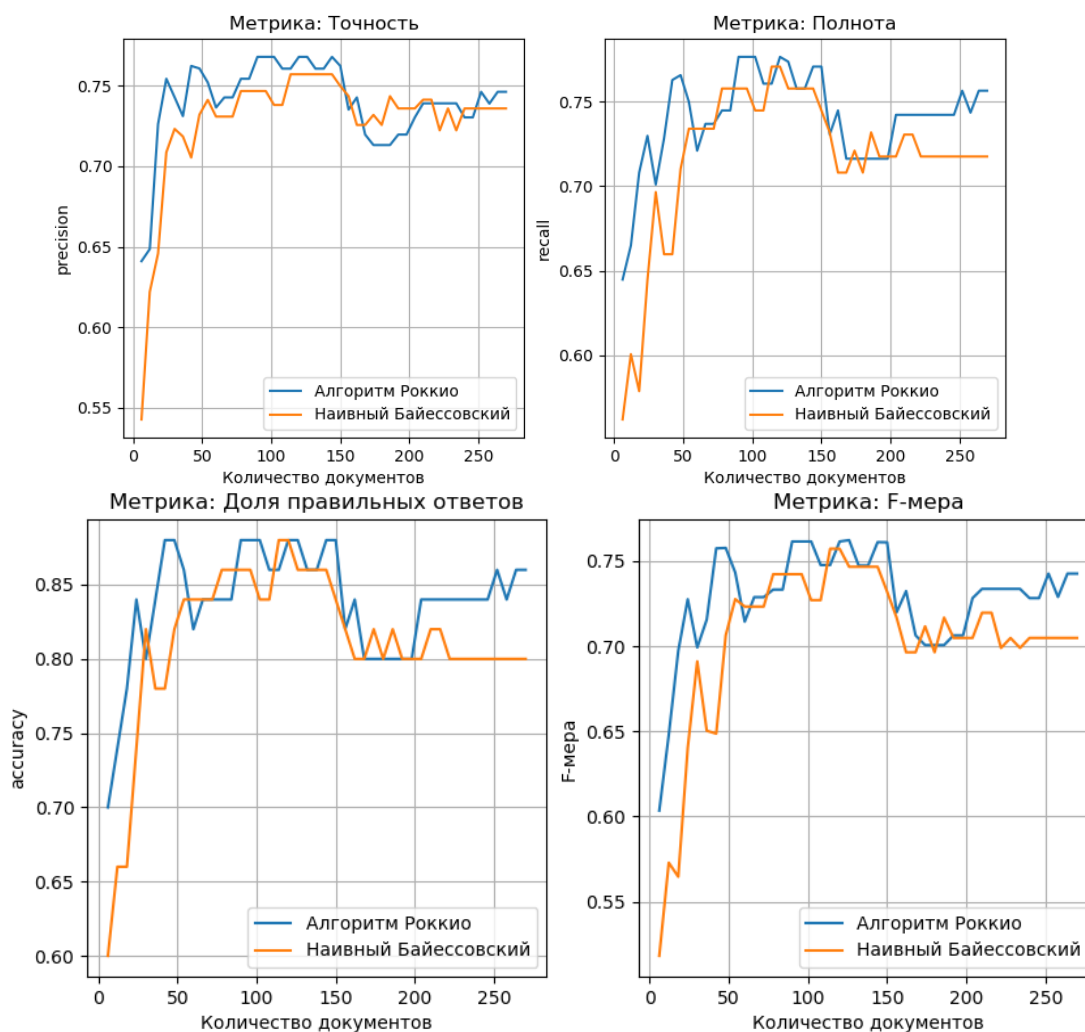
Для многоклассовой классификации точность и полнота определяются для каждого класса в отдельности, а затем находится среднее значение.

F-мера представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремится к нулю.

$$F = 2 * \frac{\pi * \rho}{\pi + \rho} \quad (10)$$

Также параметром, характеризующим классификатор, может быть доля документов, по которым классификатор принял правильное решение (Аккуратность или Assurance):

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (11)$$

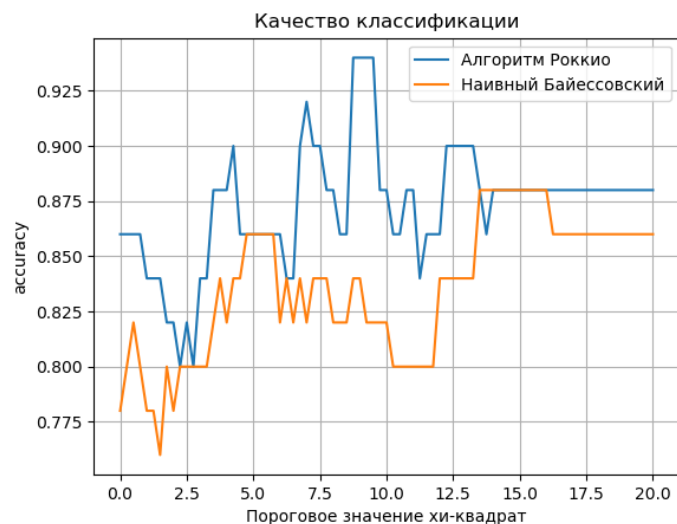


**Рисунок 1. Графики качества классификации**

Опыты проводились на тестовой выборке, состоящей из 50 текстов. Для обучения алгоритмов использовалось 270 уникальных текстов, разделенных на 5 классов. Эксперименты показали, что более точные результаты классификации документов дает применение алгоритма Роккио.

### **Влияние порогового значения критерия хи-квадрат на качество классификации**

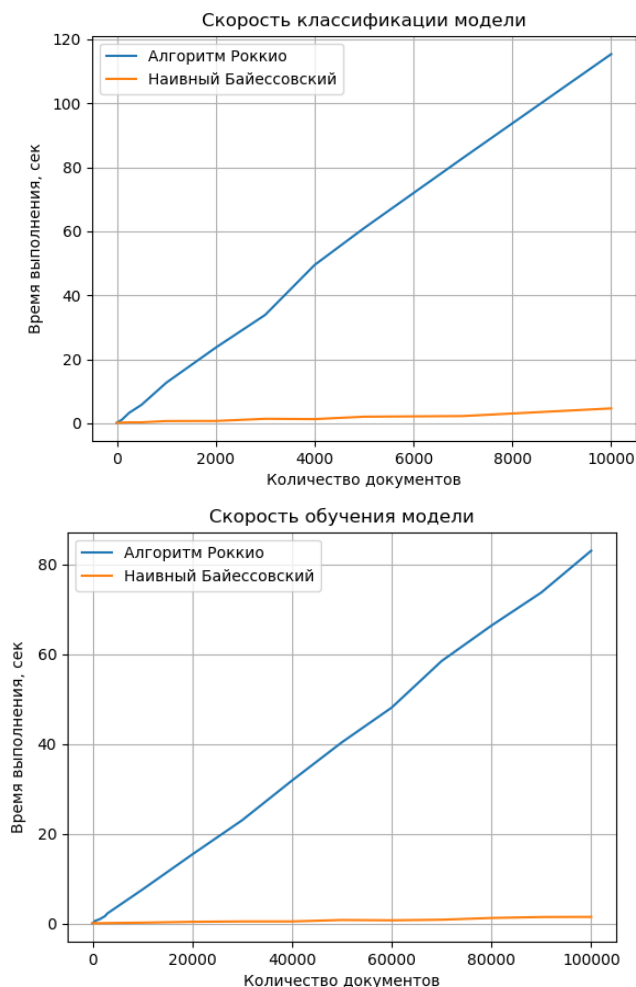
С увеличением величины порогового значения критерия хи-квадрат, из текста отбрасываются слова менее «характерные» для данного класса. Следовательно, качество классификации должно увеличиваться. По графику видно, что именно такая тенденция наблюдается при использовании обоих алгоритмов классификации (рис.2). Однако, очень большая величина порога приведет к снижению доли правильно отсортированных документов, это связано со слишком большим сокращением признаков. Для алгоритма Роккио уменьшение количества значимых признаков приводит ещё и к значительному уменьшению временных затрат необходимых для обучения и тестирования классификатора. Данный факт объясняется высокой сложностью вычислений, производимых в данном алгоритме.



**Рисунок 2. Графики качества классификации в зависимости от величины порогового значения критерия хи-квадрат**

### Оценка скорости классификации и обучения

По графикам, иллюстрирующим скорость классификации и обучения модели, видно, что наименьшие временные затраты требует алгоритм «наивной» байесовской классификации (рис.3). Это связано с простотой вычислений, производимых в данном алгоритме. Эксперимент проводился на искусственно сгенерированных 100000 документах, которые имели 500 уникальных токенов. Документы разделялись на 20 классов.



**Рисунок 3. Графики скорости классификации и обучения алгоритмов**

## Заключение

В работе рассмотрена задача классификации текстовых ЕЯ-документов. Для её решения изучены и реализованы два алгоритма: "наивной" байесовской классификации и Роккио. В ходе экспериментов выяснилось, что алгоритм Роккио работает с большей точностью классификации, однако требует сравнительно длительного времени обучения и тестирования. Также эксперименты показали, что на качество классификации влияет величина порогового значения критерия хи-квадрат, с помощью которого составляется словарь токенов: с увеличением этого значения до некоторой величины качество классификации возрастает.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00926.*

## Библиографический список

1. Статья «Классификация» на ресурсе MachineLearning.ru. <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Классификация>
2. **Большакова, Е.И.** Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика: учеб. пособие / Большакова Е.И., Клышинский Э.С., Ландэ Д.В., Носков А.А., Пескова О.В., Ягунова Е.В. – М.: МИЭМ, 2011. – 272 с.
3. Компьютерная лингвистика / А. Н. Баранов // Большая российская энциклопедия : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. – М. : Большая российская энциклопедия, 2004–2017.
4. Введение в компьютерную лингвистику/ К. К. Боярский// Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 72 с.
- 5., **L.S., Subbotin A. N., Surkova A. S.** NaïveBayesModificationforDataStreamsClassification // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 2017), 2017, vol.2 p. 805-814
6. <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html>

**K.I. Abrosimov, T.V. Lvutina, A. S. Surkova**

## COMPARISON OF THE QUALITY OF THE NAIVE BAYESIAN CLASSIFIER AND THE ROCCHIO ALGORITHM IN TEXT ANALYSIS

Nizhny Novgorod state technical university. R. E. Alekseeva

In this paper, two algorithms for text classification have been studied and implemented programmatically: the "naive" Bayesian classification algorithm and the Rocchio algorithm. For pre-automatic text processing, during which words that are "characteristic" of this class are extracted from the text, the Chi-square criterion is used. The experiments revealed the optimal threshold value of the Chi-square criterion (CHI), which is used to select words from the text that carry the greatest information content. The paper presents experiments aimed at comparing the quality of text classification. Experiments have shown that the "naive" Bayesian classification algorithm requires the least time spent on learning and classification processes. At the same time, the quality of classification, that is, the proportion of documents correctly sorted by class, is higher when using the Rocchio algorithm.

**Keywords:** computer linguistics, data classification, machine learning, naive Bayesian classifier, Rocchio algorithm, Chi-square criterion.

В.В. Андреев<sup>1</sup>, Ю.С. Тарасова<sup>2</sup>, А.В. Чечин<sup>2</sup>

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА  
КЛАССИФИКАЦИИ ТЕСТОВЫХ ФОРМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
COLOURUNIQUEPRO**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород,

<sup>2</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

**Цель:** Рассматриваются конкретные проблемы реализации алгоритма распознавания элементов искомых структур.

**Исследование/методология/подход:** Предлагается ряд решений для выявленных проблем путем усовершенствования алгоритма, подбора фильтра для оптимального перевода цветных изображений в градации серого, а также ввода дополнительных состояний для ячеек выделенной области.

**Выводы:** Усовершенствование алгоритма позволит снизить процент «потери» элементов искомых структур, но, несмотря на это, требуется вывести нижнюю границу выраженности искомой структуры.

**Ограничения/последствия исследования:** Данное исследование является отправной точкой для дальнейших разработок в области управления процессом профориентационного тестирования.

**Оригинальность/ценность:** Программный комплекс ColourUniquePro был использован для профориентационного тестирования абитуриентов и первокурсников, при этом процедура тестирования стала более быстрой, удобной, а применение фильтра позволило измерить выраженность признаков искомой структуры в процентном соотношении.

**Ключевые слова:** элементы, структура, классификация, ячейки, оптимизация, система фильтр.

Программный комплекс ColourUniquePro предназначен для автоматизации и повышения точности процесса профориентационного тестирования по методике «Ассоциативное цветовое пространство» ©[1]. Объектом настоящего исследования являются изображения, получаемые в результате заполнения реципиентом тестовой формы, представляющей собой квазипространство, реализованное в цифровом формате с помощью следующих матриц:

1. Базовые точки внешнего и внутреннего прямоугольника:

$$\text{OutBox} = \begin{vmatrix} \text{Pob}_{11} & \text{Pob}_{12} \\ \text{Pob}_{21} & \text{Pob}_{22} \end{vmatrix},$$

$$\text{InnerBox} = \begin{vmatrix} \text{Pib}_{11} & \text{Pib}_{12} \\ \text{Pib}_{21} & \text{Pib}_{22} \end{vmatrix}.$$

2. Матрица диагоналей, после разбивки:

$$\text{Diag} = \begin{pmatrix} \text{Pd}_{11} & \text{Pd}_{12} & \text{Pd}_{13} & \text{Pd}_{14} & \text{Pd}_{15} & \text{Pd}_{16} & \text{Pd}_{17} \\ \text{Pd}_{21} & \text{Pd}_{22} & \text{Pd}_{23} & \text{Pd}_{24} & \text{Pd}_{25} & \text{Pd}_{26} & \text{Pd}_{27} \\ \text{Pd}_{31} & \text{Pd}_{32} & \text{Pd}_{33} & \text{Pd}_{34} & \text{Pd}_{35} & \text{Pd}_{36} & \text{Pd}_{37} \\ \text{Pd}_{41} & \text{Pd}_{42} & \text{Pd}_{43} & \text{Pd}_{44} & \text{Pd}_{45} & \text{Pd}_{46} & \text{Pd}_{47} \end{pmatrix},$$

где:  $\text{Pd}_{11}=\text{Pob}_{11}$ ,  $\text{Pd}_{21}=\text{Pob}_{12}$ ,... .. $\text{Pd}_{17}=\text{Pib}_{11}$ ,  $\text{Pd}_{27}=\text{Pib}_{12}$ , ...

3. Матрица партий в одном из четырех направлений, после разбивки:

$$S = \begin{pmatrix} \text{Ps}_{11} & \text{Ps}_{12} & \text{Ps}_{13} & \text{Ps}_{14} \\ \text{Ps}_{21} & \text{Ps}_{22} & \text{Ps}_{23} & \text{Ps}_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Ps}_{71} & \text{Ps}_{72} & \text{Ps}_{73} & \text{Ps}_{74} \end{pmatrix},$$

где:  $\text{Ps}_{11}=\text{Pd}_{11}$ ,  $\text{Ps}_{14} = \text{Pd}_{21}$  и т.д.

4. Матрица ячеек в одном из четырех направлений:

$$\text{Cells} = \begin{pmatrix} \text{C}_{11} & \text{C}_{12} & \text{C}_{13} \\ \text{C}_{21} & \text{C}_{22} & \text{C}_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ \text{C}_{61} & \text{C}_{62} & \text{C}_{63} \end{pmatrix},$$

где каждая ячейка состоит из боковых точек:

$$\text{C}_{11} = \begin{vmatrix} \text{Ps}_{11} & \text{Ps}_{12} \\ \text{Ps}_{21} & \text{Ps}_{22} \end{vmatrix}.$$

Координаты местоположения ячейки (C) имеют следующее соотношение:

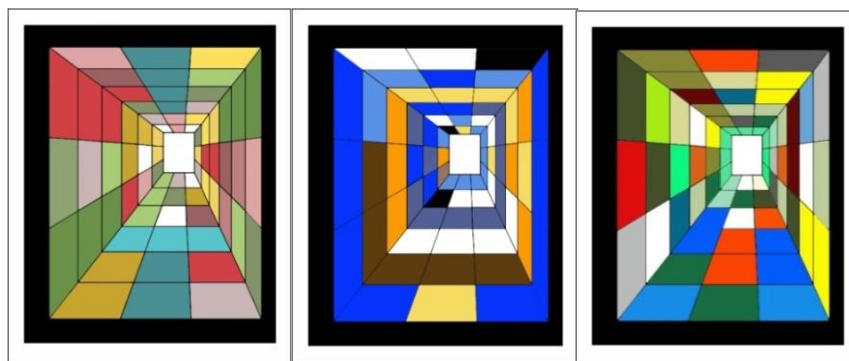
$$C = f(P; k; B; D; S),$$

где P-координаты базовых точек внешнего прямоугольника, k-степень сжатия ячеек, B-блок квазипространственной модели, D – диагональ, S – стороны.

На рис.1 представлены некоторые готовые цветные изображения, полученные с помощью программного модуля ColourUnique M, использующегося на кафедре Промышленного дизайна ФАиД ННГАСУ в качестве инструмента входного мониторинга индивидуального стиля деятельности (ИСД) первокурсников [2].

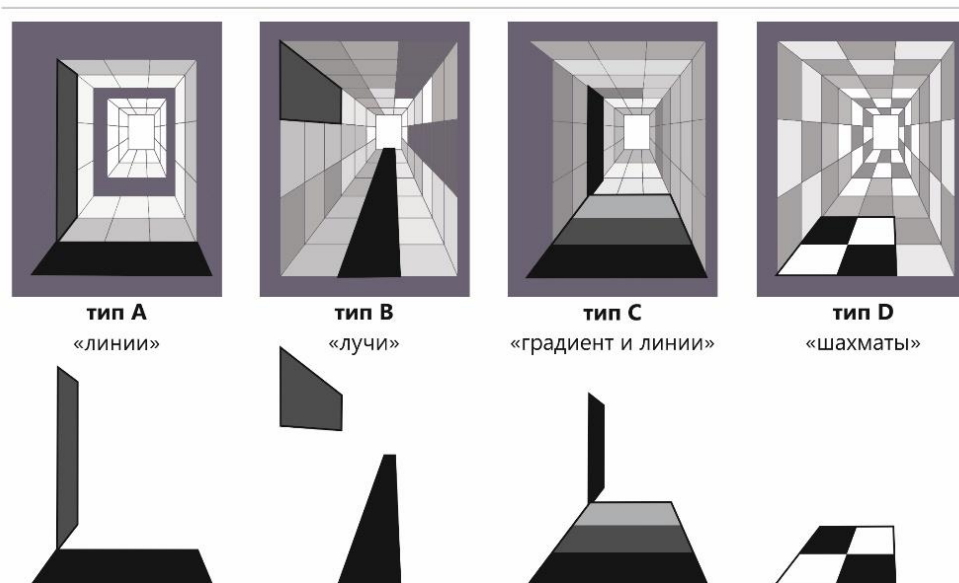
Для пользователя тестовая форма выглядит как квазипространство, что обусловлено спецификой процедуры тестирования, для анализа и дальнейшей классификации готовые тестовые формы преобразовываются в развертки, где каждая ячейка принимает форму квадрата, а каждая сторона квазипространства принимает вид прямоугольника с соотношением сторон, равном 3x6 ячеек (планигон).





**Рисунок 1. Примеры изображений (готовых тестовых форм), получаемых при использовании программного модуля ColourUniqueM**

На данный момент искомых структур всего пять, и для каждого планируется ввести специфический фильтр, выявляющий элементы, свойственные только определенной искомой структуре [3]. В рамках данного исследования авторы остановились на решении проблем реализации выявления и анализа элементов «шахматной» структуры для изображений типа D (рис. 2).



**Рисунок 2. Некоторые типы искомых структур и их элементы**

Структура D условно называется «шахматной» так как отличается чередованием темных и светлых ячеек. В идеальном состоянии, данная структура состоит из темных и светлых ячеек, располагающихся строго по диагонали во всем квазипространстве. Но «чистая» структура встречается нечасто, поэтому анализатор проектировался с целью распознавания и оценки «шахматоподобных» фрагментов, где диагональное расположение темных и светлых ячеек «смазано» за счет малой разницы степеней насыщенности ячеек, либо «скрыто» за счет использования близких оттенков.

Для распознавания элементов искомой структуры D авторами предлагается использовать область изображения 2x2 ячейки с наложением в один ряд. Каждая из ячеек может принимать одно из четырех основных состояний (см. рис. 3).

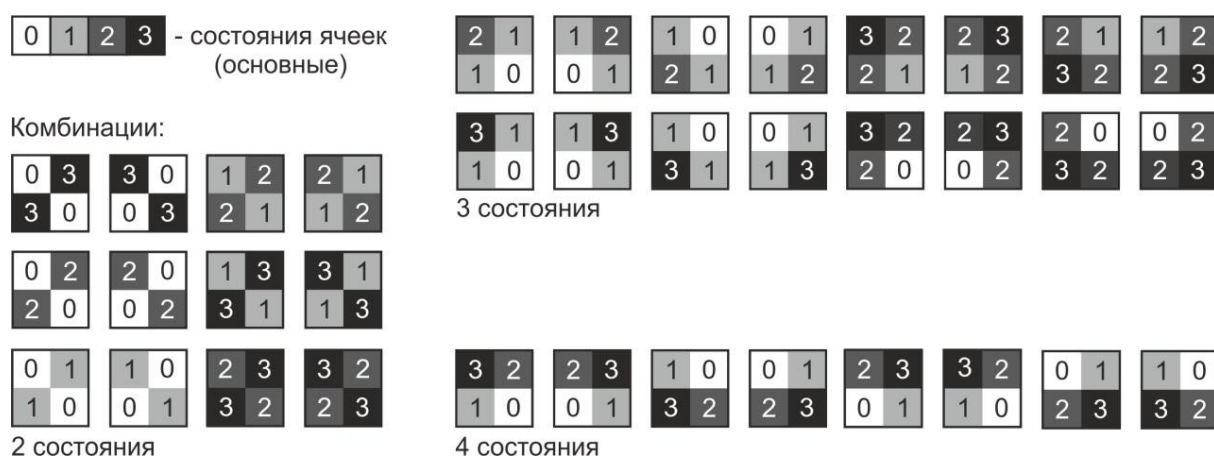


Рисунок 3. Основные состояния ячеек

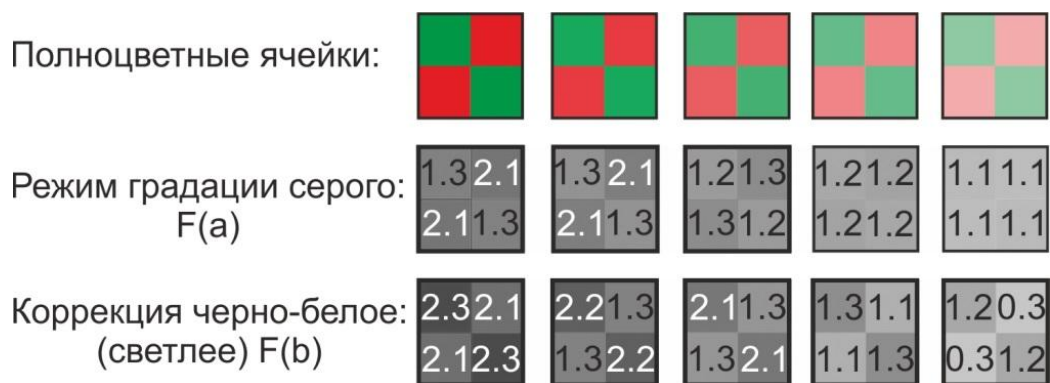
Состояния ячеек определяются следующими диапазонами цветовой системыСМУКдля градаций серого:

- 0 – С:0, М:0, Y:0, К:0-24 (0-24% черный);
- 1 – С:0, М:0, Y:0, К:25-49(25-49 % черный);
- 2 – С:0, М:0, Y:0, К:50-74(50-74% черный);
- 3 – С:0, М:0, Y:0, К:75-100(75-100% черный).

Перевод полноцветного изображения в градации серого производится с целью оптимизации процесса анализа и оценки структуры, так как даже при условии использования оптимизированной палитры, содержащей ограниченное количество цветов и оттенков, конечное число полноцветных комбинаций «шахматных» и «шахматоподобных» областей слишком велико. Использование диапазонов шкалы Ксистемы СМУК позволяет сократить количество комбинаций для областей. Предполагается следующий алгоритм выявления и анализа элементов искомой структуры типа D:

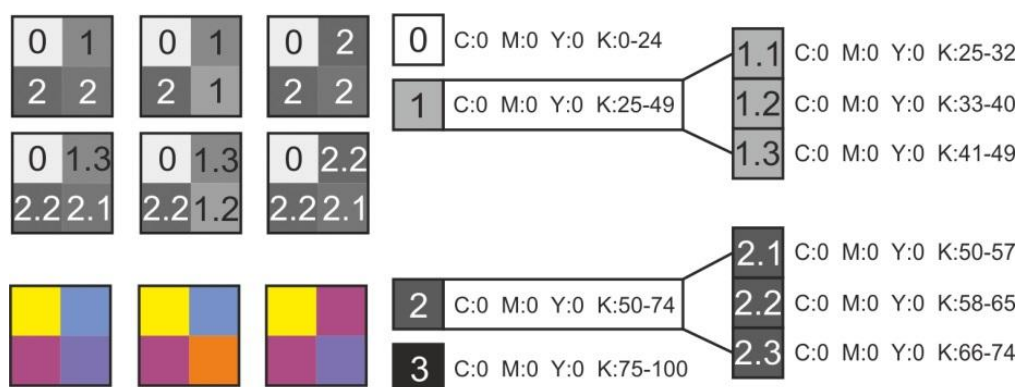
- 1) разбивка развертки квазипространства на планигоны, где один планигон соответствует одной плоскости квазипространства;
- 2) перевод изображения в градации серого;
- 3) анализ областью 2x2 во всех базовых комбинациях с наложением в один ряд из двух ячеек;
- 4) подсчет количества совпадающих областей и их общего процентного соотношения выраженности (каждой комбинации присваивается степень выраженности соответствия структуре d).

В процессе реализации алгоритма возникла проблема выявления элементов «шахматных» и «шахматоподобных» структур в случае использования реципиентом цветов, имеющих близкие степени насыщенности, например: красный-зеленый, красный-оранжевый. В случае простого перевода изображения в градации серого, структурные элементы «теряются» (см. рис. 4).



**Рисунок 4. Два фильтра для перевода полноцветных ячеек в градации серого, где фильтр F(a) – простой перевод изображения в градации серого, фильтр F(b) – «светлый» черно-белый режим графического редактора с настройками насыщенности для каждого тона**

Второй проблемой реализации алгоритма послужила нехватка набора базовых комбинаций для распознавания «неявных» и «скрытых» элементов искомой структуры D, особенно в случае, когда реципиент использует три или четыре разных по тону цвета для оформления области 2x2 (см. рис. 5).



**Рисунок 5. Дополнительные состояния ячеек**

Третья проблема – обозначение порога выраженности признака, за которым структуру следует признать нечеткой для определения выраженности типа D, исключая тем самым тип D как определяющий для ИСД индивида.

Частично первую из обозначенных проблем решает применение специфического фильтра с индивидуальными настройками для каждого тона (фильтр F(b)). Как видно из рис. 4, данный фильтр позволил распознать все представленные структуры, в то время как при простом переводе изображения в градации серого (фильтр F(a)) две структуры были «потеряны» как визуально, так и для областей с дополнительными комбинациями ячеек (см. рис. 5). В дальнейшем планируется усовершенствовать фильтр для перевода изображений в градации серого с целью поиска баланса контрастности для выявления всех возможных комбинаций искомых элементов, что позволило бы максимально снизить вероятность их «потери».

Вторая проблема решается введением дополнительных диапазонов и, соответственно, – дополнительных состояний для ячеек, что позволяет выявить элементы искомой структуры (см. рис. 5).

Третья проблема будет решаться в процессе реализации описанного алгоритма, путем оценки и сравнения результатов машинного анализа для каждой тестовой формы, что позволит выявить порог «проявления» искомой структуры D.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### Библиографический список

1. **Tarasova, I.S.** Implementation of algorithms of image analysis in the software package ColourUnique PRO with the aim of increasing the accuracy of classification types individuals / I.S. Tarasova, A.V. Chechin , V.V. Andreev // Computer Graphics and Vision. Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision. Bryansk, Russia, September 23-26, 2019. – P.189-193.

2. **Григорьева, М.В.** Психология труда. Конспект лекций [Текст] / М.В. Григорьева. – М.: Высшее образование, 2006. – 192 с.

3. **Шаповал, А.В.** Теория формальной композиции: учебное пособие для вузов / А.В. Шаповал. – Казань: «Дизайн-квартал», 2016. – 175 с.

**V. V. Andreev<sup>1</sup>, I. S. Tarasova<sup>2</sup>, A. V. Chechin<sup>2</sup>**

### THE PROBLEMS AND PROSPECTS OF IMPLEMENTING THE ALGORITHM FOR CLASSIFYING TEST FORMS OF THE COLORUNIQUE PRO SOFTWARE PACKAGE

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev,

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

**Purpose:** The Specific problems of implementing the algorithm for recognizing elements of the desired structures are considered.

**Design/methodology/approach:** A number of solutions are Proposed for the identified problems by improving the algorithm, selecting a filter for optimal translation of color images in grayscale, and entering additional States for the cells of the selected area.

**Findings:** Improving the algorithm will reduce the percentage of " loss " of elements of the desired structures. However, it is necessary to deduce the lower limit of the severity of the desired structure.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of managing the process of career guidance testing.

**Originality/value:** Moreover, the ColorUnique Pro software package was used for professional orientation testing of applicants and first-year students, while the testing procedure became faster and more convenient, and the use of a filter allowed us to measure the severity of signs of the desired structure as a percentage.

**Key words:** elements, structure, classification, cells, optimization, filter.

О.В. Андреева, А.С. Цилих

## РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ЗАДАЧИ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Задача обнаружения дефекта в стали и его последующая классификация – одна из актуальных задач в области разработки систем мониторинга и контроля качества на производстве. Результаты обнаружения дефекта, обычно, используются как исходные данные для решения задачи классификации брака для последующего улучшения производства и уменьшения затрат на предприятии. В основе предлагаемого в данной статье метода лежит новый подход к вычислению признакового описания изображения, построенный на основе теории активного восприятия. Предлагаемый метод включает два этапа: предварительную обработку изображения, изменение его параметров. И этап распознавания, и классификации дефекта на 4 группы согласно классификатору дефектов. Тестирование метода выполнено на наборе данных, содержащем 12000 изображений, включающих изображения каждого дефекта. Выполняется сравнение результатов работы графиком потерь и проценте правильности предсказаний.

**Ключевые слова:** обнаружение дефекта в стали, обнаружение объекта, теория активного восприятия, распознавание образов, формирование признакового описания, классификация.

### Введение

Высокая конкурентная борьба между предприятиями, выпускающими продукцию из стали, заставляет производителей повышать качество выпускаемой продукции, усложнять и модернизировать производство, постоянно следить за получаемым результатом. Во многих машиностроительных, приборостроительных предприятиях и других отраслях промышленности выпускающих высокоточные детали и изделия для авиационной, железнодорожной, автомобильной, судостроительной и другой техники, возникает необходимость постоянно контролировать выпускаемую продукцию, своевременно изымать брак из партии и поддерживать качество продукции. От качества производимых материалов зависят все последующие характеристики готовых изделий. Компьютерное распознавание дефектов с использованием нейронных сетей позволяет эффективно находить в стали дефекты и способно вывести дефектоскопию на производстве на качественно новый уровень. Наличие интеллектуальной системы распознавания дефектов в потоке производства позволяет оперативно реагировать на их появление и тем самым повысить выход годного, что является целью любого предприятия. Дефектоскопия на производстве позволяет уменьшить, а иногда и полностью исключить риск тяжелых аварий в различных отраслях промышленности, на транспорте, в энергетике, нефте- и газодобыче, при транспортировке и переработке энергоносителей.

### Методология. Предварительная обработка изображения

Этап предварительной обработки изображений заключается в изменении размера изображения, и нормализации значений пикселей на картинке к формату числа с плавающей точки.

В матрице яркостей изображения максимально возможный элемент 255, поэтому произведем нормализацию по данному значению.

$$I_{rgb} = \frac{(R)}{255} + \frac{(G)}{255} + \frac{(B)}{255},$$

где  $I_{rgb}$  – цветное изображение; R–канал красного цвета; G – канал зеленого цвета; B – канал синего цвета.

Также каждое изображение нужно дополнить маркером с типом дефекта, зашифрованным в таблице.

Все картинки будут представлены как float32.

Для лучшего процесса обучения, обучающую выборку следует перемешать, те же преобразования следует выполнить и с маркерами изображений.

### **Этап распознавания изображения и его классификации**

Распознавание и классификация дефектов в стали для компьютера сложный процесс, поэтому стандартные алгоритмы не могут выполнять данный вид деятельности. Существующие исследования в данной области говорят о том, что нейронные сети являются наиболее подходящим алгоритмом классификации и нахождения дефектов.

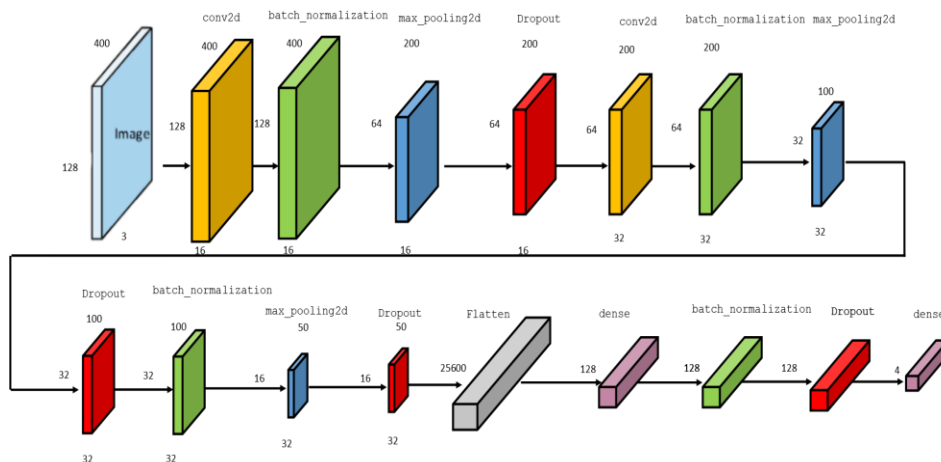
Для распознавания дефектов в стали будет использоваться язык программирования Python 3, открытая программная библиотека TensorFlow[3], открытая нейросетевая библиотека Keras[1] и библиотека алгоритмов компьютерного зрения OpenCV[2]. Для обучения и проверки работы будет использоваться датасет с сайта kaggle.com подготовленный компанией Северсталь. Данный датасет [5] содержит более 12 тысяч тренировочных изображений, с четырьмя типами дефектов на изображении. Разрешение изображений 1600x256 пикселей. Количество изображений было увеличено изменением их размера и разворотом на 180 градусов.

В качестве архитектуры была выбрана последовательная модель с входным разрешением 128 \* 400 пикселей[4]. Все фотографии были приведены к данному размеру. Модель состоит из двух сверточных слоев (Conv2D), с функцией выпрямленной линейной функцией активации (Activation("relu")), 4 слоями нормализации (BatchNormalization), тремя слоями усреднения значений (MaxPooling2D) и слоем сглаживающего выхода (Flatten). Также в модели имеются слои исключения. Последний слой нейронной сети – это полно связанный слой с количеством нейронов равным количеству типов дефектов с функцией активации softmax. Схема нейронной сети представлена на рисунке 1. В качестве общего оптимизатора выступает оптимизационный алгоритм Adam (adaptive moment estimation). Он сочетает в себе и идею накопления движения, и идею более слабого обновления весов для типичных признаков.

Подписи к изображениям, а также места дефектов указаны в файле электронной таблицы train.csv.

Таблица состоит из двух колонок, первая колонка – это название изображения, вторая – это маска дефекта, закодированная RLE алгоритмов. Название каждой фотографии указано 4 раза, т.к. дефектов 4 типа. На каждый тип дефекта своя маска. Маркер типа дефекта – это окончание названия файла образованный добавлением нижнего подчеркивания и условного номера дефекта. Для изменения фотографий, например поворота на определенный градус

следует перевернуть и маску дефекта аналогично фотографии, для этого используется обратный RLE алгоритм.



**Рисунок 1. Схема нейронной сети**

Проанализировав дефекты на изображениях, удалось получить четыре самых ярких варианта дефекта.



**Рисунок 2. Дефект 1 типа**

На рис. 2 показан дефект первого типа, все дефекты выделены красным цветом. Дефект имеет малый размер и часто расположен на большей части детали.



**Рисунок 3. Дефект 2 типа**

На рис. 3 представлен дефект второго типа, дефект выделен синим цветом. Дефект чаще всего узкий и длинный, похож на трещину, располагается в одной части фото, выделен синим.



**Рисунок 4. Дефект 3 типа**



На рис. 4 представлен третий тип дефекта, дефект выделен зеленым цветом. Дефект занимает большую площадь, похож царапины большой площади.



Рисунок 5. Дефект 4 типа

На рис. 5 представлен четвертый тип дефекта. Данный дефект – это большая по площади глубокая вмятина, чаще всего располагается на одной части фотографии, на рисунке представлен фиолетовым цветом.

Также при анализе данных была выведена зависимость дефекта и количества пикселей на изображении. Диаграмма показывающая, номер дефекта и его площадь представлена на рис. 6. Левая диаграмма говорит о частоте дефекта, правый график показывает площадь дефекта.

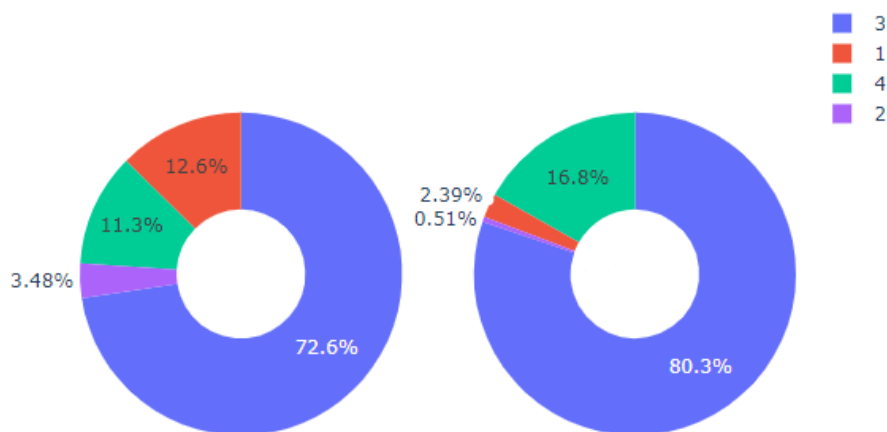


Рисунок 6. Площадь дефектов

График обучения представлен на рис. 7.



Рисунок 7. График обучения



Для оценки правильности и точности предсказаний использовался встроенный в библиотеку Keras метод `model.evaluate`. Этот метод возвращает значения потерь и метрики для модели в тестовом режиме. Расчет производится партиями. Так как данные загружаемые в модель никогда не учувствовали в обучении то результатам предсказаний можно доверять.

### Заключение

В процессе работы была построена нейронная сеть, распознающая дефекты в стали с вероятностью 67,64% на незнакомой выборке. Был изучен функционал языка программирования Python, библиотек TensorFlow, Keras и OpenCV для построения нейронных сетей. Были собраны, обработаны и проанализированы данные по дефектам в стали на изображении.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. Keras: The Python Deep Learning library // [keras.io](https://keras.io/)сайт – URL <https://keras.io/> (датаобращения 01.01.2020)
2. Open Source Computer Vision Library // [opencv.org](https://opencv.org/)сайт – URL <https://opencv.org/>(датаобращения 15.01.2020)
3. End-to-end open source platform for machine learning // [tensorflow.org](https://www.tensorflow.org/)сайт – URL <https://www.tensorflow.org/>(датаобращения 23.01.2020)
4. Как начать работу с Keras, DeepLearning и Python // [reg.ru](https://www.reg.ru/blog/keras/) сайт - URL <https://www.reg.ru/blog/keras/>(дата обращения 01.02.2020)
5. Severstal: Steel Defect Detection Can you detect and classify defects in steel? // [kaggle.com](https://www.kaggle.com/c/severstal-steel-defect-detection) сайт–URL <https://www.kaggle.com/c/severstal-steel-defect-detection>(датаобращения 02.02.2020)
6. **Утробин, В. А.** Элементы теории активного восприятия изображений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексева, 2010. – Т. 81, № 2. – С. 61-69.
7. **Rosebrock, A.,**Deep\_Learning\_for\_Computer\_Vision, 2017. -332с

**O. V. Andreeva, A. C. Tsilich**

### Detection and classification of steel defects using neural networks

Nizhny Novgorod state technical university. a. R. E. Alekseev

The task of detecting a defect in steel and its subsequent classification is one of the current tasks in the development of monitoring and quality control systems in production. The results of defect detection are usually used as initial data for solving the problem of defect classification for further production improvement and cost reduction at the enterprise. The method proposed in this article is based on a new approach to calculating a characteristic description of the image, based on the theory of active perception. The proposed method includes two stages: preliminary processing of the image, changing its parameters. Both stages of recognition and classification of the defect into 4 groups according to the defect classifier. Testing of the method is performed on a data set containing 12000 images including images of each defect. The results are compared by loss graph and percentage of correct predictions.

**Keywords:** defect detection in steel, object detection, theory of active perception, pattern recognition, attribute description formation, classification.

О.В. Андреева, Д.В. Тоскин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ ОБЛАКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ СО СПУТНИКА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В рамках данной работы было проведено сравнение коэффициентов классификации четырех различных архитектур нейронных сетей (Unet, FPN, PSPNet, PAN). В качестве метрики для оценки точности классификации обученной сети был выбран коэффициент Дайса. Точность распознавания и классификации 4 разных классов скоплений составляет от 31.8 до 42.4%.

**Ключевые слова:** классификация, облака, скопления маленьких облаков, нейронные сети, изображения со спутника.

**Введение**

Скопления облаков трудно классифицировать ввиду их постоянной изменчивости. Рамки между разными группами бывают очень тонки и не всегда различимы. Именно поэтому важно подобрать такую модель нейронной сети, которая смогла бы лучше всего классифицировать такие скопления, экономя время исследователей и учёных. Некоторые модели уже были рассмотрены в других работах [1], но есть ещё множество архитектур нейронных сетей, подходящих для классификаций.

Архитектура Pyramid Attention Network (PAN) [2] состоит из предобученной на базе ImageNet сети ResNet-101 со стратегией расширенной свертки для извлечения карты объектов. Расширенная свертка с шагом 2 применяется к блокам res5b, поэтому выходной размер функции карты из ResNet - это 1/16 входного изображения, как в модели DeepLabv3+. Также был заменен слой свертки размером 7x7 из оригинальной ResNet-101 на три 3x3 сверточных слоя, как в моделях PSPNet и DUC.

В Feature Pyramid Network (FPN) [3] слои, извлечённые с помощью свёрточной нейронной сети, рассматриваются как иерархическая «пирамида», в которой нижние слои имеют высокое разрешение, но низкие обобщающие признаки; верхние - наоборот. Архитектура FPN позволяет объединить достоинства верхних и нижних слоёв, для этого карта каждого вышележащего слоя увеличивается до размера нижележащего, поэлементно складывая содержимое. Итоговое предсказание состоит из результатов всех уровней. Схематичное изображение предоставлено на рис. 1.

Архитектура нейронной сети Pyramid scene parsing network (PSPNet) [4] предоставлена на рис. 2. В ней использована предобученная модель ResNet с расширенной стратегией для извлечения карты признаков. Размер результирующей карты признаков составляет 1/8 входного изображения, который показан на рис. 2, *b*. Архитектура нейронной сети Pyramid scene parsing network (PSPNet) [4] представлена на рис. 2. В ней использована предобученная модель ResNet с расширенной стратегией для извлечения карты признаков. Размер результирующей карты признаков составляет 1/8 входного изображения, который показан на рис. 2, *b*.

Затем используется модуль объединения пирамид, показанный на рис. 2, *с* для сбора контекстной информации. Используя 4-уровневую пирамиду, объединённые ядра покрывают всю, половину и небольшую часть изображения. Затем все эти части объединяются в финальную часть, показанную на рис. 2, *с*. За ним следует слой свертки, чтобы создать карту прогнозирования, показанный на рис. 2, *д*.

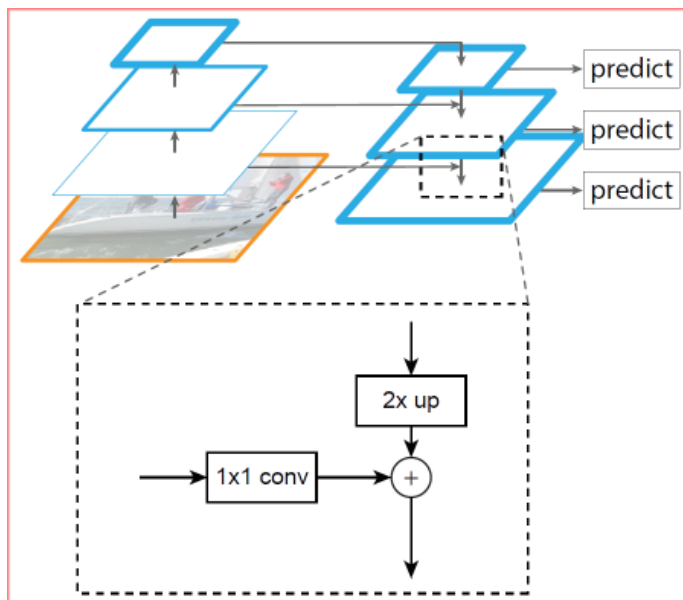


Рисунок 1. Архитектура “Feature Pyramid Network” (FPN)

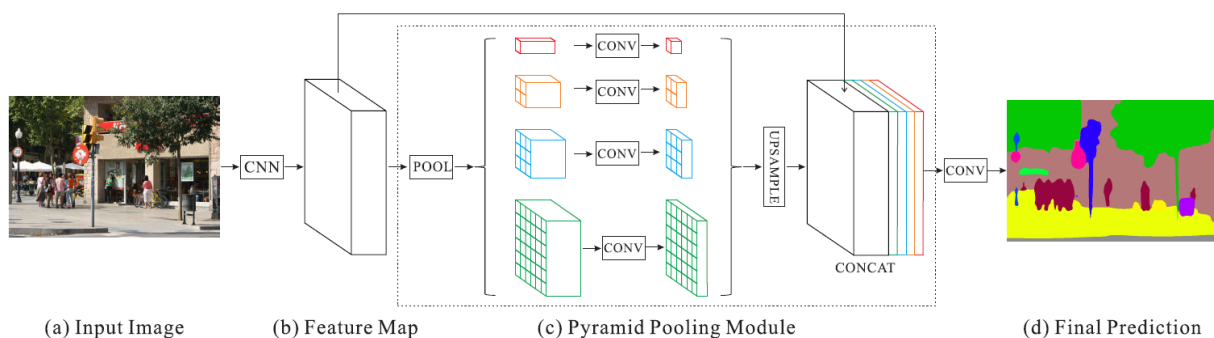


Рисунок 2. Архитектура “Pyramid scene parsing network” (PSPNet)

Архитектура сети U-net [5] приведена на рис. 3. Она состоит из сужающегося пути (слева) и расширяющегося пути (справа). Сужающийся путь состоит из повторного применения двух сверток  $3 \times 3$ , за которыми следует выпрямленный линейный блок (ReLU) и операция максимального объединения ( $2 \times 2$  степени 2) для понижения разрешения. На каждом этапе понижающей дискретизации каналы свойств удваиваются. Каждый шаг в расширяющемся пути состоит из операции повышающей дискретизации карты свойств, за которой следуют:

- свертка  $2 \times 2$ , которая уменьшает количество каналов свойств;
- объединение с соответствующим образом обрезанной картой свойств из стягивающегося пути;
- две  $3 \times 3$  свертки, за которыми следует ReLU.

На последнем слое используется свертка  $1 \times 1$  для сопоставления каждого 64-компонентного вектора свойств с желаемым количеством классов. Всего сеть содержит 23 сверточных слоя.

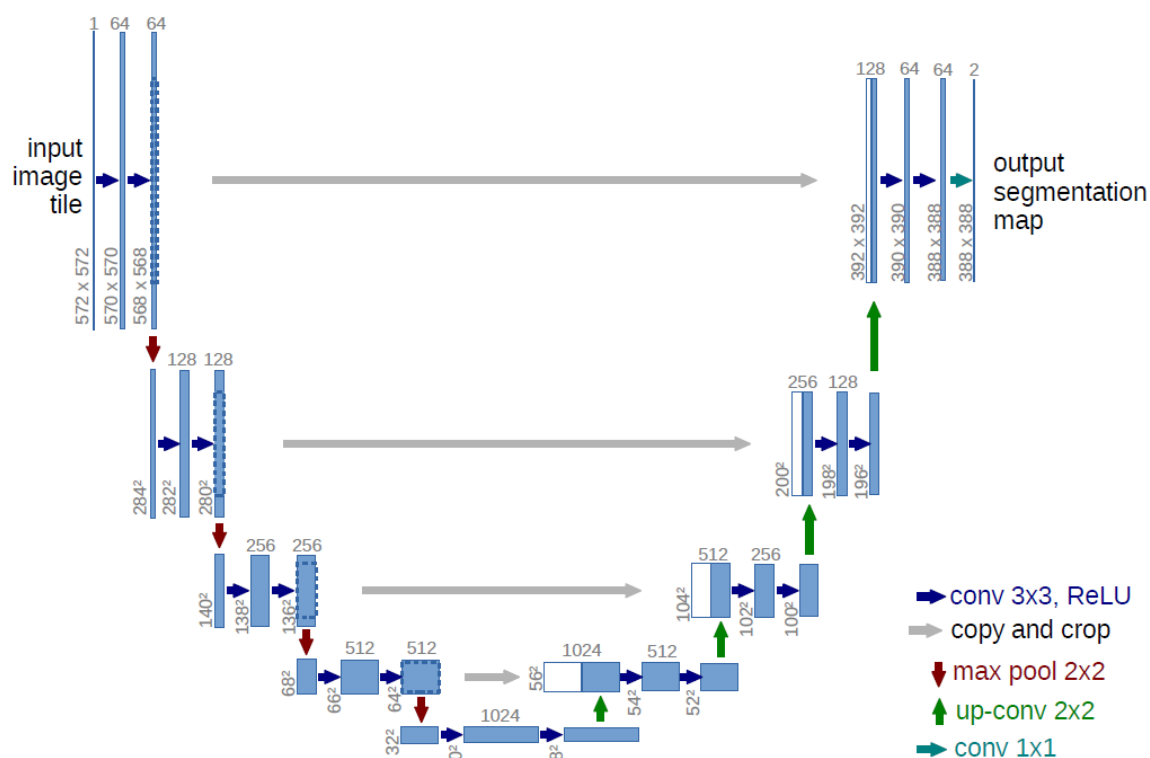


Рисунок 3. Архитектура U-net

## Методология

Модели классификации были построены с использованием языка Python, обучение и тестирование производилось с помощью облачных вычислений на платформе kaggle [6].

Для обучения и оценки сети считается коэффициент Дайса (Dicecoefficient), который показывает меру сходства [1].

Чтобы уменьшить размер обучающего и выходного файла (с записями координат для отрисовки масок), были использованы кодированные значения пикселей, состоящие из пары значений - стартовой позиции и занимаемого количества пикселей. После обучения и последующего предсказания скоплений на фотографиях из тренировочного набора изображений происходит генерация выходного файла координат масок, также состоящего из кодированных значений. Полученная область на каждой тренировочной фотографии сравнивается с областью, которая была закреплена в файле с тренировочными данными. Чем выше пересечение масок – тем выше коэффициент предсказания. Пример изображения с наложенной на него маской предоставлен на рис. 4.

Обучающая база из 5500 фотографий была расширена с помощью аугментации: отражение по горизонтали, отражение по вертикали, случайный поворот на 90 градусов, эластичная трансформация, сжатие, вытягивание, обтекание.

Для классификации были выбраны четыре модели нейронных сетей, входящих в одну библиотеку на языке Python, “segmentation\_models.pytorch” (Unet, FPN, PSPNet, PAN) [7]. Также эта библиотека была выбрана из-за того, что она поддерживает кодировщики, значи-

тельно облегчающие расшифровку, отрисовку и кодировку масок, обозначающих скопление облаков.

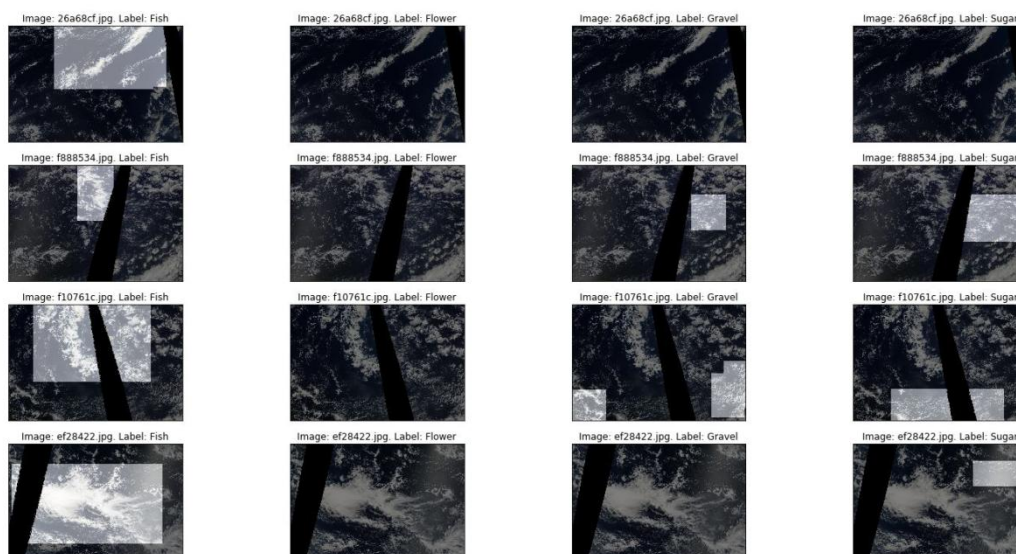


Рисунок 4. Раскодированные маски на изображениях

Данные, полученные после обучения и последующей тренировки каждой модели, представлены в таблице.

#### Полученные коэффициенты моделей

Название модели	Коэффициент классификации
FPN	0.31871
PAN	0.38935
Unet	0.41915
PSPNet	0.42463

#### Заключение

В распознавании и классификации четырех классов скоплений облаков лучше себя показала нейронная сеть PSPNet с коэффициентом 0.42463 (42.46%). Такой коэффициент говорит о сложностях с распознаванием скоплений облаков ввиду нечётких границ каждого класса скоплений и их внешней схожести.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-20720.*

#### Библиографический список

1. **Андреева, О.В.** Классификация скоплений облаков по изображениям со спутника / О.В. Андреева, Ю.С. Тарасова, Д.В. Тоскин // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2019. № 12. С. 40-43.
2. **Hanchao Li, Pengfei Xiong, Jie An, Lingxue Wang.** Pyramid Attention Network for Semantic Segmentation. arXiv:1805.10180v3, 2018.

3. **Tsung-Yi Lin**, Piotr Dollar, Ross Girshick, Kaiming He, BharathHariharan, and Serge Be-longie. Feature Pyramid Networks for Object Detection. arXiv:1612.03144v2, 2017.
4. **Hengshuang Zhao**, Jianping Shi, Xiaojuan Qi, Xiaogang Wang, Jiaya Jia. Pyramid Scene Parsing Network. arXiv:1612.01105v2, 2017.
5. **Olaf Ronneberger**, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv:1505.04597v1, 2015.
6. Техническая информация облачной платформы / Kaggle. – URL: <https://www.kaggle.com/docs/kernels#technical-specifications>
7. Segmentation models / Pavel Yakubovskiy // Github. – URL: [https://github.com/qubvel/segmentation\\_models.pytorch](https://github.com/qubvel/segmentation_models.pytorch)

**O.V. Andreeva, D.V. Toskin**

## **USING NEURAL NETWORKS TO RECOGNIZE CLOUD CLUSTERS FROM SATELLITE IMAGES**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

In this work were compared the classification coefficients of 4 different neural network architectures (Unet, FPN, PSPNet, PAN). The dice coefficient was chosen as a metric for evaluating the accuracy of the trained network classification. The accuracy of cluster recognition and classification ranges from 31.8 to 42.4%.

**Keywords:** classification, clouds, clusters of small clouds, neural networks, satellite images.

**Р.О. Баринов, В.Е. Гай**

## **ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА С ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена разработке системы с естественно-языковым интерфейсом для помощи абитуриентам и студентам первого курса НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. Актуальность данной темы возникает из отсутствия единой справочной системы, которая помогала бы абитуриентам и студентам первого курса, в интерактивном режиме (режим чат-бота), ориентироваться в корпусах университета, а также предоставляла бы всю необходимую справочную информацию, связанную с университетом, общежитиями и транспортом. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы с использованием классификатора на основе нейронной сети, а также методов мешок слов и TF-IDF с применением коэффициента Отиаи.

**Ключевые слова:** чат-бот, система помощи первокурснику, нейронные сети, NLTK, мешок слов, TF-IDF, коэффициент Отиаи.

### **Введение**

В настоящее время существует достаточно большое количество различных систем, помогающих пользователям ориентироваться в городе, искать необходимые места и транспорт. Однако данные системы направлены, в первую очередь, на решение проблем геопозиционирования и поиска необходимого транспорта и практически не предоставляют пользователям конкретной справочной информации, за исключением телефонных номеров организаций и ссылок на веб-сайты. В свою очередь, на веб-сайтах организаций, в большинстве случаев, есть необходимая справочная информация, однако пользователь вынужден тратить время на поиск нужных ему данных.

Задача, на решение которой направлена данная работа – разработка программной системы с естественно-языковым интерфейсом для помощи абитуриентам и первокурсникам НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, включающей в себя всю необходимую справочную информацию, связанную с университетом, студгородком и общежитиями, транспортом и маршрутах проезда в одном месте.

В рамках поставленной задачи планируется выполнить следующие подзадачи:

- составить базу данных со всей необходимой справочной информацией;
- разработать программное обеспечение для классификации запроса пользователя с помощью нейронной сети;
- разработать программное обеспечение с применением метода tf-idf и коэффициента Отиаи для поиска необходимой информации и генерации ответа пользователю;

### **Описание задачи разработки программной системы с естественно-языковым интерфейсом**

Существует две основные модели построения систем с естественно-языковым интерфейсом: генеративная модель и выборочная (поисковая) модель.

Генеративная модель:

- может генерировать произвольный ответ;
- склонна к несоответствию ответа и поставленного вопроса;
- может генерировать ответ в ошибочной грамматической и синтаксической форме;
- требуется большое число данных для обучения модели.

Выборочная (поисковая) модель:

- ограниченный набор заготовленных ответов;
- всегда генерирует ответ в правильной (заданной) грамматической и синтаксической форме;
- не требуется большое число данных для обучения модели.

В данной работе будет использоваться выборочная модель системы, из-за её преимущества в генерации ответа в правильной грамматической форме, а также из-за отсутствия необходимости большого числа данных для обучения модели.

### Архитектура системы классификации запроса пользователя и генерации ответа

Архитектура системы классификации запроса пользователя и генерации ответа состоит из следующих этапов:

- предварительное обучение нейронной сети для классификации запроса пользователя (данный пункт выполняется однократно, и требует повторения, лишь при добавлении новых классов в базу, на которой происходило обучение модели);
- классификация пользовательского запроса;
- поиск и формирование ответа пользователю.

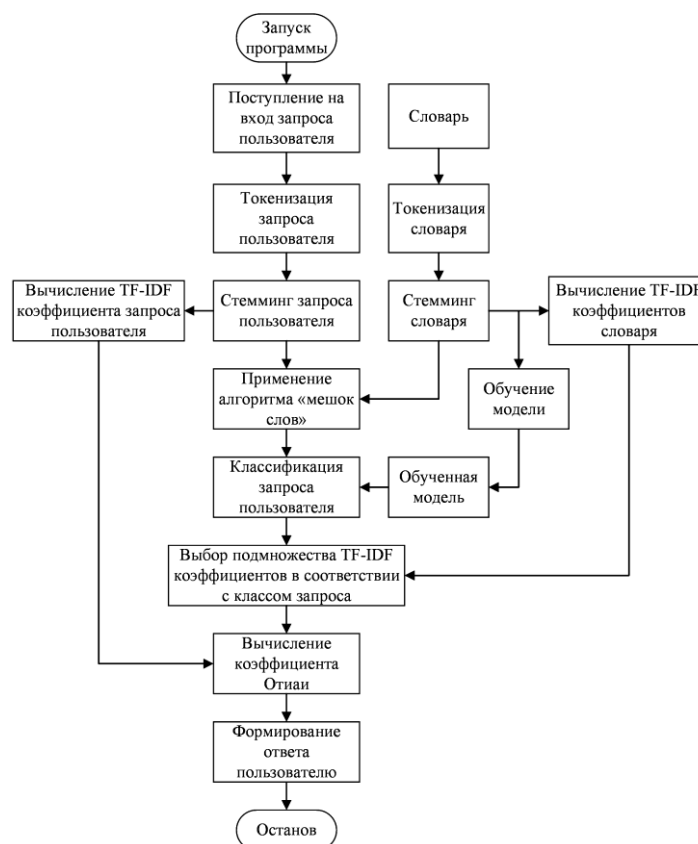


Рисунок 1. Архитектура системы классификации запроса пользователя и генерации ответа



Словарь представляет собой json-структуру, состоящую из множества предложений, разделенных по темам (классам). Например, в классе «Общежития» находится справочная информация обо всех шести общежитиях НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, телефоны комендантов, адреса, схема проездов, номера маршрутов и т. д.

На вход алгоритма поступает запрос от пользователя в текстовой форме на русском языке, регистр и знаки препинания неважны.

Предварительная обработка словаря и поступившего на вход пользовательского запроса выполняется с помощью библиотеки NLTK [1] на языке Python.

NLTK (Natural Language Toolkit) – платформа для создания программ на языке Python для работы с естественной речью. NLTK предоставляет простые в использовании интерфейсы для многих корпораций и лингвистических ресурсов, таких как WordNet, а также набор библиотек для обработки текста в целях классификации, токенизации, генерации, тегирования, синтаксического анализа и понимания семантики, создания оболочки библиотек NLP.

Предварительная обработка включает в себя два этапа: токенизацию и стемминг.

Токенизация – это разбиение текста на более мелкие части, токены. К токенам относятся как слова, так и отдельные предложения. В нашем случае, происходит разбиение предложений на слова.

Стемминг [4,5]– процесс нахождения основы слова для заданного исходного слова. Основа слова не обязательно совпадает с морфологическим корнем слова. В настоящей работе использовался стеммер Snowball Stemmer, поддерживающий русский язык.

Далее с помощью предварительно обработанного словаря происходит обучение нейронной сети (рис. 2, 3) и вычисление TF-IDF коэффициентов [2,3] слов в словаре.

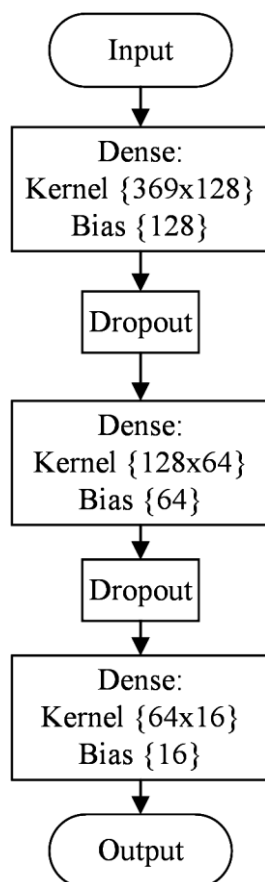


Рисунок 2. Модель нейронной сети

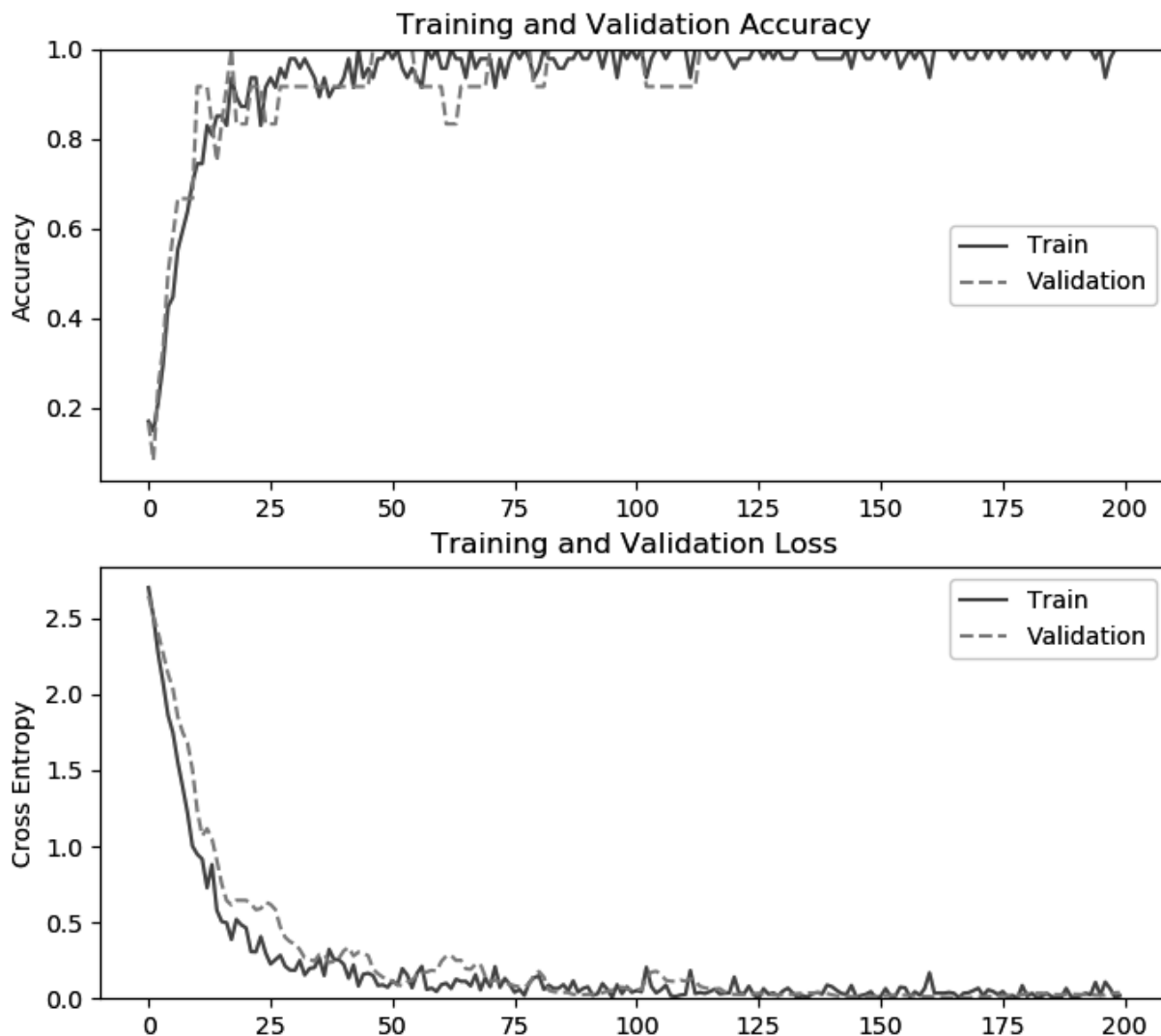


Рисунок 3. Зависимость значений точности и ошибки от количества эпох

Как видно из графиков, после прохождения 200 эпох точность достигла значений, превышающих 90%, в то время как значения ошибки колеблются около значений близких к нулю.

TF-IDF (3) – статистическая мера, используемая для оценки важности слова в контексте документа, являющегося частью коллекции документов.

TF (1) или частота слова – это отношение количества вхождения конкретного термина к суммарному набору слов в исследуемом документе. Этот показатель отражает важность (весомость) слова в рамках определенного документа (записи).

IDF (2) или обратная (инвертированная) частота документа – это инверсия частотности, с которой определенное слово фигурирует в коллекции текстов. Благодаря данному показателю можно снизить весомость наиболее широко используемых слов (предлогов, союзов, общих терминов и понятий). Для каждого термина в рамках определенной базы текстов предусматривается лишь одно единственное значение IDF.

$$tf(t, d) = \frac{n_t}{N} \quad (1)$$

где  $t$  – слово, для которого считается коэффициент,  $d$  – текущий документ,  $n_t$  – количество слов  $t$  в документе  $d$ ,  $N$  – общее количество слов в документе  $d$ .

$$idf(t, D) = \log \frac{D}{d_t} \quad (2)$$

где  $D$  – количество документов в наборе,  $d_t$  – число документов из набора  $D$ , в которых присутствует слово  $t$ .

$$tfidf(t, d, D) = tf(t, d) * idf(t, D) \quad (3)$$

После классификации пользовательского запроса, для него также происходит подсчёт TF-IDF коэффициентов. Таким образом, на данном этапе работы алгоритма мы имеем множество векторов, подсчитанных с помощью TF-IDF коэффициентов, для словаря, вектор и класс пользовательского запроса. Затем необходимо попарно вычислить бинарную меру сходства между ненулевым вектором запроса и ненулевыми векторами из части словаря, относящейся к классу пользовательского запроса (коэффициент Отиаи [6]). На основе данного коэффициента и формируется конечный ответ пользователю (рис 4).

```
C:\Users\Varin\Python3.6\python.exe chat-bot.py тест "телефон профкома"
Класс: "Профком НГТУ"
Ответ: Контактная информация профкома НГТУ: аудитория 1206, телефон 1 корпус: +7 (831) 436-73-27, телефон 6 корпус:
+7 (831) 257-86-66
```

#### Рисунок 4. Пример работы системы

### Заключение

В данной работе рассмотрена структура программной системы с естественно-языковым интерфейсом для помощи первокурсникам и абитуриентам НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. Показана теоретическая составляющая архитектуры системы классификации пользовательского запроса и последующей генерации ответа, а также приведены результаты тестирования данной системы. Тестирование показало, что предложенная модель системы удовлетворяет критерию точности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. **Steven Bird**, Ewan Klein, Edward Loper. Natural Language Processing with Python // O'Reilly Media, 2009.
2. **Jones, K. S.** A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval // MCB University Press, 2004. – V. 60. – N. 5. –P. 493-502.
3. **Солтон, Дж.** Динамические библиотечно-поисковые системы / Дж Солтон. - Мир, 1979.
4. **Lovins, Julie Beth.** Development of a Stemming Algorithm // Mechanical Translation and Computational Linguistics, 1968. –Т. 11.
5. **Маннинг, К.** Введение в информационный поиск / Маннинг К., Рагхаван П., Шютце Х. – Вильямс, 2011. –512 с.
6. **Cheetam A.H., Hazel J.E.** Binary similarity coefficients // J. Paleontology, 1969. V. 43. – N. 5. – P. 1130–1136.

**V.E. Gai, R.O. Barinov**

## **SOFTWARE SYSTEM WITH NATURAL LANGUAGE INTERFACE**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

The following work is dedicated to developing a system for helping freshmen students and enrollees of NNSTU n. a. R.E. Alekseev using a natural language processing interface. The reliance of this work comes from the fact that the NNSTU lacks a universal reference system which would help enrollees and freshmen students to navigate the campuses, receive information regarding the university as well as dorm and transportation availability using an interactive chat-bot mode. The article will review an approach to solving this problem using machine learning classifier, bag-of-words method and TF-IDF using Ochiai-Barkman coefficient.

**Keywords:** chat-bot, university student helper, neural networks, NLTK, bag-of-words, TF-IDF, Ochiai-Barkmann coefficient (cosine similarity).

М.А. Болотов, В.Е. Гай

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОМОЩИ ЛЮДЯМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Статья посвящена описанию прибора для людей с ограниченными возможностями, например, недостатками зрения. Актуальность статьи в том, что в современном обществе количество людей с плохим зрением постоянно увеличивается и им необходима помощь в виде таких приборов.

**Ключевые слова:** устройство для слабовидящих людей, распознавание образов, преобразование сигнала в механическое воздействие.

### Введение

Люди с ограниченными возможностями могут получать больше информации через другие органы чувств, особенно в современном мире, с высокоразвитыми технологиями в мире микропроцессоров. Человек с ограниченным зрением лучше слышит и у него более развиты тактильные ощущения. Основой для разработки стала перчатка для слепых, назначение которой - заменить недостающие органы зрения датчиками-радары, а информацию, в перекодированном виде человек «считывает» кожей рук, самыми чувствительными нервными окончаниями, например, на кончиках пальцев.

Перчаткой для слепых люди занимаются в разных городах и странах. Белорусский школьник из Бреста изобрёл сенсорную перчатку, которая может стать необходимым предметом гардероба для слабовидящих людей. Ученые в университете Невады разработали специфическое носимое устройство, которое призвано облегчить жизнь слабовидящих людей. Петербуржец Фёдор Беломоев изобрёл устройство, которое позволяет слепоглухим людям максимально полноценно общаться со зрячими и слышащими. Он назвал своё устройство «перчатка Брайля» [1].

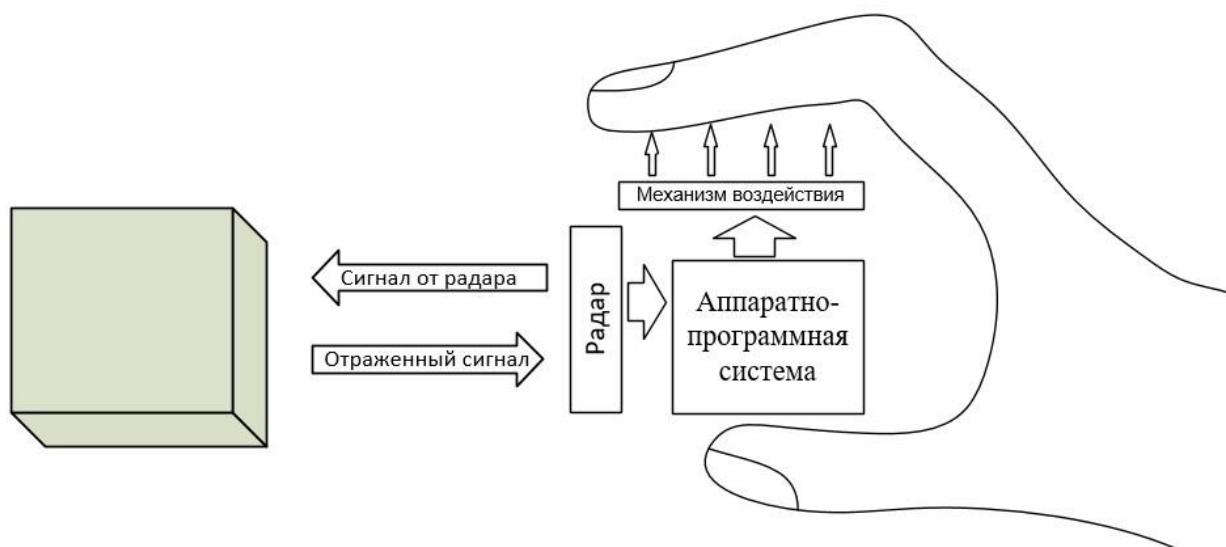
Какие дополнительные возможности у людей с ограниченным зрением для передвижения в пространстве существуют? Это трость, чтобы одновременно опираться и проверять пространство впереди идущего незрячего человека. Или собака-поводырь, которая двигаясь впереди идущего человека, «подсказывает» ему путь. Разрабатываемая система может быть универсальным «поводырём», который может заменить трость и собаку одновременно. Так незрячий человек, обучившись навыкам работы с прибором, получит возможность, с помощью тактильных ощущений представлять себе окружающее пространство, его форму, расстояние до объектов, размеры самих объектов.

### Принцип работы аппаратно – программной системы (АПС)

Принцип работы прибора или АПС заключается в преобразовании высокочастотного цифрового сигнала от радара в импульсы возвратно-поступательных движений иглолечек,

«показывающих» незрячему человеку форму пространства перед радаром. По частоте и амплитуде движений шестнадцати иголок человек получает информацию и ориентируется в пространстве. Идеально было бы разместить радар, сам прибор и механизм воздействия компактно в виде надеваемой на руку перчатки, где механизма воздействия будет составлять внутренний слой перчатки, обращенный к коже пальцев руки, а направление радара разместить по направлению пальцев человека, как если бы он показывал на незнакомый предмет рукой. Для решения поставленной задачи было принято решение первый образец выполнить в виде прототипа с целью экономии и отработки механизмов преобразования сигнала, программирования, а также основных параметров механизма воздействия.

Принципиальная схема прототипа АПС представлена на рис. 1. Радар посылает сигнал, который отражается от предмета и возвращается в радар. Далее сигнал преобразуется в микроконтроллере и, через механизм воздействия в виде иголочек, передает форму, размеры и расстояние до него незрячему человеку. По частоте и амплитуде воздействия на кожу человек определяет размеры предмета и расстояние до него.



**Рисунок 1. Принципиальная схема работы АПС**

Всего в прототипе предусмотрено шестнадцать иголочек. Матрица четыре на четыре. При этом внутренние иголки «показывают» середину, а наружные периметр «осматриваемого» пространства.

### **Устройство механизма воздействия прототипа АПС**

Для изготовления механизма воздействия прототипа созданы 3-Д модели корпусов, катушек и деталей в программе Компас-2Д. Прототип АПС состоит из шестнадцати катушек индуктивности, намотанных внавалку проводом 125 мкм. Внутри катушки с зазором 1 мм помещён сердечник 3X10мм из неодимового магнита, к которому с помощью термоусадки прикреплен иглочка (обрезок от силовой кнопки) размером 1x5мм с одной стороны, и пружинка 2x5 мм с другой.

Для получения максимальной добротности и индуктивности катушку выгоднее делать короткой, но большого диаметра, с отношением  $D/l$  порядка 2,5. Индуктивность таких катушек более точно рассчитывается по эмпирической (подобранной опытным путем) формуле [4]:

$$L = \frac{0,1 \cdot D^2 \cdot N^2}{4 \cdot D + 11 \cdot l} \quad (1)$$

где размеры берутся в сантиметрах, а индуктивность получается в микрогенри.

В качестве  $D$  берут средний диаметр:

$$D = \frac{(D_{\max} + D_{\min})}{2} = \frac{(1,5 + 0,6)}{2} = 1,05 \text{ см} \quad (2)$$

а в качестве  $l$  - ширину намотки,

$$l = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{2} = \frac{(1,5 - 0,6)}{2} = 0,45 \text{ см} \quad (3)$$

Число витков катушки для такого сердечника было подобрано опытным путем. Так, начиная с 72 витков, при которых наблюдались незначительные колебания, а при увеличении числа витков амплитуда колебаний возрастала, было доведено число витков до 2000. Больше увеличивать число витков было неэффективно, так как это увеличивало вес прототипа. Размеры каждой катушки (диаметр-высота) составляют 16x19 мм. Намотка осуществлялась на самодельном станке с электроприводом и счетчиком витков изготовленном из детского конструктора и калькулятора, см. фото на рис 2.

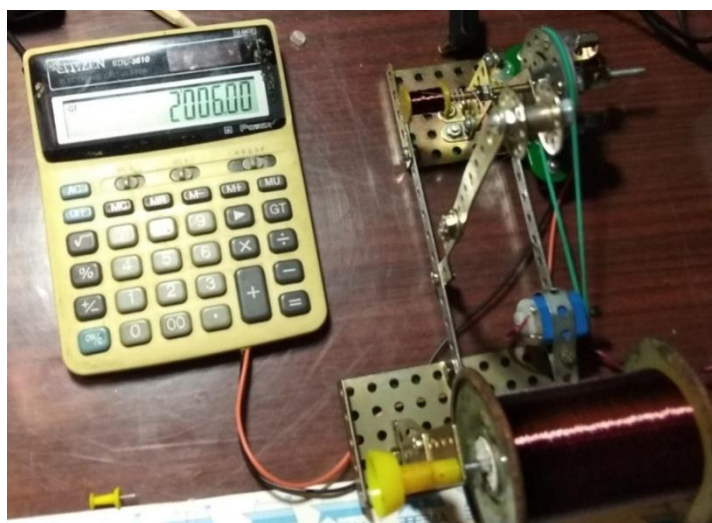


Рисунок 2. Намоточный станок

Катушки и корпус, в котором они крепятся, напечатаны на 3-Д принтере из пластика PLA. Фрагмент чертежа представлен на рис.3.

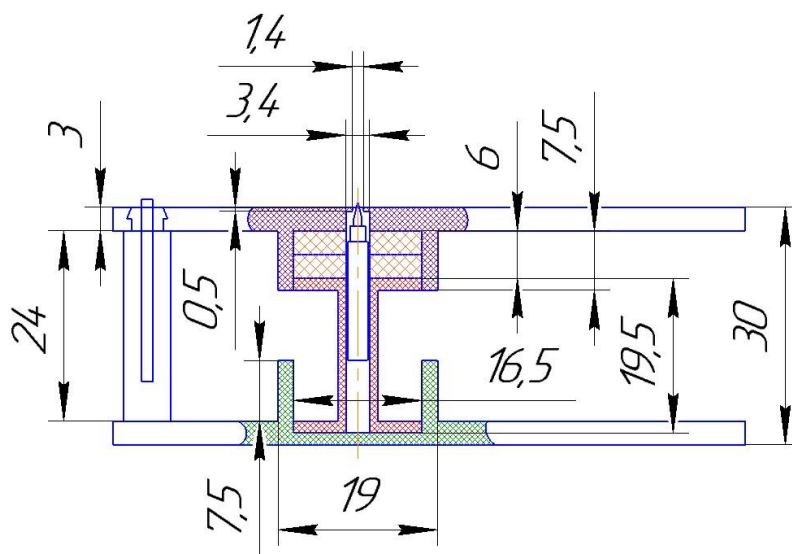
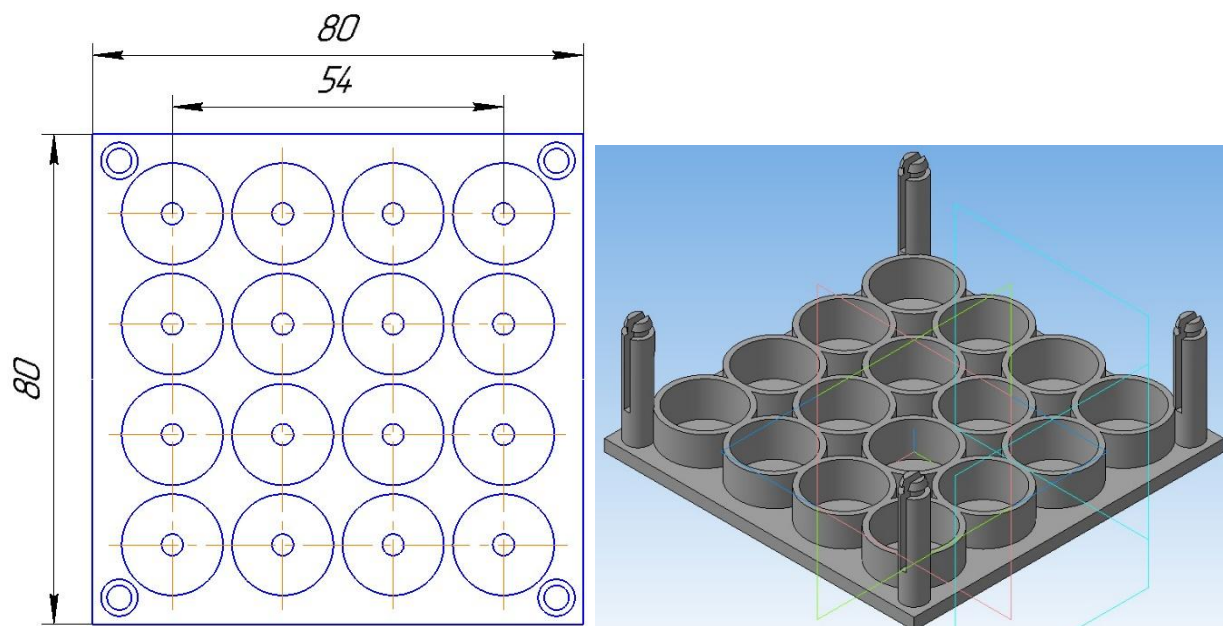


Рисунок 3. Фрагмент чертежа с размерами катушки

Для увеличения амплитуды движения сердечника общей длиной 20мм, высоту корпуса пришлось увеличивать дополнительно на 6мм. Общий размер корпуса для катушек составил: 80x80x30 мм (ширина-глубина-высота). Вид сверху и вид 3-Д модели показан на рис.4.



**Рисунок 4. Корпус для крепления катушек. Вид сверху. Вид 3-Д модели**

Программная часть прототипа реализована на платформе ArduinoMega 2560, который поддерживает 15 таймеров, способных генерировать прерывания независимо друг от друга. Этим таймерам достаточно для разделения процесса во времени на 16 потоков.

Контроллер АПС ArduinoMega 2560 модулирует сигнал заданной формы на выходах, поддерживающих ШИМ, который поступает на радар, обрабатывается им и считывается с аналоговых входов контроллера.

Каждый поток выполняет схожие действия: по прерыванию считывает сигнал с определенного аналогового входа контроллера, преобразует его в частоту и генерирует на выходной шине цифровой сигнал определенной частоты. Чем дальше находится целевой объект, тем меньше входной аналоговый сигнал и тем меньше выходная частота. Таким образом, на 16 цифровых выходах, подключенных к катушкам индуктивности, устанавливается заданная частота.

Питание устройства осуществляется от аккумуляторов или источника напряжением 5 В и силой тока не менее 1 А.

### **Заключение**

В современном мире информационные технологии непрерывно совершенствуются, открываются новые подходы к разработке устройств для помощи людям с ограниченными возможностями. С доступностью микроконтроллеров, 3-Д печати, высокоуровневых средств для разработки программного обеспечения не составляет труда открывать новые возможности для незрячих людей воспринимать окружающий мир. Одним из устройств дополнительного восприятия является аппаратно-программная система, описанная в настоящей статье. Данное устройство может быть усовершенствовано не только с аппаратной стороны (гибкая перчатка оптимальных размеров), но и с программной, чему способствует использование нейронных сетей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*



## Библиографический список

1. Артеменко, Г. Перчатка Брайля // «Фонтанка.ру»: [\[https://www.fontanka.ru/2018/11/26/054/\]](https://www.fontanka.ru/2018/11/26/054/) // Санкт-Петербург онлайн.
2. Пухальский, Г.И. Проектирование микропроцессорных систем: учеб. пособие для вузов / Г.И. Пухальский. - СПб.: Политехника, 2001. – 544 с.
3. Gregory L. Charvat. Small and Short-Range Radar Systems // CRC Press, 427.
4. Нефедов, В.И. Основы Радиоэлектроники и связи / В.И. НеФедов. - Москва, Высшая школа, 2009.

V.E. Gai, M.A. Bolotov

### HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM TO HELP PEOPLE WITH DISABILITIES FOR ORIENTATION IN SPACE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

This article is devoted to the description of the device for people with disabilities, for example, visual impairments. The relevance of the article is that in modern society the number of people with low vision is constantly increasing and they need help in the form of such devices.

**Key words:** device for visually impaired people, pattern recognition, conversion of signal to mechanical impact.

И.М. Ефодее, В.Е. Гай

## МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ КОМПЬЮТЕРА ПО СЕТЕВОМУ ТРАФИКУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена модели и алгоритмам идентификации пользователя компьютера по сгенерированному сетевому трафику, полученным путем сбора данных с компьютера пользователя с разрешения пользователя. Алгоритмы могут быть использованы в целях повышения уровня защиты данных пользователя, улучшения качества работы алгоритмов контекстной рекламы, алгоритмов выборки актуальных новостей и т.д. Тема является актуальной, так как данный подход может быть переиспользован для решения целого кластера задач. В статье будет рассмотрен этап сбора данных и подход к решению данной задачи с использованием алгоритмов и моделей машинного обучения.

**Ключевые слова:** сетевой трафик, алгоритмы машинного обучения, алгоритмы идентификации, задача классификации, аналитика сетевого трафика.

### Описание задачи идентификации пользователя по сетевому трафику

*Сетевой трафик* (в литературе широко используется понятие «*интернет-трафик*»), но это понятие не совсем корректно, так как обмен информации может происходить без использования всемирной сети) представляет собой информацию, передаваемую посредством какой-либо компьютерной сети с использованием определенных правил (протоколов) и за определенное время.

Практически каждый владеет сразу несколькими устройствами (Например, смартфоны, планшетные компьютеры, ноутбуки, рабочие станции и т.п.), которые активно использует для обмена и получения информации не только для работы или учебы, но и в личных целях, а это значит что конкретный пользователь, используя различные устройства, генерирует уникальный сетевой трафик. Следовательно, между уже полученной статистикой использования сети и новыми данными, собранными за некоторый период времени, существует достаточно сильная корреляция, что позволяет достаточно точно определить конкретного пользователя по данным, собранным анализатором сетевого трафика (сниффером).

Стоит отметить, что при недостаточном количестве данных для обучения алгоритма (и особенно, при использовании статистики только с одного из устройств), данный подход не только не покажет своей эффективности, но и с высокой долей вероятности, будет давать ложные результаты.

Также следует добавить, что обладая достаточным количеством статистики большого числа пользователей, данный подход позволит не только идентифицировать конкретного человека (из числа представивших свой трафик), но и предсказывать некоторые признаки, описывающие каждого конкретного пользователя (например, пол, возраст и т.д.) или группу пользователей, что позволяет значительно улучшить работу алгоритмов контекстной рекламы, адресного подбора новостей и т.д. и т.п.

## Введение в теорию машинного обучения

*Машинное обучение* – класс методов из области искусственного интеллекта, изучающих алгоритмы, способные обучаться, то есть для которых характерно обучение в процессе применения решений множества похожих задач. В общем случае, задачи, решение с использованием алгоритмов машинного обучения, сводятся к выявлению зависимостей (в том числе и скрытых) между некоторым набором признаков.

Для обучения алгоритмов машинного обучения нужны размеченные данные (Например, структурированные таблицы или базы данных), в которых содержится некоторое множество объектов (или ситуаций) и множество возможных ответов (или реакций). Главная задача алгоритмов данного класса – выявить любого рода корреляции между объектами и ответами, которые изначально не определены. Однако существует конечная совокупность некоторого числа прецедентов (пара – «объект»-«ответ»), которую принято называть обучающей выборкой. Именно на этой основе применяемый алгоритм должен восстановить зависимости, что означает научиться давать точный классифицирующий ответ для любого возможного входного объекта. Выявляемая зависимость может быть выражена не только аналитически, но и эмпирически, то есть система должна обучиться обобщать любые возможные входные данные, в том числе и выходящие за пределы обучающей выборки. Для оценки качества работы полученной системы вводится оценка функционала качества.

Исходя из вышесказанного, можно сказать, что задача машинного обучения сводится к аппроксимации функций зависимости ответов системы от входных данных.



**Рисунок 1. Процесс решения задач с использованием алгоритмов машинного обучения**

На указанной диаграмме представлена последовательность решения задач с использованием алгоритмов данного класса. По сути, эффективность и корректность работы алгоритмов машинного обучения зависит от подобранных данных и выбора модели.

Следует отметить, что существует проблема переобучения модели, то есть когда модель выдает хорошие результаты на тестовой выборке, но при этом очень плохо работает на примерах, не участвующих в обучении (на валидационных и реальных данных). Эта проблема проявляется при использовании большого количества однообразных данных для обучения, а также слишком большом количестве эпох обучения. Кроме указанной проблемы, существует противоположная проблема – проблема недообучения, возникающая не только из-за непра-

вильно подобранных данных, но и недостаточно сложных моделей. Для того, чтобы избежать данных проблем, нужно регулярно сравнивать ошибки как на тестовой выборке, так и на валидационной – они не должны сильно отличаться.

### Формулировка проблемы

Задачу идентификации пользователя компьютера по сетевому трафику можно отнести к классу *задач классификации*, так как множество объектов разделены некоторым образом на классы. Количество объектов конечно, и заранее известно к каким классам они относятся (что касается обучающей выборки).

Если говорить о конкретной задаче, к классу мы отнесем конкретного человека, а к объектам статистику использования сетевого трафика этим пользователем.

### Сбор данных

Под *сбором данных* (в контексте машинного обучения) обычно понимают сбор информации и оценку качества полученных данных, использующихся для обучения выбранной модели, способной решить поставленную задачу и выдать корректный результат, на вновь полученных данных.

Этап сбора данных является одним из самых важных этапов в процессе решения задачи идентификации пользователя по сетевому трафику с использованием моделей и алгоритмов машинного обучения. Именно на этом этапе нужно определить признаковое пространство (правильно разметить данные), а так же выделить и удалить из выборки лишние данные, которые могут только ухудшить качество обучения модели.

Существует несколько способов сбора сетевого трафика пользователя.

- *Захват сетевых пакетов на устройстве пользователя с использованием сниффера*

Чтобы начать собирать статистику по использованию сетевого трафика достаточно установить сниффер и запустить его (Например, WireShark). Полученные данные легко можно заэкспортировать в нужный формат (в том числе, таблиц). Данные будут содержать в себе всю необходимую для анализа информацию.

- *Получение статистики использования сетевого трафика с маршрутизатора сети*

Главным недостатком этого способа сбора информации является зависимость от аппаратного обеспечения, а именно не все маршрутизаторы позволяют собирать статистику использования сетевого трафика (так как не все устройства этого класса поддерживают логирование и сохранение информации). Кроме того, для сбора данных требуются дополнительные знания и умения, а так же дополнительная обработка результатов полученной статистики разного уровня и приоритета. Так же информации может быть недостаточно, так как сбор трафика может вестись исключительно на сетевом уровне. Для того чтобы собрать нужную информацию нужно зайти на адрес веб-интерфейса роутера (или в консоль маршрутизатора) под учетной записью администратора, выставить нужные настройки, собрать данные и сохранить в нужном формате полученные данные. Стоит также отметить, что недостатком данного способа является сбор статистики всей сети, то есть для того, чтобы получить нужные данные, нужно провести дополнительный отсев нерелевантной информации.

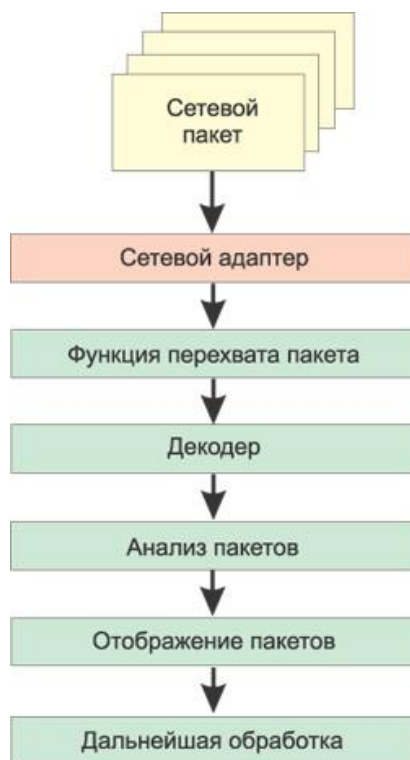
- *Межсетевой экран ПК-маршрутизатора*

Абсолютное большинство брендмауэров работают исключительно на сетевом уровне, а следовательно, собирают статистику обращения на порты, то есть информации для реше-

ния поставленной задачи просто может оказаться недостаточно. Дополнительной сложностью является добавочный анализ данных и сохранение в нужном формате.

- *Интерфейсы операционной системы или физические сетевые интерфейсы*

Как правило, данные устройства собирают лишь статистику передачи данных по определенному каналу, что в контексте данной задачи не представляет никакой ценности.



**Рисунок 2. Схема работы сниффера**

Исходя из сказанного ранее, самым доступным способом сбора информации о статистике использования сетевого трафика пользователем является сбор данных посредством специального программного обеспечения – снифферов.

Отдельно стоит отметить этап разметки данных. Для корректной идентификации пользователя по сетевому трафику прикладного уровня к уже полученным данным нужно добавить некоторые признаковые описания, которые дадут более полную информацию о владельце.

### **Описание подхода к решению поставленной задачи**

Для решения данной задачи было решено воспользоваться классическими алгоритмами и моделями машинного обучения, так как дополнительное усложнение моделей, хоть и приведет к улучшению качества решения проблемы, но при этом добавит сложности на этапе проектирования модели и ее обучения и т.д.

В ходе эксперимента нужно сравнить между собой результаты, полученные путем использования разных алгоритмов, и выбрать лучший результат.

### **Заключение**

Результатом работы является создание и разработка модели с использованием классических алгоритмов машинного обучения, которая будет способна достаточно точно идентифи-

цировать конкретного пользователя компьютера. В данной статье был рассмотрен один из множества подходов к решению задачи идентификации пользователя по сетевому трафику, который может быть переиспользован и для решения других современных проблем – улучшения качества работы контекстной рекламы, алгоритмов подбора новостей и т.д.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №10-08-06049.*

### Библиографический список

1. **Machine Learning.ru**[Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://www.machinelearning.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.
2. **Mowei Wang, Yong Cui, Xin Wang, Shihan Xiao, and Junchen Jiang.**Machine Learning for Networking: Workflow, Advances and Opportunities// IEEE Network, 2017
3. **Mohammad Reza Parsaei, Mohammad Javad Sobouti, Seyed Raoufkhayami, Reza Javidan.** Network Traffic Classification using Machine Learning Techniques over Software Defined Network// (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 8, No.7, 2017
4. **Флах, П.** Машинное обучение / П. Флах. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
5. **Jamuna .A, VinodhEwards S.E**Efficient Flow based Network Traffic Classification using Machine Learning// International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 3, Issue 2, March -April 2013, pp.1324-1328

**Vasilii E. Gai, Irina M. Efode**

### ODEL AND ALGORITHMS OF COMPUTER USER IDENTIFYING BY NETWORK TRAFFIC

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose.** The present work is devoted to model and algorithms of computer user identifying by network traffic, which are collected from computer and approved by user. This algorithm can be used for user data security quality improvements, contextual advertising algorithms, news selection algorithms and etc.

**Design / methodology / approach:** The proposed method is based on the theory of machine learning algorithms.

**Research limitations/implications:** The proposed method, as well as the obtained results, are the starting point in the new method development of user recognition.

**Originality/value:** This topic is actual, because the above approach can be used to solve a whole cluster of tasks. "Data collection and general approach to problem solving using machine learning algorithms will be reviewed in article.

**Key words:** network traffic, machine learning algorithms, identification algorithms, network traffic analysis.

**В. Е. Гай, И. В. Поляков**

## **УСТРОЙСТВО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ВИБРАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье рассматривается проблема сборки и настройки доступного программно-аппаратного комплекса вибрационно-акустической диагностики механизмов. Ввиду износа узлов и механизмов автотранспортных средств, могут быть применены различные варианты их обслуживания и замены – по регламенту, что экономически не всегда бывает выгодным, по мере выхода их из строя, что довольно небезопасно, либо исходя из результатов диагностики. Диагностика состояния узлов механизма оператором на слух, нередко бывает не самой точной, а специальная аппаратура для проведения машинной вибродиагностики применяется редко по причине ее высокой стоимости. Таким образом, было принято решение по самостоятельной сборке аналога, более доступного по цене. Данное устройство-аналог должно не уступать готовым решениям в точности измерений, а также иметь возможность использовать различные методы и алгоритмы в программной части, для применения разных способов исследования полученного виброакустического сигнала. В статье будут рассмотрены некоторые аспекты, связанные с обеспечением работы аппаратной части комплекса, в том числе – взаимодействие отдельных аппаратных компонентов.

**Ключевые слова:** автотранспортные средства, машинное обучение, подшипник качения, виброакустический сигнал, аналогово-цифровой преобразователь, платформа разработки Ардуино.

### **Введение**

В настоящее время высокое распространение имеет автомобильный транспорт, от легковых авто, до автомобилей, рассчитанных на перевозку людей и грузов. Ввиду постоянной эксплуатации таких средств передвижения, им необходим периодический технический осмотр, для выявления вышедших из строя, либо находящихся в критическом состоянии узлов и механизмов. Существует несколько вариантов обслуживания транспортного средства – по регламенту, по мере выхода узла из строя, либо исходя из результатов диагностики. Обычно применяется обслуживание по временному регламенту, когда высчитывается средний срок службы детали и по истечению, производится замена. Однако данный способ не оберегает от преждевременных поломок, а также часто меняются детали, имеющие достаточный запас прочности, что экономически не выгодно. Обслуживание по мере выхода узлов из строя небезопасно. Так что в большинстве случаев используется обслуживание в результате каких-либо проверок и диагностик. Обычно при диагностике используются простейшие приборы, а также знания и опыт оператора. Однако более точных результатов можно достичь, используя специальную аппаратуру. Такая аппаратура имеет возможность с высокой точностью диагностировать неисправность в системе, однако имеет существенный минус – высокую стоимость. В результате, распространенность таких диагностических комплексов в центрах обслуживания транспорта достаточно низкая. Возникает проблема разработки программно-

аппаратного комплекса вибрационно-акустической диагностики из отдельных компонентов, представленных на рынке.

Практическая значимость разрабатываемого решения – разработка программно-аппаратного комплекса диагностики состояния узлов и механизмов транспортных средств. Ввиду итоговой стоимости комплекса, сниженной, по сравнению с аналогами на рынке, планируется повысить распространенность данного типа диагностики в рядовых сервисных центрах. Что, в свою очередь, должно повысить безопасность на дорогах общего пользования, а также сократить временные затраты по диагностированию состояния транспорта человеком. Для решения данной задачи, в качестве аппаратной части, предложено использовать программно-аппаратную платформу Ардуино, вибрационный датчик и аналого-цифровой преобразователь. С процессом выбора конкретных аппаратных элементов комплекса, учетом их функционала и стоимости можно ознакомиться в предыдущей статье [3].

Фундаментальная задача, на решение которой направлена данная работа – разработка программно-аппаратного комплекса виброакустической диагностики транспортных средств, с использованием выбранных компонентов, с учетом их особенностей в работе и настройке.

В рамках поставленной фундаментальной задачи планируется выполнить следующие подзадачи:

- 1) рассмотреть каждый выбранный компонент аппаратной части комплекса, его способы связи и выполняемые функции;
- 2) обеспечить работу каждого из компонентов аппаратной части комплекса по отдельности;
- 3) обеспечить связь между компонентами аппаратной части комплекса;
- 4) получить результат работы аппаратной части комплекса, пригодный для дальнейшего использования и анализа.

### Информационная модель диагностики

Информационная модель состоит из части, обеспечивающей работу аппаратной составляющей комплекса диагностики и части, ответственной за анализ сигнала и принятие решения в соответствии с результатами этого анализа. Первая часть представляет собой небольшую совокупность команд управления входящими в комплекс устройствами. Включает в себя блок настройки устройств, блок их циклической работы по приему виброакустического сигнала и блок сохранения либо передачи полученного сигнала на вычислительное устройство, для дальнейшей обработки.

Вторую часть - анализ виброакустического сигнала - можно рассмотреть как систему распознавания образов. Соответственно, можно выделить три этапа обработки данных: предварительная обработка, вычисление признаков и принятие решения. Структура представлена на рис. 1.

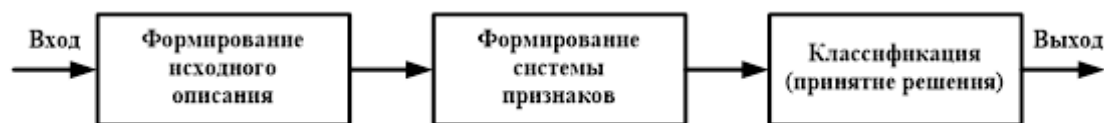


Рисунок 1. Структура системы распознавания



Первый и второй этап предлагается реализовать с помощью теории активного восприятия, позволяющей уменьшить вычислительную сложность, по сравнению с аналогичными методами. Предварительная обработка заключается в выполнении  $Q$ -преобразования, заключающегося в применении к сегментам исходного сигнала операции сложения. Формирование признакового описания исходного сигнала заключается в применении к сигналу  $g$  множества фильтров Уолша системы Хармута [5]. Последовательное применение к сигналу  $Q$ -преобразования и системы фильтров реализуют  $U$ -преобразование, являющееся базовым в теории активного восприятия.  $U$ -преобразование имеет минимально возможную вычислительную сложность, поскольку при его реализации используются простейшие операции – сложение и вычитание. Стандартные преобразования, требуют реализации свертки, а на уровне весовых коэффициентов – операции арифметического умножения. Теория активного восприятия не ограничивается только формированием спектрального представления сигнала. В состав теории входит раздел «Алгебра групп», посвященный анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Обнаруженные зависимости допускают своё использование на этапах принятия решения и понимания анализируемого сигнала.

Также существует вероятность использования на первом и втором этапе собственного метода формирования признакового описания сигнала, основанного на методе составления гистограмм по сигналу, однако имеющего свои особенности.

Этап классификации предлагается реализовать с помощью метода машинного обучения One-class SVM, который хорошо себя показывает при поиске аномалий в случаях с большим количеством стандартных данных, что позволяет сократить количество данных на этапе определения неисправности. Также рассматривается метод Решающих деревьев, в положительные особенности которого входит высокая скорость выполнения принятия решения, а также довольно неплохая точность.

### Аппаратная модель диагностики

Аппаратная модель состоит из комплекса устройств, воспринимающих вибросигнал и передающих данные на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Такие устройства можно разделить на три типа: датчик вибрационных сигналов, аналого-цифровой преобразователь и сборщик оцифрованных данных, передающий их в персональный компьютер через какой-либо широко распространенный интерфейс (usb) (рис. 2).

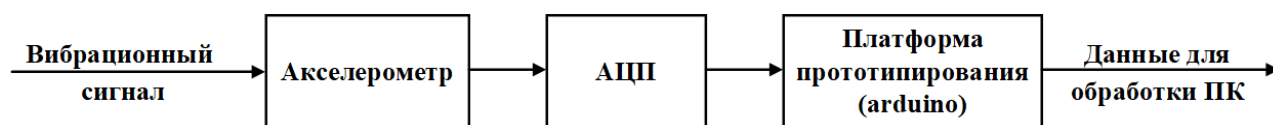
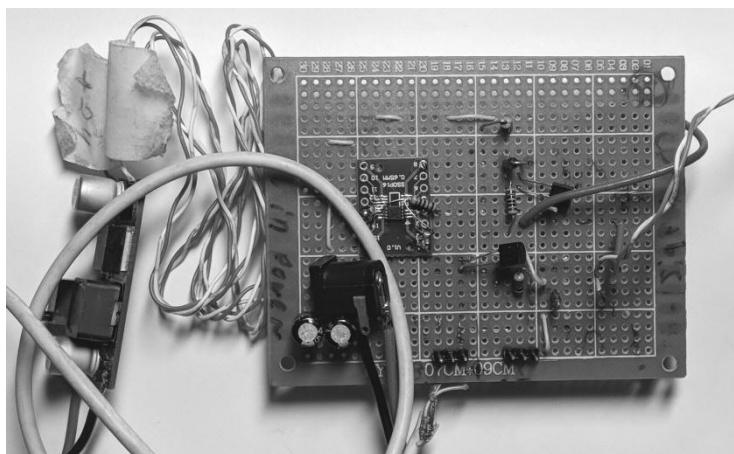


Рисунок 2. Структура аппаратной части виброанализатора

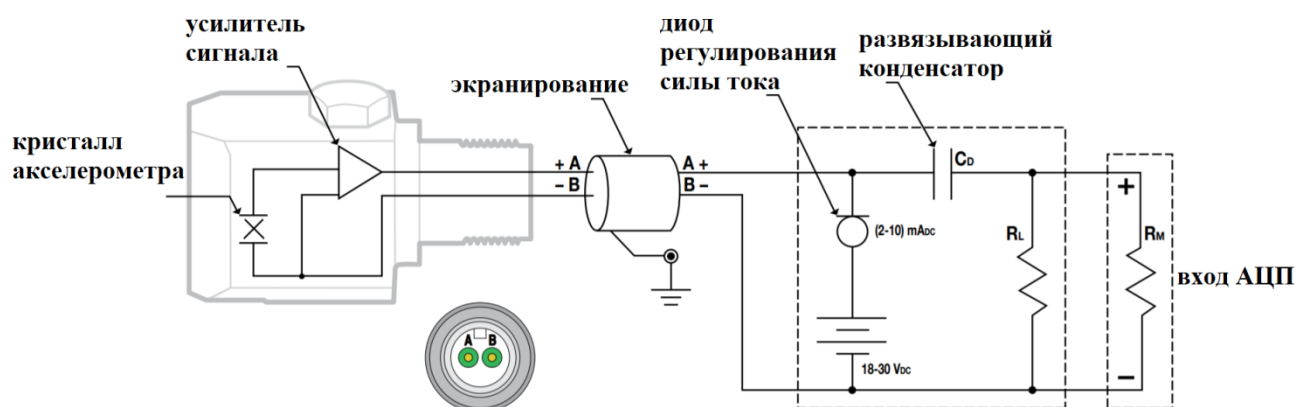
### Сборка и запуск виброанализатора

Рассмотрим каждое устройство в отдельности. В качестве датчика вибрационных сигналов был выбран многоцелевой акселерометр ac102-1a. Данный акселерометр способен регистрировать колебания на частотах от 0.5 до 15000 Гц. Устройство имеет два выхода Аи В. Для функционирования необходимо питание с напряжением от 18 до 30 вольт и силой тока от 2 до 10 мА. Таким образом, для обеспечения работоспособности акселерометра, на макетной плате был выполнен прототип модуля питания (рис. 3).



**Рисунок 3. Прототип модуля питания**

Таких прототипов было несколько. Первый прототип был собран по более простой схеме (рис. 4). Он выполнял свои функции, однако, для уменьшения количества искажений на получаемом сигнале, было проведено обратное проектирование серийного устройства, работающего с данными акселераторами с завода. После чего произведена сборка отдельной линии питания для одного акселерометра. Модуль питания акселерометра питается от сети переменного тока, через адаптер AC-DC 12 вольт.

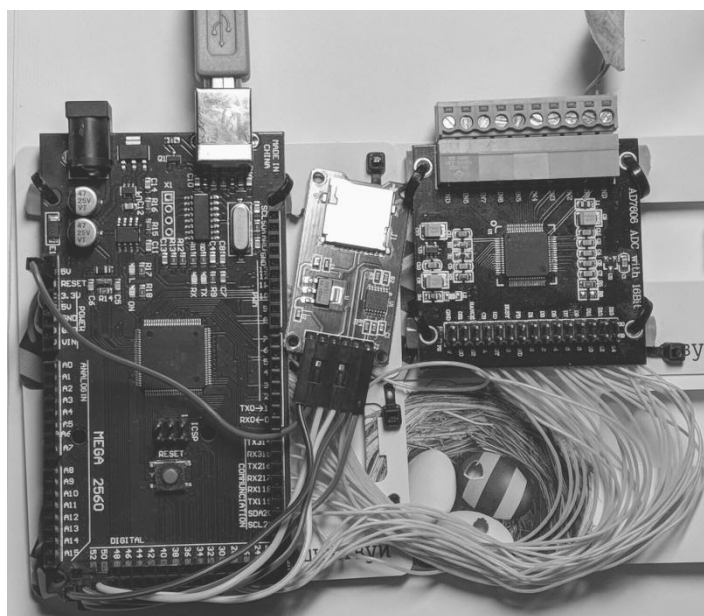


**Рисунок 4. Схема минимально необходимых компонентов модуля питания**

В качестве аналого-цифрового преобразователя был выбран многоканальный модуль сбора данных, основанный на АЦП AD7606. Данный модуль имеет 8 входов, разрядность 16 бит и способен опрашивать каналы со скоростью 200000 Гц. Питание данного модуля производится от устройства Arduino Mega, в дальнейшем возможно осуществление отдельного питания. Каждый вход данного аналого-цифрового преобразователя принимает два вывода с датчика, соответствующие выходам ранее выбранного акселерометра. Диапазон принимаемого сигнала – 5 либо 10 вольт, что достаточно удобно, так как многие АЦП могут принимать сигнал только в пяти вольтовом диапазоне. Однако у выбранного акселерометра, хоть выдаваемый диапазон и заявлен в пять вольт, на практике, сигнал доходит и до значений в 7-8 вольт.

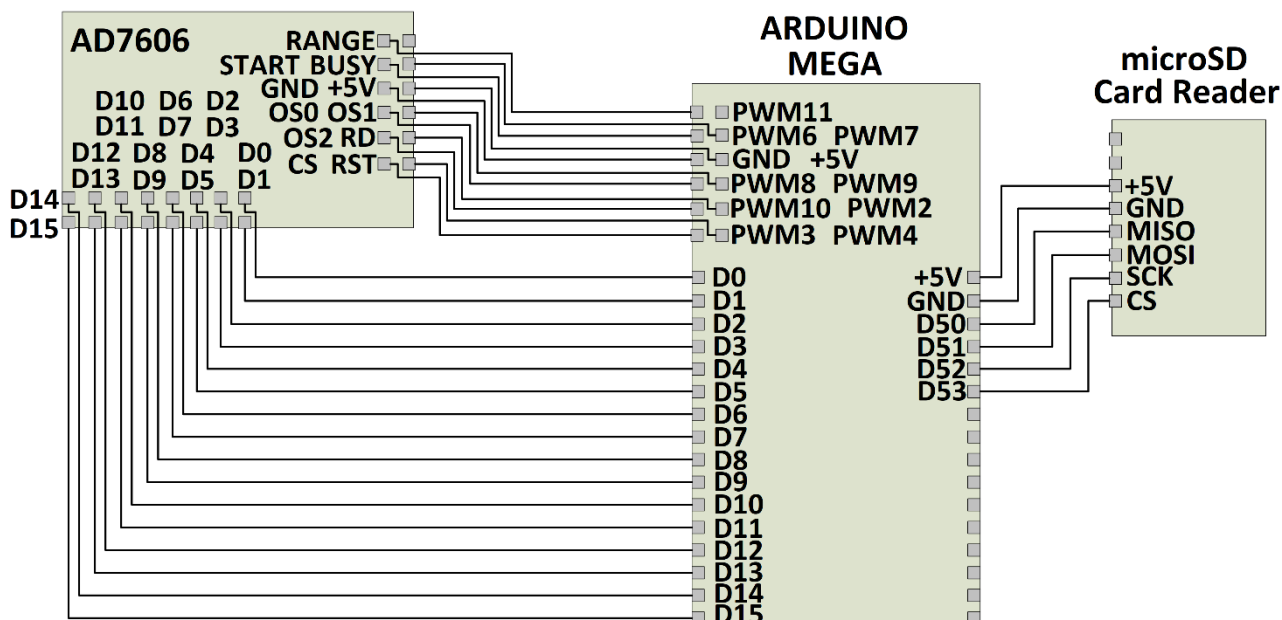
Для управления работой АЦП необходимо своевременно выставлять цифровые значения на выводах управления, а также принимать оцифрованный сигнал. Для этих целей используется устройство Arduino Mega. Питание для данного модуля приходит через USB. Обмен данными с

ПК происходит также через этот интерфейс. Пробное подключение АЦП к Arduino Mega было осуществлено на небольшой платформе с использованием пайки (рис. 5).



**Рисунок 5. Подключение Arduino, АЦП и модуля чтения карт памяти**

Были подключены необходимые выводы для управления АЦП, в соответствии с техническим описанием принципа работы АЦП[4], а также 16 двоичных линий, совокупность которых предоставит в Arduino значение оцифрованного сигнала в единицу времени с размерностью 16 бит. Схема подключения Arduino Mega и АЦП представлена на рис.6.



**Рисунок 6. Схема подключения Arduino, АЦП и модуля чтения карт памяти**

Алгоритм работы выводов на Arduino практически всегда задается в программе управления, однако, необходимо помнить о том, что без надобности не стоит занимать служебные выводы Arduino. К примеру, для увеличения скорости работы устройства, данные, приходя-

щие с АЦП не стоит передавать сразу на ПК через последовательный порт. Есть смысл оставить на некоторое время пакет с записанным сигналом во временной памяти, а передавать его после процесса регистрации сигнала. Для этого к устройству Arduino можно подключить модуль со слотом флеш-памяти microSD. Данный модуль подключается через интерфейс SPI, требующий X свободных выводов на Arduino, в том числе X служебных.

После того, как все устройства готовы к работе - имеют питание и соответствующим образом друг с другом соединены, можно приступать к попыткам оцифровать аналоговый сигнал. В первую очередь была осуществлена проверка акселерометра и модуля питания акселерометра с помощью встроенного в Arduino Uno АЦП – это достаточно просто и быстро, хотя данный АЦП не имеет необходимой для нас разрядности и частоты, проверить работу датчика он позволяет. В дальнейшем, более точно оценить кривую сигнала получилось с помощью цифрового осциллографа. Визуально, работа акселерометра и модуля его питания – корректная.

Подключение датчика к АЦП простое и однозначное. Подключение АЦП к Arduino физически также несложное, однако структура программы управления АЦП, записываемая в Arduino, сперва вызвала некоторые затруднения. Данные принимались в виде пустых значений, пока с помощью описаний строб последовательностей процессов, протекающих в АЦП, не была найдена верная последовательность команд. Однако скорость приема данных получилась весьма низкая – около X значений в секунду, что сильно отличается от заявленных производителем АЦП 200 КГц. Причина низкой скорости в модуле Arduino. И хотя скорость обработки сигнала с частотой в 200 КГц для него недоступна, текущие X значений в секунду можно увеличить. Для этого необходимо избавиться от стандартных команд записи и чтения данных на выводы Arduino, выполняя их на более низком уровне, без надстроек оболочки. Таким образом, прописывая и читая состояния непосредственно в портах устройства, с помощью битовых масок, при данной аппаратной конфигурации удалось достигнуть скорости в X циклов выполнения программы считывания оцифрованного сигнала в секунду.

### **Тестирование программно-аппаратного комплекса**

Тестирование планируется проводить на экспериментальной установке, собранной из платформы, электродвигателя и крепления для подшипников. Начальные эксперименты будут проводиться на натяжных подшипниках газораспределительного механизма легковых автомобилей. Планируется собрать несколько наборов данных, записанных при различных настройках аппаратной части комплекса, сравнить их и найти те параметры, при которых обеспечивается максимальная точность регистрации виброакустического сигнала. Затем, следующим шагом станет исследование работы различных предложенных методов и алгоритмов вибродиагностики. По полученным результатам будет необходимо провести сравнение и сделать выводы об их эффективности.

### **Заключение**

Была проведена сборка прототипа системы вибродиагностики. По итогам к результатам работы по рассматриваемой теме можно отнести работоспособную аппаратную часть программно-аппаратного комплекса вибродиагностики. Решение задачи сбора виброакустического сигнала выполняется примененной совокупностью устройств, находящихся в продаже по отдельности. Запланированные эксперименты по сбору экспериментальных данных призваны выявить эффективность выбранной аппаратной платформы, а также предложенных методов. Планируемая система имеет потенциал для дальнейшего развития и может быть

использована в образовательных целях. Дополнительно выполнено исследование процессов работы АЦП AD7606, а также исследование принципов управления портами в программно-аппаратной среде Arduino.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

### **Библиографический список**

1. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений / В.А. Утробин. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2001.– С. 234.

2. **Гай, В.Е.** Прогнозирование состояния подшипников качения на основе анализа виброакустических сигналов / Гай В.Е. И. В. Поляков // Материалы XXIV международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" ИСТ 2018, Нижний Новгород, 20 апреля, С. 1123-1126.

3. **Гай, В.Е.** Программно-аппаратный комплекс вибродиагностики состояния ответственных узлов и механизмов автотранспортных средств / В. Е. Гай, И. В. Поляков // Материалы XXV международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" ИСТ 2019, Нижний Новгород, 20 апреля, С. 871-875.

4. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7606\\_7606-6\\_7606-4.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7606_7606-6_7606-4.pdf)

5. **Утробин, В.А.** Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 10. – С. 1089–1104.

**Gai V.E., Polyakov I.V.**

### **STRUCTURE OF THE SOFTWARE AND HARDWARE VIBRATION AND ACOUSTIC DIAGNOSTICS COMPLEX FOR THE DIAGNOSIS OF THE CONDITION OF THE UNITS AND MECHANISMS OF MOTOR VEHICLES**

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This article discusses the problem of assembling and configuring an affordable hardware-software complex of vibration-acoustic diagnostics of mechanisms. Due to the wear of the components and mechanisms of motor vehicles, various options for their maintenance and replacement can be applied - according to the regulations, which is not always economically profitable, according to the failure, which is rather unsafe, or based on the results of diagnostics. Diagnostics of the state of the mechanism by the operator's ear is often not the most accurate, and the use of special equipment for conducting machine vibration diagnostics is not widespread, due to the high cost. Thus, it was decided to independently build an analog that is more affordable. This device should not yield to ready-made solutions in measurement accuracy, and also it must be able to use different methods and algorithms in the software part, for applying different methods on the received vibroacoustic signal. The article will discuss some aspects related to the operation of the hardware part of the complex, including the interaction of individual hardware components.

**Key words:** motor vehicles, machine learning, rolling bearing, vibroacoustic signal, analog-to-digital converter, Arduino development platform.

В. Е. Гай, С. М. Шляпников

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Работа описывает создание системы сбора данных о качестве дорожного покрытия и последующие процессы обработки этих данных с помощью применения методов машинного обучения. На сегодняшний день существует достаточно много решений рассматриваемой задачи, однако, они либо не предоставляют достаточного качества распознавания, либо являются дорогостоящими и громоздкими. В основе рассматриваемого в данной статье метода лежит новый подход распознавания качества дорожного полотна с использованием акселерометра смартфона и дальнейшей классификацией полученных данных с помощью нейронной сети. Предлагаемый метод состоит из нескольких ключевых этапов: сбор данных на пользовательском устройстве (в его роли выступает смартфон), локальная предобработка данных, передача данных на сервер, объединение полученных данных с собранными ранее, сопоставление записанного маршрута с картой дорог, классификация полученных данных.

**Ключевые слова:** оценка качества дорожного покрытия, классификация неровностей дорожного полотна, применение методов машинного обучения для идентификации дефектов дороги.

### Введение

В настоящее время одной из самых важных и приоритетных задач при планировании маршрута поездки является качество дорожного покрытия. Ключевым этот фактор является по той причине, что неудовлетворительное содержание и обслуживание улично-дорожной сети влияет не только на ухудшение технических характеристик автотранспортного средства и преждевременный выход его из строя, но и оказывает огромное влияние на безопасность использования этих дорог. Так, согласно статистике, за 2016 год в России произошло 173 694 ДТП, причиной 71 550 аварий послужило плохое качество дорожного полотна (этот показатель вырос в сравнении с прошлым годом на 13.4%).

Как видно из статистики, динамика роста числа аварий остается положительной. По этой причине задача своевременного обнаружения проблемных участков автодорог (с последующим их устранением) становится всё более актуальной. К тому же, с ростом суммарной протяжённости дорог эта задача также становится всё более сложной и требует пересмотра традиционных методов контроля качества. На данный момент методы контроля качества регулируются Приказом Минтранса РФ от 8 июня 2012 г. N 163 "Об утверждении Порядка проведения оценки уровня содержания автомобильных дорог общего пользования федерального значения", однако, результаты оценки не публикуются в общем доступе, что делает невозможным использование этих данных в личных целях.

Также существуют другие программные продукты, которые собирают оценки качества дорог, однако недостатком является то, что принцип их основан на текстовом описании качества, оставленном пользователями.

Таким образом, можно выделить ряд недостатков существующих систем оценки:

- 1) сложность охвата большой и постоянно развивающейся сети дорог;

- 2) скрытость данных;
- 3) возможное наличие ложных или не точных сведений о качестве;
- 4) сложность сбора сведений.

Использование Автоматизированной Системы Контроля Качества Дорожного Полотна (АСККДП) позволит избежать перечисленных недостатков, а также расширить сферу применения полученных данных:

- 1) для личного использования при прокладывании безопасных и комфортных маршрутов передвижения;
- 2) для использования в сфере логистики, где качество дорожного полотна может оказать влияние на скорость и стоимость транспортировки;
- 3) в целях контроля качества для своевременного обнаружения и устранения дефектов дорожными службами.

### **Обзор существующих алгоритмов**

Для решения проблемы мониторинга и определения качества дорожного покрытия на данный момент существует несколько методов. Эти методы можно разделить на три категории:

- 1) системы, специализирующиеся на определении качества обслуживания дорожного полотна: наличия заснеженности, заледенения, влажности и скоплений воды;
- 2) системы, специализирующиеся на определении технического состояния дорог, которое включают в себя: определение ям, трещин и других повреждений полотна;
- 3) комплексные системы, ориентированные на решение одновременно двух вышеописанных задач.

Принцип действия систем из первой категории состоит в использовании цифровой камеры для получения двух разных поляризованных световых изображений одной и той же области. Для этого чаще всего используются стационарные установки, состоящие из штатива-трипода и цифровой камеры, установленной на нём. Коэффициент поляризации определяется с использованием двух поляризованных изображений: вертикального и горизонтального. После чего, с помощью коэффициентов имеется возможность определить отражательную способность, которая характеризует влажность поверхности. Кроме того, из горизонтального поляризованного изображения выделяется коэффициент Вейвлета, который используется для классификации состояния покрытия: заснеженность, заледенелость, сухость.

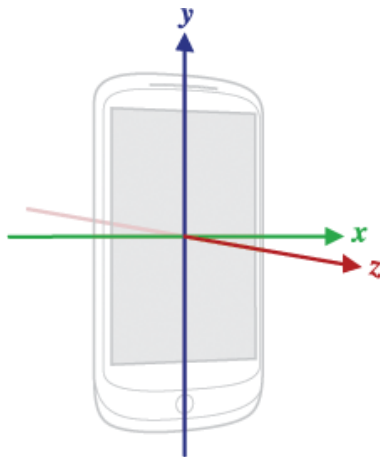
Системы второй категории основаны на использовании акселерометров и других датчиков, способствующих получению информации о качестве дорожного покрытия. Как правило, такие системы представляют из себя устройства, размещаемые на транспортном средстве и фиксирующие данные во время движения.

Третья категория представляется дорогостоящими системами-комплексами, комбинирующими в себе все описанные методы сбора данных. Такие системы могут размещаться не только на автомобилях, но и на вертолете.

### **Метод сбора данных**

Одним из самых важных этапов работы системы является процесс сбора данных во время движения транспортного средства. Для получения данных о вибрациях, которые от кузова машины передаются на закрепленный в удерживающем устройстве устройство, необходимо задействовать аппаратный компонент смартфона или планшета – акселерометр. С помощью акселерометра производятся замеры кажущегося ускорения. Эти измерения производятся с

максимально доступной частотой, которая определяется используемым в устройстве типом акселерометра. Все полученные значения записываются в память устройства и сохраняются на нем для дальнейшей работы с ними. Здесь стоит обратить особое внимание на то, что все данные, зафиксированные в ходе измерения, находятся в системе координат устройства, которая представлена на рис. 1.

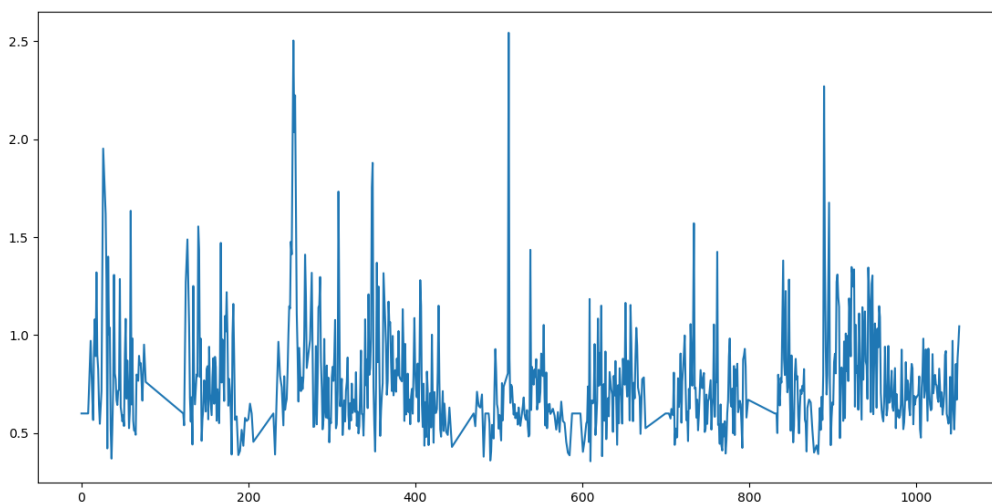


**Рисунок 1. Система координат устройства**

По обозначенной причине, прежде чем производить какие-либо действия с полученными данными, необходимо перейти от системы координат устройства к мировой системе координат. Кроме того, необходимо учитывать также и влияние силы земного притяжения ( $9.80665 \text{ м/с}^2$ ). Только после описанных преобразований можно производить дальнейшую обработку данных.

### **Подготовка данных и классификация**

Для обучения нейронной сети необходимо правильно подготовить и разметить собранные данные. На рис 2. представлен отрезок записанного трека, где по оси  $x$  отложено время, а по оси  $y$  – значение ускорения в каждый момент времени.



**Рисунок 2. График уровня вибраций для отрезка трека**



Из графика видно, что в некоторые моменты времени уровень вибраций гораздо более высокий, чем средние показатели. Именно этим «выбросам» соответствуют неровности на дороге.

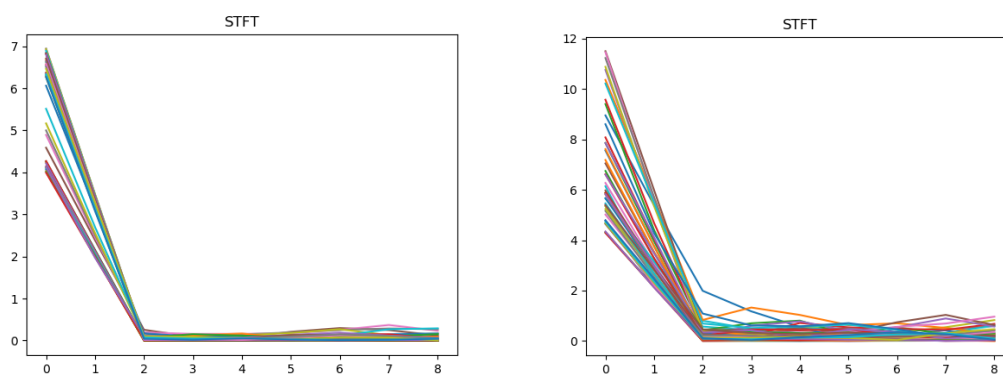
Для дальнейшей работы с данными необходимо произвести разметку. Так, каждому интервалу времени на графике присваивается определенный класс, описывающий качество участка дороги в тот момент времени. Для упрощения системы было принято решение провести тестирование, разделив объекты на два класса: ровная дорога, либо дорога, содержащая неровности. Несмотря на данное упрощение, система является достаточно гибкой для того, чтобы в дальнейшем расширить её дополнительными классами, такими как «выбоина», «искусственная неровность», «железнодорожный переезд» и другие. Но для добавления этих классов необходимо собрать и разметить еще больше данных.

Другим важным этапом подготовки данных является извлечение признаков, так как преобработанные данные по-прежнему не могут быть использованы сами по себе для классификации. Для извлечения признаков был выбран метод оконного преобразования Фурье, особенностью которого является использование оконного преобразования Фурье с движущейся по сигналу оконной функцией. В таком случае временной интервал разделяется на подынтервалы, и преобразование Фурье выполняется для каждого из подынтервалов в отдельности, при этом в каждом из них сигнал считается стационарным. Результатом является семейство спектров, которым отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна.

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{-\infty} s(t)w^*(t - b_k)\exp(-j\omega t) dt$$

**Рисунок 3. Оконное преобразование Фурье**

В результате извлечения признаков объектов были получены описания двух классов, представленных на рис 4.



**Рисунок 4. Признаки двух классов (слева - ровная дорога, справа - неровности)**

Как видно из рис 4, на обоих участках дороги в большинстве преобладают низкие частоты, однако на неровном участке возникают гораздо более значительные колебания высоких частот.

Поскольку данная задача является достаточно простой с точки зрения классификации, было принято решение использовать простую полносвязную нейронную сеть, содержащую пять полносвязных слоев по 256, 256, 128, 128 и 2 нейрона соответственно.

Нейронная сеть была обучена на 1000 примерах в течение 10 эпох, что на тестовом сете дало точность 95%.

## Заключение

В данной работе рассмотрен подход к построению модели и алгоритма классификации дорожных неровностей. Разработанная система имеет ряд преимуществ в сравнении с аналогами, а, следовательно, имеется большой потенциал для её дальнейшего развития и модернизации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

## Библиографический список

1. **Bhoraskar, R., Vankadhara, N., Raman, B., Kulkarni P.; Wolverine.** Traffic and Road Condition estimation using Smartphone Sensors. In: Fourth International Conference on Communication Systems and Networks- IEEE, 2012
2. **Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., Balakrishnan, H.** The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. In: MobiSys 2008: Proceeding of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. - ACM, New York, 2008
3. **Gonzalez, A., O'Brien, E.J., Li, Y.Y., Cashell, K.** The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2008
4. **Mohan, P., Padmanabhan, V.N., Ramjee, R.; Nericell.** Rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones. - ACM SenSys 2008, ACM, New York, 2008.

**V. E. Gai, S. M. Shlyapnikov**

## INFORMATION MODEL AND ALGORITHMS FOR ROAD SURFACE CLASSIFICATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** The paper describes classification system of road surface. The relevance of this work arises from the ever-increasing amounts of length of roads and the need to identify their quality.

**Design / methodology / approach:** The article will be considered approach to this problem based on the analyzing mobile's sensors and using machine learning to classify condition of road surface.

**Research limitations/implications:** The proposed method is the starting point in the new method development of road condition classification.

**Originality/value:** The value of the proposed method is in the new approach of road surface calculation using smartphone's sensors.

**Keywords:** road surface condition classification, road surface classification using mobile phone

В.А. Голубенко, О.В. Андреева

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ ПРИ ВЫБОРЕ ПАРКОВОЧНОГО МЕСТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Работа посвящена разработке системы помощи водителю при выборе парковочного места в виде портативной справочной системы, дающей рекомендации по результатам анализа фотографий. Актуальность данной темы возникает из-за отсутствия легкодоступной единой справочной системы касательно вопросов парковки, условиями современного городского ландшафта, а также высокой степени неосведомлённости о функциях определённых дорожных знаков даже среди опытных водителей. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы с использованием классификаторов общих категорий объектов типа You-Only-Look-Once в совокупности с классификатором дорожных знаков на базе свёрточных нейронных сетей.

**Ключевые слова:** нейронные сети, машинное обучение, YOLO, CNN, система помощи водителю, классификация объектов.

### Введение

Проблема стоянки/остановки автомобилей стремительно растёт в актуальности в условиях современного городского ландшафта. Непрерывный рост числа транспортных средств на человека вкупе с низким числом доступных специализированных мест для стоянки приводит к тому, что водители, зачастую неосознанно, осуществляют парковку в запрещенных для этого местах. В связи с этим актуальной является задача создания системы-помощника, позволяющего оценить возможность парковки в конкретной локации на основе анализа установленных в окрестности дорожных знаков.

В рамках поставленной задачи будут выполнены следующие подзадачи:

- разработка по для выделения и классификации дорожных знаков на изображении;
- разработка по для анализа извлеченной из совокупности знаков информации;
- составление базы данных с необходимой справочной информацией и рекомендациями.

### Сопутствующие работы

Исследования показывают, что наиболее точных результатов добиваются системы, разработанные с использованием принципов Deep Learning. В работе [1] для распознавания используется двухэтапная свёрточная нейронная сеть (CNN). На каждом изображении содержится лишь один дорожный знак. При размере тренировочных изображений в 32x32 пикселя, итоговая точность распознавания знаков достигает 97,17%, минимальная точность - 97,33%.

В работе [2] сравнивается большой комплекс алгоритмов машинного обучения для задачи распознавания дорожных знаков. Наибольшей точности достигает ансамбль CNN - 99,46%, наименьшая точность - 92,34% с помощью гистограмм ориентированных градиентов (HOG).

В статье [3] описывается процесс классификации знаков при помощи метода опорных векторов (SVM), где в качестве входных данных выступает вектор HOG для изображений размером 24x24 пикселя. В процессе тренировки была достигнута точность определения знаков в реальном времени в ~81%.

Подход к решению данной задачи, описанный в работе [4] использует для определения дорожных знаков классификатор AdaBoost в целях достижения большей скорости распознавания и организации realtime-режима работы. Результат тренировки - точность в 95.5%, что является достаточно высоким показателем в сравнении с другими методами, приведенными для сопоставления в статье.

### Методология

Для решения задачи будет использоваться архитектура CNN, написанная с помощью Py-Torch и развёрнутая в готовом виде на платформе Android. Для построения модели классификации в данной работе использовалась база данных дорожных знаков RTSD, предоставляемая Лабораторией КГиМ на базе МГУ им. М.В. Ломоносова [5].

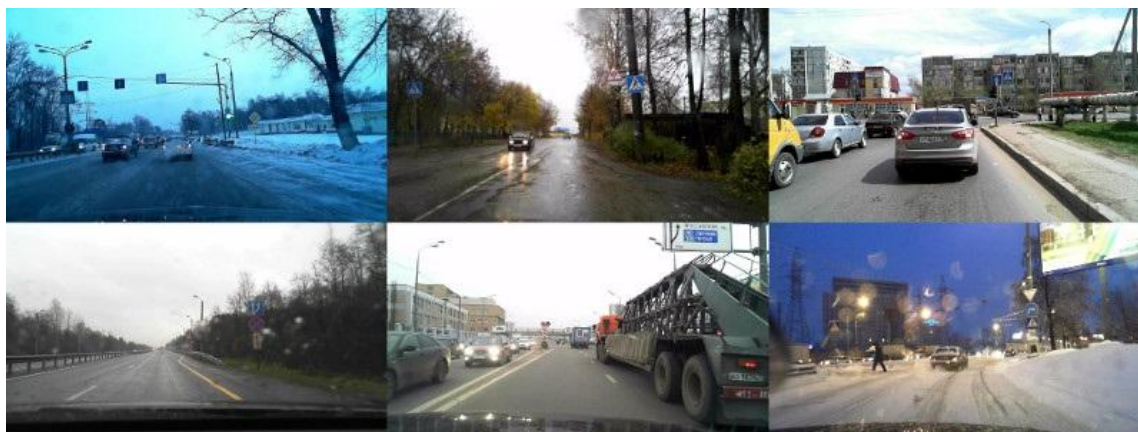


Рисунок 1. Примеры изображений из базы RTSD

Для успешного определения возможности парковки в конкретном месте система должна уметь распознавать перечисленные далее знаки.

1. Явно запрещающие остановку, парковку или движение транспортных средств.

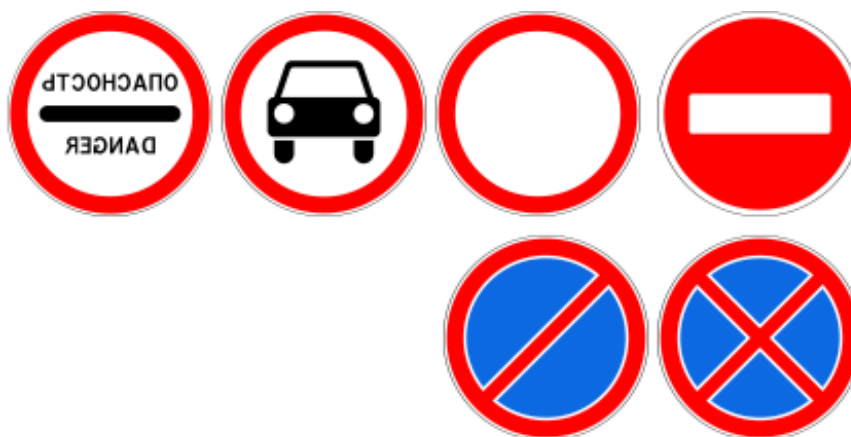


Рисунок 2. Необходимые запрещающие знаки

2. Указывающие на специализированные зоны, не предназначенные для автомобилей.

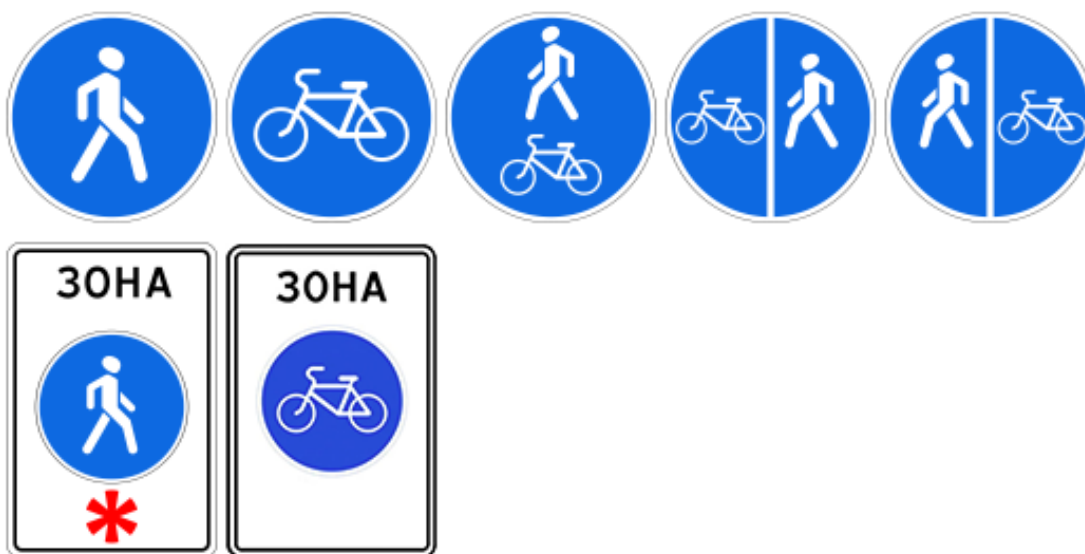


Рисунок 3. Необходимые указательные знаки

3. Запрещающие знаки с ограничением по дате/времени.

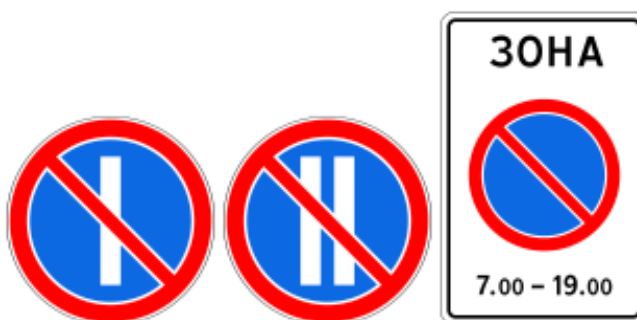


Рисунок 4. Необходимые специальные знаки

4. Знаки дополнительной информации (дата, время, расстояние, виды транспортных средств, ограничения).

### Архитектура системы

Полная модель будет состоять из двух частей – модуля первичной обработки изображения и аналитического модуля. В основе обоих модулей лежит свёрточная нейронная сеть.

Модуль первичной обработки включает в себе реализацию алгоритмов обнаружения объектов (таких как YOLOv3) с использованием машинного обучения. Задача данного модуля – выполнение первичной классификации путём выделения на исходном снимке границ ключевых объектов – дорожных знаков. На основе полученных границ производится сохранение объектов в качестве отдельных обрезанных изображений, используемых для дальнейшей классификации и анализа.

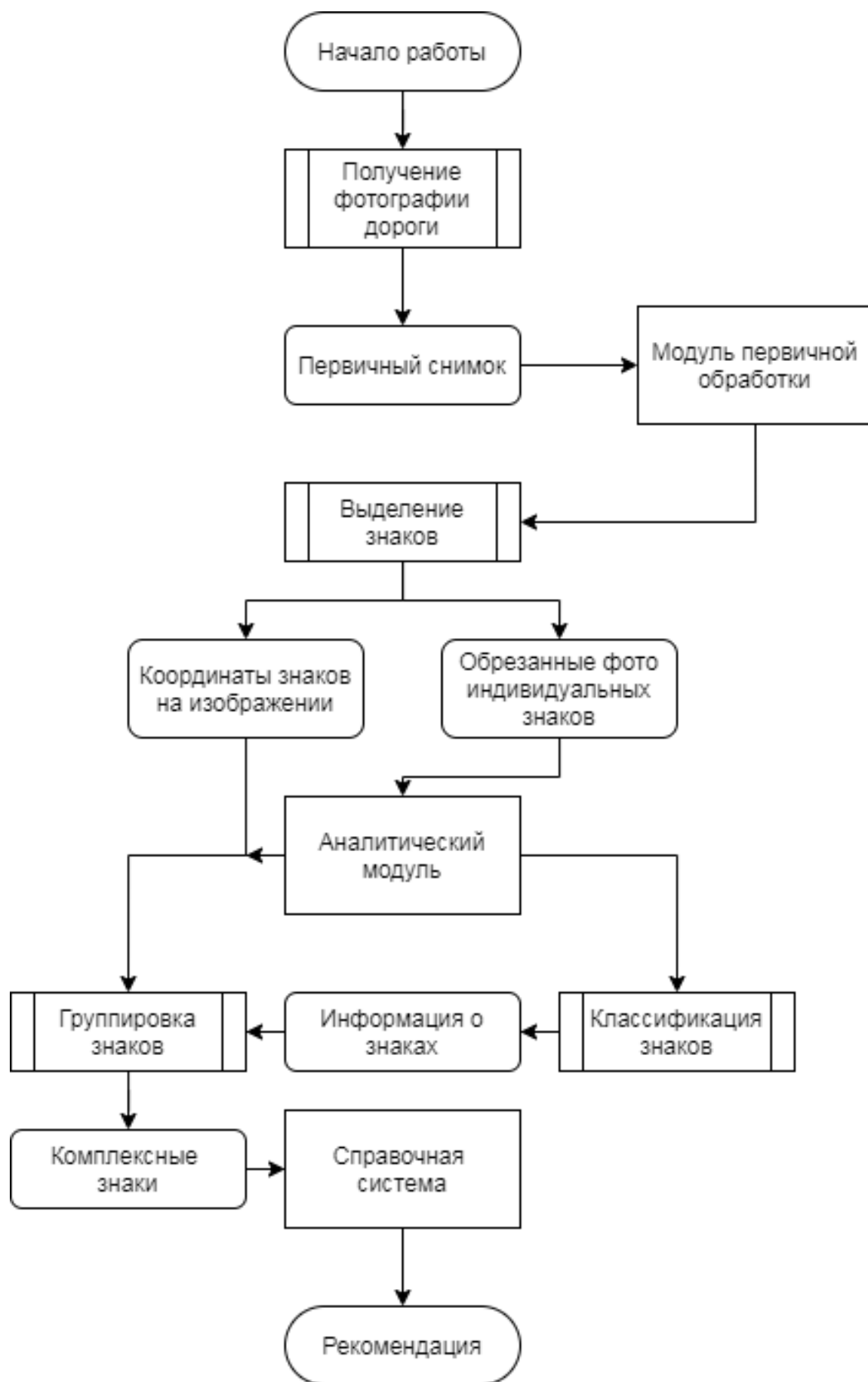


Рисунок 5. Архитектура предложенной системы

Модуль анализа выполняет задачу классификации всех знаков, обнаруженных на оригинальном снимке, фильтрации знаков и составления рекомендаций. Так как в некоторых случаях для правильного чтения знаков важно их взаимное расположение (например, указатель дистанции для запрещающего знака), система должна уметь логически группировать подобные комплексные знаки в одну общую структуру и проводить повторную проверку на действительность в конкретной ситуации.

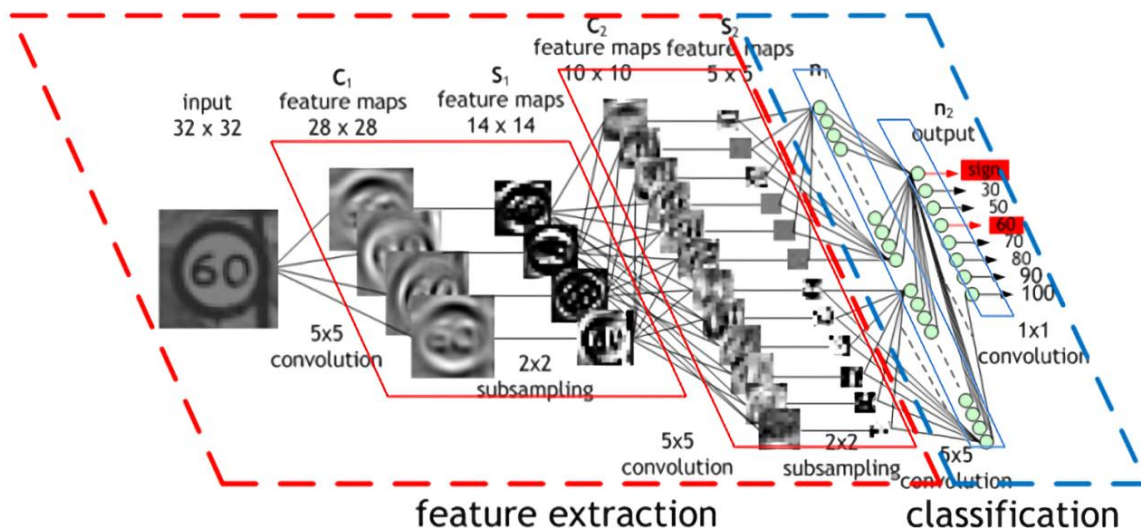


Рисунок 6. Структура свёрточной нейронной сети (CNN)

### Заключение

В данной работе рассмотрена структура интеллектуальной системы помощи водителю при парковке на основе анализа близлежащих дорожных знаков. Показана теоретическая составляющая архитектуры данной системы, был написан прототип для определения ограниченного набора знаков. На основе заключений сопутствующих работ можно сделать вывод об удовлетворении выбранной структуры критерию точности.

### Библиографический список

1. Sermanet, P., Lecun, Y. Traffic sign recognition with multi-scale convolutional networks // International joint conference on , 2011.
2. Stallkamp, J., Schlipsinga, M., Salmena, j., igelb, C. man vs. Computer: benchmarking machine learning algorithms for traffic sign recognition // International joint conference on neural networks, 2011.
3. Greenhalgh, J., Mirmehdi, M. Real-time detection and recognition of road traffic signs // Ieee transactions on intelligent transportation systems, 2012.
4. Santos, A., Abu, P. A., Oppus, C., Reyes, R. Traffic sign detection and recognition for assertive driving // International symposium on multimedia and communication technology (ismac), 2019.
5. **Шахуро, В.И.**, Конушин, А.С. Российская база данных автодорожных знаков // НИУ ВШЭ, МГУ им. М.В. Ломоносова. url: <http://www.computeroptics.smr.ru/ko/pdf/ko40-2/400221.pdf>

**O.V. Andreeva, V.A. Golubenko**

**SOFTWARE SYSTEM WITH NATURAL LANGUAGE INTERFACE**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

The following work is dedicated to developing of a driver parking assist system in the form of a portable help system issuing recommendations based on the analysis of surrounding street sign. The relevance of this work comes from a combination of lack of unified help system in regards to vehicle parking, the conditions of modern city landscape and a general lack of awareness of the function of particular sets of street signs among drivers, even those with considerable experience. This article will review an approach to solving this problem using general object classifiers such as You-Only-look-Once in conjunction with a street sign classifier based on Convolution Neural Networks.

**Keywords:** neural networks, machine learning, YOLO, CNN, driver assistance systems, object classification.



Н.А. Гусев, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМА ПО ВИБРАЦИОННОМУ СИГНАЛУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Механизмов, которые воспроизводят вибрационный сигнал, довольно много. Одним из них может быть подшипник качения, который является центральным элементом ходовой части, от которого зависит как работоспособность автомобиля, так и безопасность водителя, пассажиров и других участников дорожного движения. Выход из строя (износ) любого из подшипников приводит к тому, что автомобиль становится неуправляемым. Именно поэтому так важна вибродиагностика подшипников качения, которая позволяет обнаружить зарождение дефектов и прогнозировать их развитие, позволяя, тем самым, своевременно принять меры по их устранению и полностью исключить возникновение аварийных отказов.

**Ключевые слова:** вибрационный сигнал, вибродиагностика, обнаружение зарождения дефектов.

### Введение

Подшипники качения различных типов и марок, шариковые и роликовые, радиальные и радиально - упорные, однорядные и двухрядные и т. д. широко применяются во вращающемся оборудовании различного назначения. Без преувеличения можно сказать, что большая часть ремонтов оборудования, особенно малой и средней мощности, производится по причине дефектов опорных подшипников качения. Поэтому вопросы оперативной оценки технического состояния таких подшипников, диагностики возникающих в них дефектов, а также прогнозирования возможности их дальнейшей эксплуатации, занимают одно из самых важных мест в работе служб вибрационной диагностики. Поэтому большое количество исследований направлено на мониторинг подшипников.

Обратимся к системам обнаружения повреждений подшипников, где используются различные методы и классификаторы для того, чтобы обеспечить более высокие показатели обнаружения дефектов. Такие интеллектуальные системы обычно состоят из нескольких основных частей: сбор данных, обработка данных и классификация данных. Временная область, частотная область и анализ в масштабе основными областями, где методы обработки сигналов используются при выделении признаков. Извлечение признаков и классификация по признакам - это две уникальные фазы систем поддержки принятия решений. Предложенный метод, в статье, не требует какой-либо формы преобразования, извлечения признаков и постобработки. Этапы выделения признаков и классификации признаков для обнаружения неисправностей подшипников могут быть объединены в модель с одномерной сверточной сетью, такая «умная» модель работает напрямую с необработанными данными, чтобы определить аномалии вибрационного сигнала.

### Система сбора данных

Для обеспечения сбора данных вибрационного сигнала была разработана система, которая удовлетворяет условиям корректного получения данных, а также, позволяет предоставить возможность многократного использования для различных экспериментов. Система состоит

из двух элементов: установка для тестирования подшипника и датчика сбора вибрационного сигнала.

### Установка для тестирования подшипника

На установке тестируется только по одному подшипнику за один раз. Делается это для того, чтобы избежать наложения вибрационных сигналов. При проведении эксперимента, необходимо учитывать состояние нетестируемых подшипников, участвующих в работе станда (подшипники вала двигателя, подшипники тестирующего вала).

Для увеличения срока работы станда, а так же чистоты экспериментов, необходимо снизить нагрузку на ось двигателя, а так же подобрать такие подшипники для опор тестирующего вала, чтобы их ресурс намного превосходил тестируемые подшипники. Состав установки для тестирования:

- двигатель,
- ведущий шкив,
- вал для тестирования подшипников (2 шт.).

Рассмотрим этапы разработки системы



Рисунок 1



Рисунок 2

На рис. 1 и 2 представлены этапы сборки двигателя и ведущего шкива.



**Рисунок 3**



**Рисунок 4**

Рис.3 и 4 представляют финальный вариант сборки установки для тестирования подшипника.

### **Датчик сбора вибрационного сигнала**

Датчик доступен в общепромышленном исполнении, такой интегральный датчик предназначен для измерений абсолютной вибрации любых роторных машин. Использование устройства: Датчик, закрепляется непосредственно на машине и генерирует токовый сигнал 4...20 мА, пропорциональный скорости или ускорению вибрации. Корпус датчика выполнен из нержавеющей стали и имеет резьбовое соединение для крепления на корпусе машины.

Электрическое подключение выполняется 2-полюсным коннектором или 4-полюсным коннектором. При эксплуатации датчик не требует настройки и технического обслуживания.



**Рисунок 5**

Сбор данных вибрационного сигнала происходит в формате Matlab, где находятся показания вибрационного сигнала.

### **Построение обученной модели нейронной сети**

Для обучения модели, строится определенный сценарий, где основными шагами являются: загрузка данных, тренировка, обучение нейронной сети. За основу взята одномерная сверточная нейронная сеть. Основным преимуществом использования одномерной сверточной сети является то, что ручное извлечение признаков, таких как анализ спектра, статистические особенности не требуется. После нормализации данные сигнала могут быть непосредственно переданы для обучения. Рассмотрим основные этапы проектировки обученной модели.

Для обеспечения производительности, облегчения работы с нейронными сетями, были использованы такие инструменты, как:

Tensorflow - открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия

PyTorch – библиотека машинного обучения для языка Python с открытым исходным кодом, созданная на базе Torch. Используется для решения различных задач: компьютерное зрение, обработка естественного языка.

GoogleColaboratory - это не так давно появившийся облачный сервис, направленный на упрощение исследований в области машинного и глубокого обучения. Используя Colaboratory, можно получить удаленный доступ к машине с подключенной видекартой, причем совершенно бесплатно, что сильно упрощает жизнь, когда приходится обучать глубокие нейросети. Можно сказать, что она является некоторым аналогом гугл-документов для Jupyter Notebook

Визуализируем основные этапы сценария получения обученной модели, который спроектирован на языке Python.

	label	filename	0	1	2	3	n
9979	3	/content/drive/My/OR007@6_1.mat	0.737489	0.460330	-0.834220	-0.434261	0.841080
13936	3	/content/drive/My/OR021@6_1.mat	-0.239002	-0.061048	0.009121	-0.167386	-0.262151
6213	2	/content/drive/My_DE/IR014_1.mat	0.008688	0.210904	-0.551823	-0.028614	-0.141501
8546	3	/content/drive/My_DE/OR007@12_3...	-0.478320	0.406876	0.481065	-0.110545	-0.033186
13988	3	/content/drive/My_DE/OR021@6_1.mat	0.360689	-0.041516	-0.477721	0.221074	0.472091

**Рисунок 6. Загрузка данных**

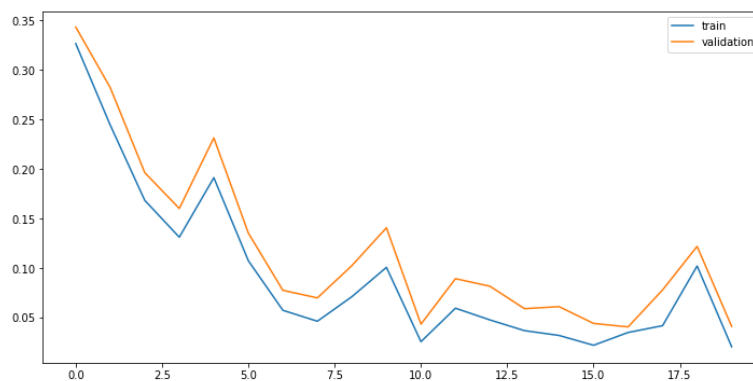
EPOCH	Train Loss	Val Loss	Train Acc	Val Acc
0	0.32650	0.34327	0.88221	0.87530
1	0.24424	0.28207	0.91185	0.90031
2	0.16825	0.19625	0.93789	0.93388
3	0.13110	0.16009	0.95048	0.94142
4	0.19117	0.23133	0.92307	0.91709
5	0.10732	0.13524	0.95340	0.94416
6	0.05727	0.07746	0.97781	0.96951
7	0.04624	0.06981	0.98218	0.97465
8	0.07106	0.10241	0.97062	0.95923
9	0.10065	0.14061	0.95991	0.94998
10	0.02559	0.04328	0.99083	0.98321
11	0.05940	0.08923	0.97593	0.96643
12	0.04753	0.08156	0.98509	0.98013
13	0.03674	0.05891	0.98518	0.97705
14	0.03189	0.06099	0.98989	0.98287
15	0.02198	0.04405	0.99212	0.98493
16	0.03488	0.04050	0.98501	0.98287
17	0.04175	0.07786	0.98467	0.97705
18	0.10202	0.12183	0.96342	0.95820
19	0.02053	0.04106	0.99160	0.98390

CPU times: user 17min 28s, sys: 18.1 s, total: 17min 46s  
Wall time: 17min 48s

**Рисунок 7. Тренировка**

```
print(validate(model, valid_d1, loss_func))
(0.02163568036938638, 0.9945186707776635
CPU times: user 2.59 s, sys: 52.9 ms, total: 2.64 s
Wall time: 2.65 s
```

**Рисунок 8. Валидация**



**Рисунок 9. Обучение сети и анализ результатов**

В результате после обучения и тренировки сети мы получаем натренированную модель, которая может работать напрямую с необработанными данными, чтобы определить состояние вибрационного сигнала.

## Результаты

Цель работы заключалась в том, чтобы создать полноценную систему, которая сможет обнаружить повреждения подшипника посредством снятия вибрационного сигнала с данной детали и определения состояния проверяемого подшипника. Ранее мы рассмотрели два этапа построения нашей системы, ими были: полноценная система сбора данных, состоящая из установки для тестирования подшипника и датчика сбора вибрационного сигнала, обученная модель нейронной сети, содержащая такие этапы, как: загрузки данных, тренировка обученной сети, обучение. И финальный этап создания полноценной системы – это разработанный графический интерфейс, который связывает обученную модель нейронной сети на различных вибрационных сигналах, для определения результирующего состояния подшипника, с которого снимается вибрационный сигнал и подается обратно в систему.

Рассмотрим созданный интерфейс данного проекта.

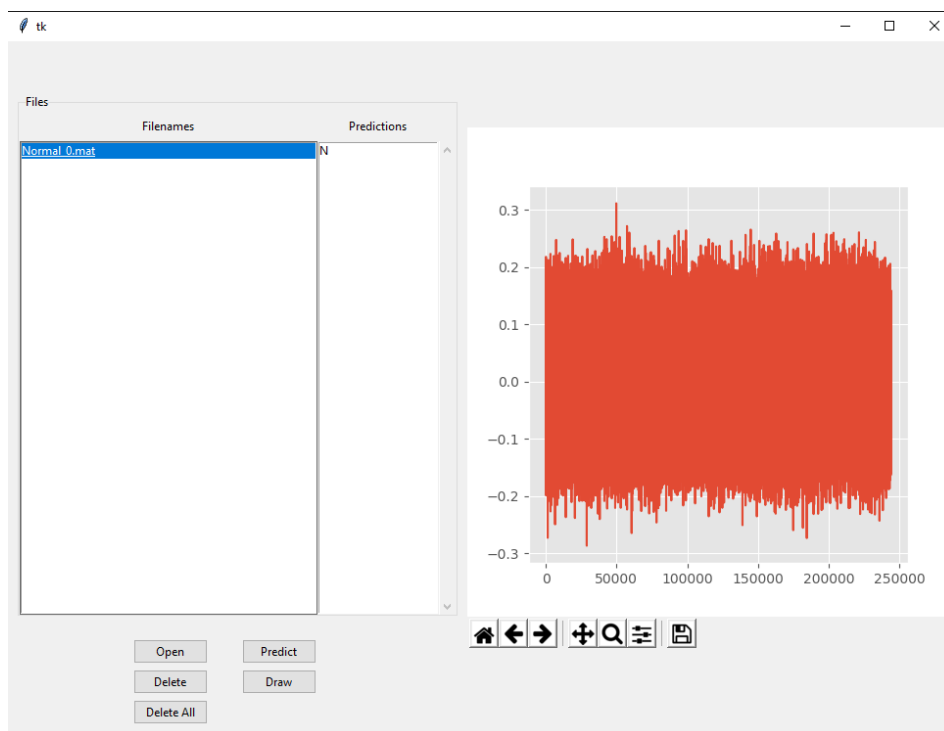


Рисунок 10. Визуализация вибрационного сигнала

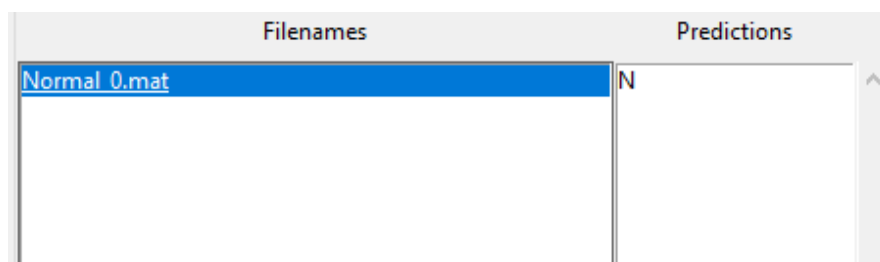


Рисунок 11. Определение состояния



Было определено состояния класса – N, что означает состояние подшипника без повреждений.

### Заключение

В работе мы предложили систему мониторинга состояния подшипника с адаптивной реализацией сверточных нейронных сетей, которая способна объединить два основных блока традиционного подхода к обнаружению неисправностей: выделение признаков и классификация. Предлагаемая система обладает способностью обучаться, извлекая оптимальные признаки при надлежащем обучении и, таким образом, ее можно применять к любым видам данных различных подшипников. Поскольку необработанные данные о вибрации подшипника напрямую поступают в предлагаемую систему, вычислительная нагрузка, из-за выделения признаков на ранней стадии, устраняется на этапе обнаружения неисправностей. Предлагаемая система испытана на реальных данных вибрации подшипника. Точность обнаружения неисправностей более 97% была достигнута в экспериментальных результатах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

### Библиографический список

1. **H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and H. Meshgin-Kelk**, *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*, CRC Press, 2012.
2. **R. B. Randall**, *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011. View at: Publisher Site
3. **H. Henaou, G.-A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas et al.**, “Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 31–42, 2014. View at: Publisher Site | Google Scholar
4. **W. Zhou, T. G. Habetler, and R. G. Harley**, “Bearing fault detection via stator current noise cancellation and statistical control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4260–4269, 2008. View at: Publisher Site | Google Scholar.

**V.E. Gai, N.A. Gusev**

### SOFTWARE SYSTEM FOR DIAGNOSING THE STATE OF THE MECHANISM BY VIBRATION SIGNAL

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

There are a lot of mechanisms that reproduce a vibrational signal. One of them, for example, can be a rolling bearing, which is the central element of the chassis, on which depends on the performance of the car, as well as the safety of the driver, passengers and other road users. Failure of any of the bearings leads to the fact that the car becomes uncontrollable. That is why the vibration diagnostics of rolling bearings is so important, which makes it possible to detect the onset of defects and predict their development, thereby allowing timely measures to be taken to eliminate them and completely eliminate the occurrence of emergency failures.

**Key words:** vibration signal, vibration diagnostics, detection of defect nucleation

**В. Е. Гай, А. П. Густякова**

## **МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена моделям и алгоритмам распознавания дорожных знаков. Актуальность этой темы повышается в связи с необходимостью повышения безопасности дорожного движения. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы на основе теории активного восприятия.

**Ключевые слова:** теория активного восприятия, алгебра групп, модель и алгоритмы распознавания дорожных знаков.

### **Описание задачи распознавания дорожных знаков**

На сегодняшний день обработка изображений имеет множество областей применения, таких как медицина, искусственный интеллект, робототехника и т. д. Системы распознавания дорожных знаков являются одними из наиболее актуальных областей, использующих компьютерное зрение. По мере того, как мир движется к беспилотным транспортным средствам, все большие требования возникают к безопасности дорожного движения. Каждый год тысячи дорожно-транспортных происшествий происходят по всему миру, что приводит к гибели людей. При движении по перегруженной дороге иногда трудно следить за встречным движением, а также за тем, что позади, при попытке сохранить скорость. Такие системы могут помочь водителям замечать знаки, которые они, возможно, не увидели заранее. Увеличение вычислительной мощности машин сделало возможным обнаружение и распознавание дорожных знаков в режиме реального времени. Распознавание дорожных знаков актуально не только как помощь водителям, но и для пешеходов. Иногда возникают сложности в расшифровке знаков, особенно у людей без знаний ПДД.

Однако при обработке изображений знаков возникают некоторые проблемы. Одними из основных проблем являются низкое разрешение камеры, несовершенное состояние знака, освещенность, погодные условия, такие как дождь, снег или туман. Все это может повлиять на цветовой анализ и извлечение формы знаков. Чтобы правильно распознать признаки, вышеупомянутые проблемы должны быть должным образом решены. В большинстве опубликованных работ система разработана с использованием трехэтапного последовательного подхода:

### **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА -> ДЕТЕКТИРОВАНИЕ -> ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ**

Далее будут приведены основные проблемы в методах распознавания дорожных знаков и рассмотрены различные методы их детектирования. Настоящая работа посвящена применению теории активного восприятия (ТАВ) к решению задачи распознавания дорожных знаков.



## **Обзор подходов к детектированию вредоносного воздействия на камеру Способы предварительной обработки**

Предварительная обработка изображений имеет особое значение в ускорении процесса детектирования. Изображения, полученные с камеры, представляются цветовым пространством RGB. Такие изображения довольно чувствительны к колебаниям освещения. Чтобы уменьшить эффект засвечивания, необходимо сделать правильное преобразование цветового пространства. Наиболее известными цветовыми пространствами, используемыми для целей обнаружения, являются следующие: HIS, YCbCr, HSV, YUV и RGB. Цветовое пространство YUV дает хорошие результаты для красных, желтых, оранжевых знаков, но плохо работает с белыми и черными цветами. Авторы работы [1] использовали отношения между интенсивностью данного канала и суммой всех интенсивностей канала RGB.

Цветовое пространство HSV (англ. Hue, Saturation, Value - тон, насыщенность, значение) использовалось во многих работах, представленных Уэйтом и Оруклу в работе [2] и авторами в [3, 4]. Это цветовое пространство является предпочтительным, поскольку оно устойчиво к влиянию света на цвета. Формулы взаимопревращения RGB-HSV являются нелинейными и, следовательно, предполагают высокие вычислительные затраты. Цветовая модель YCbCr была использована авторами в работе [5]. Компонент цветности (Y) был использован для обнаружения признаков. Авторы работали над изображениями в оттенках серого, так как это дало хорошие результаты, независимо от условий освещения (днем / ночью / во время дождя). Фэн, Чен и Фу в работе [6] использовали концепцию предварительно сохраненных оттенков для классифицирования цветов. Таким образом, значения оттенков сохранялись заранее, и цвет метки был рассчитан путем вычисления сходства со всеми доступными оттенками для улучшения качества классификации.

### **Методы обнаружения**

Процесс обнаружения извлекает области интереса из изображения и выполняет их распознавание. Существует много методов для обнаружения дорожных знаков признаков через цвет, форму и с помощью методов машинного обучения.

### **Детектирование с помощью цвета**

Методы обнаружения на основе цвета направлены на поиск области интереса с помощью методов пороговых значений или сегментирования. В середине 1990-х годов несколько исследователей использовали модель цветового пространства HIS. Авторы в работе [1] использовали пороговые значения цветов для сегментирования изображения. Они реализовали пороговое значение с использованием 16-разрядной справочной таблицы.

С.Н. Lai и С.С. Yu в [5] выполнили определение цвета в пространстве HSV. Они пришли к выводу, что насыщенность цвета показывает значительные изменения, когда изображения получены с разных устройств. Авторы работы [7] изучали влияние света на цвет дорожных знаков в течение дня и ночи и пришли к выводу, что цвет придорожного изображения может быть искажен из-за света, и это может повлиять на качество изображений.

Тем не менее, они подчеркнули, что освещение не может повлиять на различия компонентов RGB для дорожных знаков. К сожалению, все алгоритмы сегментации, основанные на пороговых значениях цветов, приходится постоянно корректировать пороговые значения. Поэтому цветовая сегментация всегда требует фиксации порога.

## **Методы, основанные на обучении цветам**

Различные методы обучения были реализованы для дорожных знаков. Аояги и Асакура в работе [9] были первыми, кто работал в области генетического алгоритма для их обнаружения. Они использовали сглаживающий фильтр и фильтр Лапласа, чтобы удалить шум, а затем генетический алгоритм для детектирования. На основе метода опорных векторов авторы в [10] реализовали метод для классификации пикселей с использованием информации о цвете. Авторы пришли к выводу, что сегментация на основе алгоритмов обучения дают лучшие результаты по сравнению с цветовой пороговой сегментацией.

## **Детектирование на основе форм**

Методы обнаружения на основе цветов полезны, только при использовании цветной камеры с высоким разрешением. Такие методы обнаружения не будут эффективными в ночное время, когда присутствует искусственное освещение, как подтверждают авторы в работе [11]. Детектирование может также быть сделано по форме. Обнаружение формы эффективно только при частом изменении освещения. Кроме того, обнаружение на основе форм работает на изображениях в градациях серого. Форма обычно извлекается либо по краям, соответствию шаблонам или с помощью преобразования Хафа.

## **Методы распознавания**

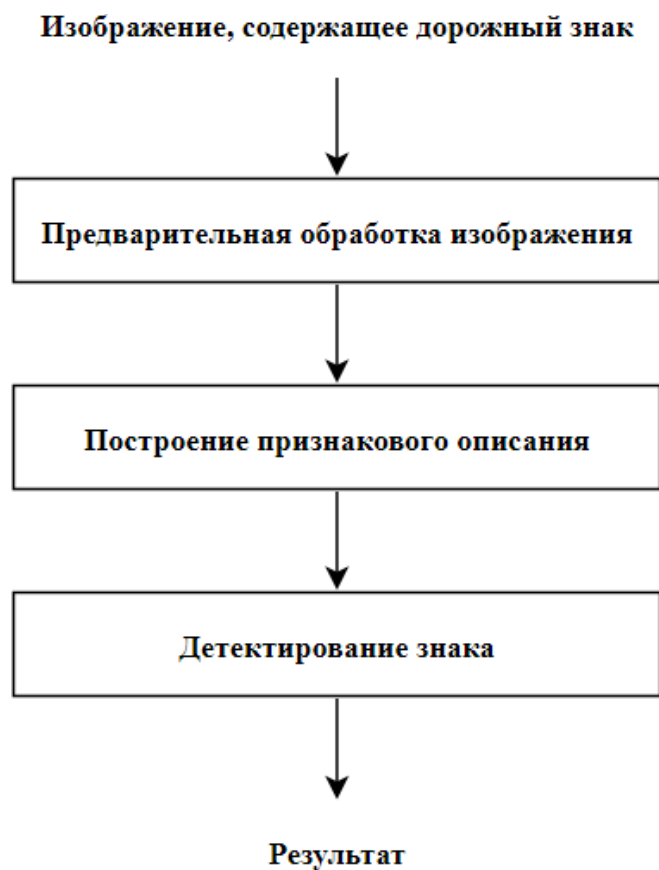
Этап распознавания получает регион интереса после выполнения этапа обнаружения, который, возможно, содержит один или несколько признаков. Дорожные знаки могут быть детектированы в основном с помощью двух подходов: по соответствию шаблону или с помощью методов машинного обучения.

## **Распознавание по шаблону**

Такой алгоритм сохраняет несколько образцов изображений в базе данных. Сопоставление с шаблоном было использовано авторами в [13] для классификации. Они рассчитали расстояние между потенциальными регионами интереса и различными размерами шаблонов изображений в базе данных. Шаблон, имеющий минимальное расстояние помечается согласованным знаком. Тем не менее, такой алгоритм не работает на перевернутых, поврежденных или частично скрытых знаках.

## **Распознавание с использованием машинного обучения**

Существует много методов машинного обучения, таких как SVM, нейронные сети, которые могут быть использованы для распознавания знаков. Авторы в работе [12] использовали каскадный классификатор и гистограммы направленных градиентов для распознавания знаков. Авторы работы [8] создали SURF базу шаблонов дорожных знаков. Сам алгоритм SURF используется для попарного сравнения знаков.



### **Подход к распознаванию дорожных знаков с помощью ТАВ**

Теория активного восприятия была разработана В.А. Утробиним, профессором НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. Данная теория используется для формирования признакового описания и последующей обработки и анализа изображений. Теория активного восприятия базируется на операции  $U$  преобразования, применяемой к исследуемому изображению.  $U$  преобразование заключается в последовательном применении к изображению операций интегрирования и дифференцирования. В результате этого формируется набор спектральных коэффициентов, который и является признаковым описанием изображения. Данные спектральные коэффициенты могут быть использованы как глобальное признаковое описание проанализированного сегмента изображения. В данной работе признаковое описание реализуется с помощью алгебры групп. Алгебра групп – раздел теории активного восприятия, предназначенный для выявления зависимостей между спектральными коэффициентами, полученными на этапе вычисления  $U$ -преобразования. Для этого в алгебре групп вводятся понятия операторов, полных и замкнутых групп. Информация о наличии тех или иных полных и замкнутых групп в спектре изображения или его сегмента, а также массы данных групп являются базисом, на котором формируется еще один вид признакового описания изображения, предлагаемый теорией активного восприятия.

Данный вид признакового описания является более сложным и массивным по сравнению со спектральным представлением изображения, полученным в результате  $U$ -преобразования. Однако признаковое описание на основе алгебры групп несет в себе больше информации, в том числе о корреляционных связях между спектральными коэффициентами, что позволяет иметь более точное описание исходного изображения. Таким образом, схему решения можно представить в качестве последовательности, изображенной на рисунке.

Предварительная обработка изображения – нормализация, вычисление функции яркости, фильтр Гаусса.

Формирование глобального признакового описания объекта – теория активного восприятия (U-преобразование, алгебра групп).

Принятие решения о локализации объекта – минимальное евклидово расстояние от данного объекта до эталонных объектов.

Из перечисленных этапов можно сделать вывод о том, что использование данного набора вариантов реализации каждого из шагов решения задачи обнаружения объекта на изображении свидетельствует о научной новизне предлагаемого метода.

### **Заключение**

Предлагаемый в статье алгоритм распознавания дорожных знаков заключается в новой комбинации подходов для решения задачи на разных ее этапах, а так же использовании нового способа формирования глобального признакового описания на этапе формирования признакового описания. В данной работе, таким подходом является использование инструментария теории активного восприятия. Данный подход устойчив к помехам на изображении, не зависит от формы знака, освещения и погодных условий. Таким образом, инструментарий теории активного восприятия решает актуальную задачу распознавания дорожных знаков.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### **Библиографический список**

1. Arturo Escalera, Lius Moreno, Miguel Salichs and Jose Armingol, "Road traffic Sign Detection and Classification", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.6, pp.848-859, December 1997.
2. Sheldon Waite and Erdal Oruklu, "FPGA-Based Traffic Sign Recognition for Advanced Driver Assistance Systems", Journal of Transportation Technologies, Vol.3, pp.1-16, November 2012.
3. Chokri Souani, Hassene Faiedh and Kamel Besbes, "Efficient algorithm for automatic road sign recognition and its hardware implementation", Journal of Real Time Image Processing, Vol.9, pp.79-93, April 2013.
4. Karla Brkic, "An overview of traffic sign detection methods", Department of Electronics, Microelectronics, Computer and Intelligent Systems Faculty of Electrical Engineering and Computing Unska, 2010.
5. Ching-Hao Lai and Chia-Chen Yu, "An efficient real-time traffic sign recognition system for intelligent vehicles with smart phones", In Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), 2010 IEEE International Conference, pp. 195-202, 2010.
6. C.Y.Fang, S.W.Chen and C.S. Fuh, "Road sign detection and tracking", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 52, No. 5, pp. 1329-1341, September 2003.
7. M. Benallal and J. Meunier, "Real-time color segmentation of road signs", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol.3, pp.1823-1826, 2003.
8. E. Oruklu, D. Pesty, J. Neveux and J. E. Guebey, "Real Time Traffic Sign Detection and Recognition for in car Driver Assistance Systems", IEEE International Symposium on Circuits and System, pp.976-979, 2012.

9. Y. Aoyagi and T. Asakura, "A study on traffic sign recognition in scene image using genetic algorithm and neural networks", IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol. 3, pp.1838-1843,199
10. H.G. Moreno, S.M. Bascón, P.G. Jiménez and S.F.Arroyo "Goal Evaluation of Segmentation Algorithms for Traffic Sign Recognition", IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 4, pp.917-930,2010.
11. Miguel Angel García-Garrido, Miguel Angel Sotelo and Ernesto Martin- Gorostiza," Fast traffic sign detection and recognition under changing lighting conditions", In IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 811-816, 2006.6.
12. J. Greenhalgh and M. Mehdi," Real-Time Detection and recognition of road traffic signs", IEEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol.13, No.4, pp.1498-1506,2012
13. Karunalithika, R.P.Jayasundra, M.A.Rasamjan, D.N. Senayanke and V.N.Vithana," Road sign identification application using image processing and augmented reality", International journal of advanced computer technology, Vol.4,Issue.11.pp.79-93,2015.

**V. E. Gai, A. P. Gustyakova**

### AND ALGORITHMS FOR TRAFFIC SIGNS RECOGNITION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** This work is devoted to models and algorithms for recognizing road signs. The relevance of this topic is increasing due to the need to improve road safety. The article will consider an approach to solving this problem based on the theory of active perception.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in researching existing approaches to the problem of traffic signs recognition and offers a new approach based on the theory of active perception.

**Originality/value:** Developed approach is far more universal than some existing methods, have less conditions and restrictions to the original images.

**Key words:** theory of active perception, algebra of groups, model and algorithms for traffic signs recognition

В. Е. Гай, А. А. Зайцев

## МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕКСТОВЫХ БЛОКОВ В ИЗОБРАЖЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Работа посвящена обзору существующих подходов в обнаружении текстовых блоков в изображении печатных документов. Представлен и разобран один из алгоритмов обнаружения текстовых блоков.

**Ключевые слова:** обнаружение текста, сегментация.

### Введение

Одним из самых быстрых и удобных способов перевода информации из физического формата в электронный вид является сканирование документов. Результатом данного процесса будет электронный файл, представленный в виде графического изображения. Графическое изображение не позволяет производить необходимый набор действий, как при работе с текстом, что делает его менее функциональным. Основные отличия хранения текстовой информации: экономия затрат на хранении, более обширный список сценариев использования документа. Далее будут приведены основные методы и алгоритмы обнаружения текста на изображении. Настоящая работа посвящена применению метода гистограмм к решению задачи обнаружения текстовых блоков в изображении печатных документов.

### Обзор подходов к обнаружению текстовых блоков в изображении печатных документов

Во всех системах распознавания текстовых блоков вначале выполняются то или иное улучшение качества и анализ изображения, поданного на обработку. В том числе применяются специальные фильтры восстановления поврежденных изображений. В ходе этого этапа определяются области, рекомендуемые для распознавания, делаются оценки ориентации текста, выделяются отдельные символы и строки. На втором этапе выполняется работа по непосредственному распознаванию текста. Классические способы обнаружения текстов на изображениях основаны на:

1) использовании контурной информации (каждый символ обладает четко выраженной контурной структурой); для локализации текста тут используют такие приемы как скелетизация (skeletonization) [1], выделение краев (edgedetection) и выделение углов (cornerdetection) [2], методы на основе инвариантных моментов (invariantmethods) [3] и пр. В случае изображений со сложным фоном быстрая обработка данных, полученных на этапе предобработки, может представлять из себя нетривиальную задачу.

2) цветовой информации (целевые текстовые области обладают однородными цветами/интенсивностью и удовлетворяют ограничениям по размеру и форме); популярными инструментами являются анализ главных компонент (connectedcomponentanalysis) [4] и различные алгоритмы адаптивной бинаризации (adaptivebinarization)— в том числе алгоритмы Niblack, Sauvola, Chistian, и пр. [2]. Методы позволяют работать с произвольными размерами

шрифта и произвольной направленностью текста, однако плохо работают на изображениях со сложным фоном, шумом и нерезкостями, используют большое количество эвристик.

3) анализе текстурной информации: для выявления нужных зон могут использоваться как классические методы распознавания образов — метод опорных векторов (supportvectormachines), искусственные нейронные сети (neuralnetworks) [5], экспертные системы (expertsystems) и др., так и специальные, например, метод спектрографических текстур [6]. Подходы позволяют работать с изображениями со сложным фоном, обладают высокой вычислительной сложностью из-за необходимости масштабирования изображений.

### Подход к обнаружению текстовых блоков в изображении печатных документов

Обычно в документах области текста и графики не пересекаются. Еще одной ключевой особенностью обработки печатных документов является использование шрифтов близких линейных размеров. Опираясь на эти характерные черты, можно обнаружения текстовых блоков, основываясь на методе гистограмм [7].

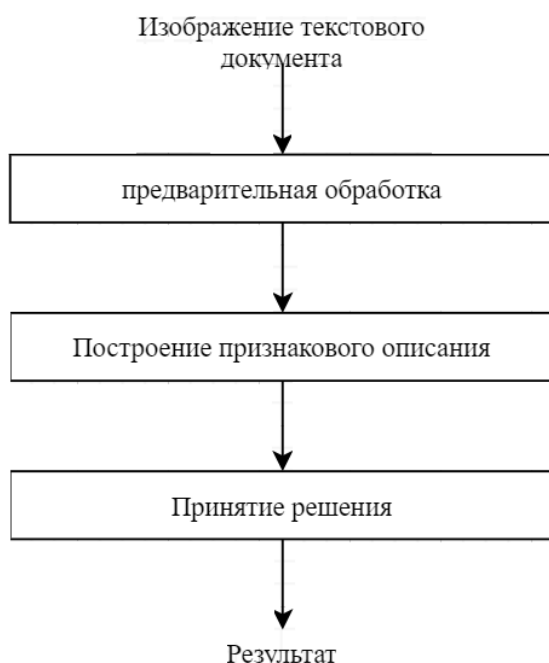
В систему загружается отсканированный файл, представленный в виде изображения страницы печатного документа. Качество документа играет важную роль в обнаружение текстовых блоков: чем выше качество, тем выше точность.

Предварительная обработка изображения. Бинаризируем исходное изображение, тем самым преобразуем его в монохромный вид. Разбиваем изображение на блоки, над которыми будут происходить преобразования, чем большее количество блоков, тем точнее конечный результат.

Построение признакового описания. Строим гистограмму яркости полученных блоков. Далее разбиваем гистограммы на восемь равных частей, суммируя значения в каждой части. Таким образом, мы сформировали необходимые нам признаки.

Этап принятия решения. На основе полученных признаков при помощи классификатора и заранее сформированных классов определяем текстовые блоки в изображении.

Таким образом, получаем следующий алгоритм обнаружения текстовых блоков в изображении (рисунок).



## Заключение

Предлагаемый в статье алгоритм обнаружения текстовых блоков в изображении печатных документов заключается в использовании нового способа формирования признаков, на основе метода гистограмм. Результатом работы является создание теоретической модели обнаружения текстовых блоков в изображении печатных документов.

## Библиографический список

1. **Погодин, С.В.** Выделение и анализ скелетов объектов на цветных снимках // Программные продукты и системы, 2009. Т. 2, с. 42–45.
2. **Л. Шапиро, Л.** Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.
3. **Абрамов, Н.С.** Распознавание на основе инвариантных моментов / Н.С. Абрамов, В.М. Хачумов // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика, 2014. Т. 2, с. 142–149.
4. **Завалишин, Н.В.** Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений / Н. В. Завалишин, И. Б. Мучник. - М.: Наука, 1974. — 344 с.
5. **Талалаев, А.А.** Выделение и кластеризация текстовых и графических элементов на полутонных снимках / А. А. Талалаев, И. П. Тищенко, М. В. Хачумов // Искусственный интеллект и принятие решений, 2008. Т. 3, с. 72–84.
6. **Фраленко, В.П.** Анализ спектрографических текстур данных дистанционного зондирования Земли // Искусственный интеллект и принятие решений, 2010. Т. 2, с. 11–15.
7. **Виноградов, А.Н.** Выделение и распознавание локальных объектов на аэрокосмических снимках / А.Н. Виноградов, Ф.В. Калугин, М.Д. Недев // Авиакосмическое приборостроение, 2007. Т. 9, с. 39–45.

V. E. Gai, A.A. Zaytsev

## MODEL AND ALGORITHMS FOR DETECTING TEXT BLOCKS IN THE IMAGE OF PRINTED DOCUMENTS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** This paper reviews existing approaches to detecting text blocks in the image of printed documents. One of the algorithms for detecting text blocks is presented and analyzed.

**Conclusions:** the results of testing the method showed its efficiency in solving the problem.

**Limitations/consequences of the study:** the proposed method and the results obtained are the basis for developing a new method for detecting text blocks in printed document images.

**Keywords:** textdetection, segmentation



Г.Д. Кузнецов, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена разработке комплекса систем для установки связи и взаимодействия с роботом телеприсутствия и трансляции аудио/видео потока. Актуальность данной темы возникает из-за отсутствия готового свободного ПО, которое может решить одновременно в одной программе несколько необходимых функций, таких как: установкой сигнала между ПО на подвижной платформе мобильного робота и клиентской системой пользователя, возможность удаленного управления платформой и аудио/видео трансляцией. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы с использованием, языка программирования C++, существующих протоколов TCP/IP, UDP/IP и QtFramework.

**Ключевые слова:** Устройство телеприсутствия – устройство, позволяющее человеку наблюдать за событиями в удалённом месте и так или иначе (информационно или физически) влиять на них.

### Введение

В настоящее время уже существует подобные системы, но они разрабатываются для закрытых проектов, исходя из этого программного обеспечения в открытом доступе нет, эти существующие программные решения не подходят к проекту над которым выполняется работа, так как конечное программное решение должно запускать уникальные скрипты или программы на подвижной платформе. Так как прототип разрабатывался с нуля, то необходима разработать уникальную систему.

Задача, на решение которой направлена данная работа – разработка программной системы телеприсутствия мобильного робота для помощи людям с ограниченными возможностями, система поможет быть в центре событий с помощью удаленного взаимодействия на передвижную платформу и трансляцией видео и аудио сигнала.

### Описание задачи разработки программной системы телеприсутствия мобильного робота

Для обеспечения эффекта присутствия надо выполнить несколько условий:

- Сигнальный сервер. Необходим для определения доступных устройств телеприсутствия и их IP адресов, разрешения установки соединения между роботом и пользователем с возможностью авторизации.
- Видео трансляция. Простейшая система включает в себя видеопоток. Лучше когда используется полное погружение пользователя в окружающую обстановку
- Аудио трансляция. Обеспечить передачу звука из помещения где находится прототип, для большего восприятия окружающей обстановки.
- Манипулирование. Возможность удаленно управлять устройством – важнейший аспект настоящей системы телеприсутствия. Пользователь сможет управлять клавиатурой

либо мышью, а устройство телеприсутствия копирует команды, отправленные пользователем.

### Архитектура сигнального сервера и установки соединения устройств

Структурная схема сигнального сервера включает возможность обработки запросов устройств пользователей, с которого происходят подключения и устройствами телеприсутствия, выполняет инициализацию, авторизацию и закрытие соединения.

Соединение устройств состоит из следующих этапов:

- прослушивание портов на возможность появления нового устройства телеприсутствия;
- информирование сервера о доступности мобильного робота, назначение прав доступа;
- периодический опрос робота телеприсутствия о его статусе доступа;
- прослушивание портов на запрос доступных мобильных роботов по требованию пользователей;
- ответ о статусах готовых устройств к работе;
- проверка прав доступа к запрашиваемому устройству;
- установка запрета или разрешений на использования устройств;
- информирования мобильного робота о предстоящих подключениях.

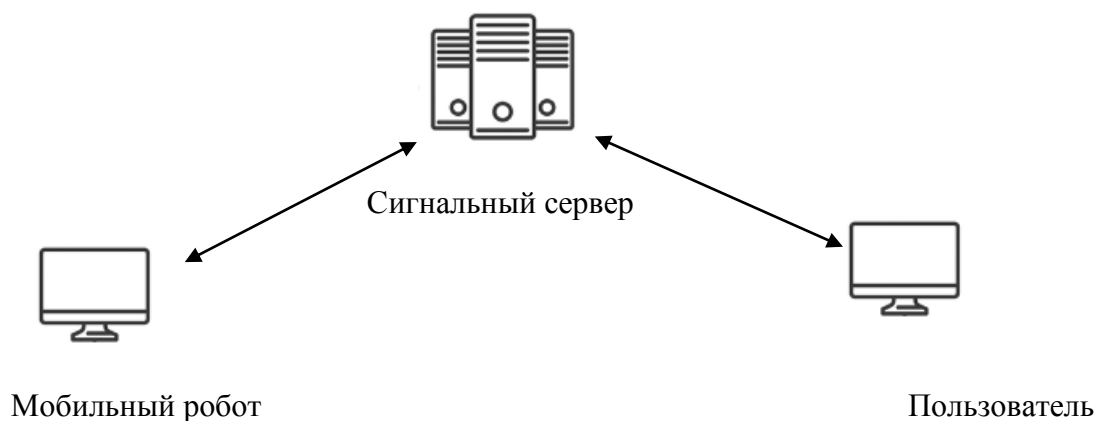


Рисунок 1. Архитектура системы сигнального сервера

После того как сервер даст разрешение на подключение к устройству телеприсутствия, он отправит информацию на робота о том что будет установлено соединение с определенного удаленного узла, мобильный робот перейдет в режим прослушивания сокета и будет ожидать подключения от пользователя, затем будет выполнена повторная авторизация на мобильном роботе.

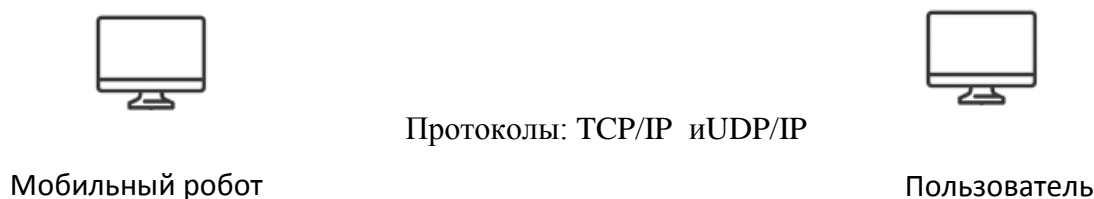
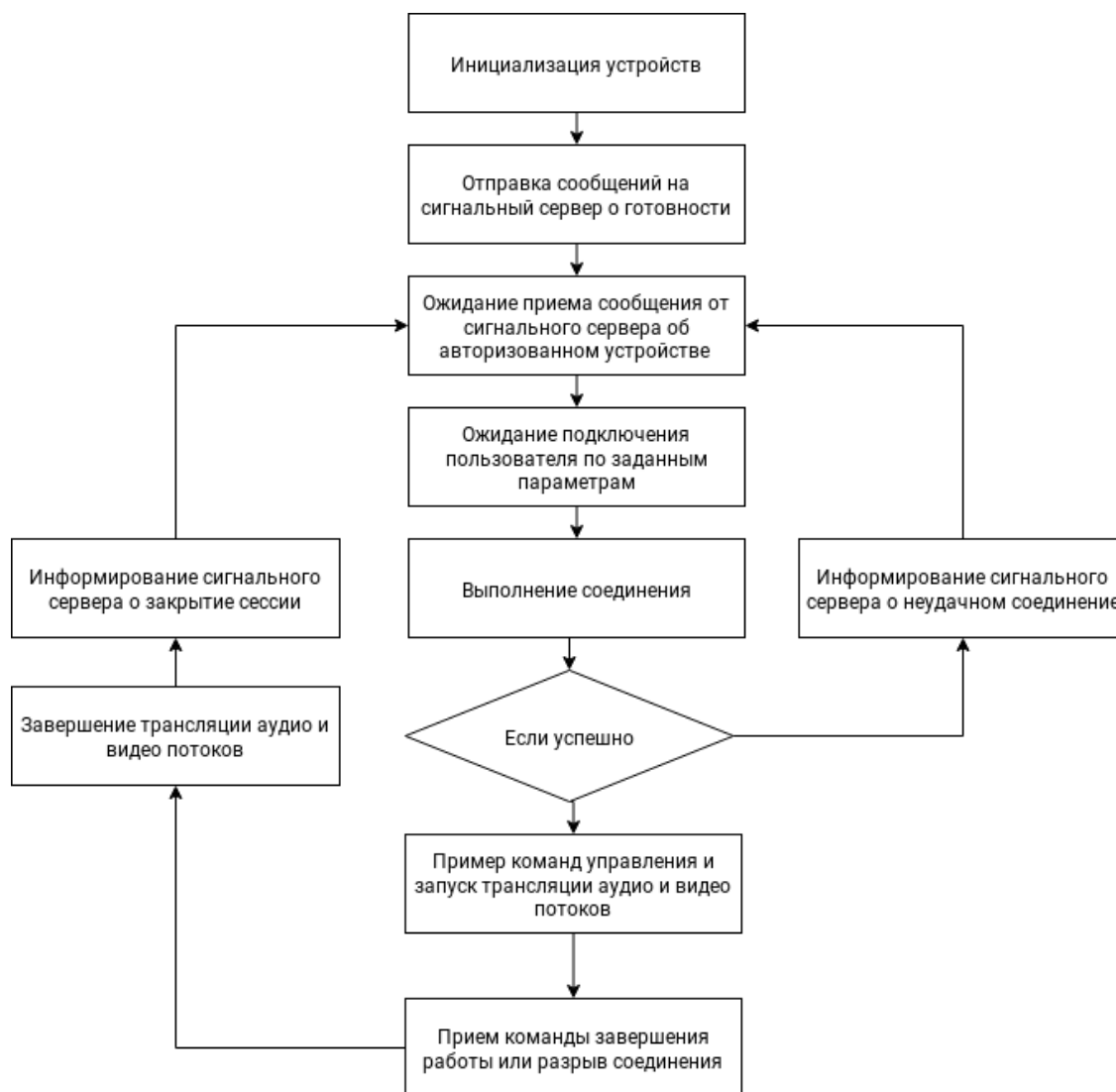


Рисунок 2. Модель связи устройств

После загрузки ПО на мобильном роботе будет выполнена автоматическая регистрация устройства на сигнальном сервере, система автоматически определит доступные видеокамеры и аудио устройства, затем программа перейдет в режим ожидания.

После успешной авторизации система будет готова к приему команд на управление подвижной платформой и инициализируется штатный режим трансляции видео/аудио потоков. Также при помощи клавиатуры и мыши на устройстве телеприсутствия есть возможность изменения настроек по умолчанию, таких как: учетные записи для авторизации и изменения адреса сигнального сервера.

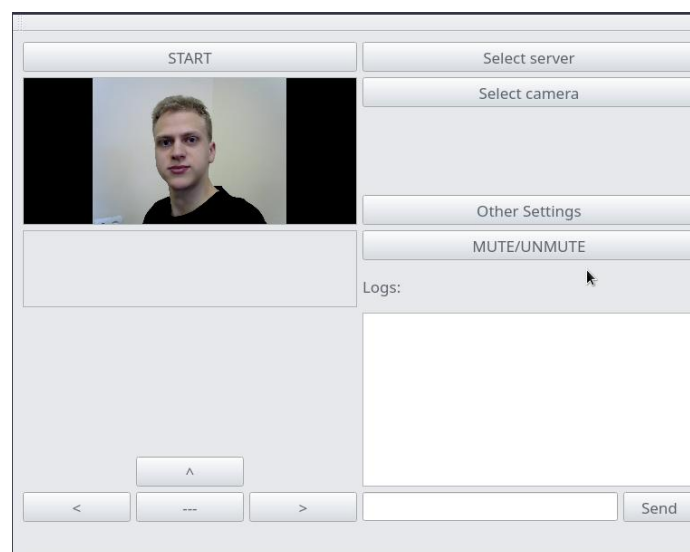


**Рисунок 3. Общая схема работы программы на мобильном роботе**

Пользователь может управлять роботом при помощи компьютера, где установлена ОС GNU/Linux или Windows 7/8/10. Пользователь должен будет запустить программу для взаимодействия с роботом телеприсутствия и выбрать одно из доступных ему устройств, затем ввести логин и пароль. После того как программа предоставит ему право на управление, он сможет взаимодействовать с роботом при помощи клавиатуры или мыши (выполнять его передвижения), также пользователь может отключить микрофон и/или видео трансляцию. В настройках программы есть доступ к выбору сигнального сервера.



**Рисунок 4. Общая схема работы программы на стороне пользователя**



**Рисунок 5. Пример работы программы**

## Заключение

В данной работе рассмотрена структура программной системы телеприсутствия мобильного робота для помощи людям с ограниченными возможностями. Показана теоретическая составляющая схем работы систем, а также рассмотрены способы решения данной задачи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

## Библиографический список

1. **Frank B. Brokken.** C++ Annotations Version 11.3.0 // Published at the University of Groningen ISBN 90 367 0470 71994-2019.
2. **Шлее, М.** Qt5.10. Профессиональное программирование на C++ // СПб, BHV-СПб, май 2018.
3. **Linus Torvalds, David Diamond.** Just for Fun: The Story of an Accidental Revolutionary // Paperback – June 4, 2002.
4. **Шмидт, Д., Хьюстон С.** Программирование сетевых приложений на C++. Том 1 // Бином-Пресс 2009

**V.E. Gai, G.D. Kuznetsov**

## SOFTWARE SYSTEM FOR TELEPRESENCE OF A MOBILE ROBOT

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This work is devoted to the development of a set of systems for establishing communication and interaction with a telepresence robot and broadcasting an audio / video stream. The relevance of this topic arises from the lack of ready-made free SOFTWARE that can solve several necessary functions simultaneously in one program, such as: setting a signal between the SOFTWARE on the mobile robot platform and the user's client system, the ability to remotely control the platform and audio/video broadcasting. The article will consider an approach to solving this problem using the C++ programming language, the existing TCP/IP, UDP/IP, and Qt Framework protocols.

**Keywords:** telepresence Device – a device that allows a person to observe events in a remote location and somehow (informatively or physically) influence them.

В.Е. Гай, П.В. Кузнецова

## МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДИКТОРА ПО ГОЛОСУ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Задача обнаружения эмоций диктора по звуковому сигналу является актуальной в таких сферах как медицина и образование, в маркетинговых исследованиях, при человеко-машинном взаимодействии. В данной статье описан метод, реализующий новый подход к вычислению признакового описания звукового сигнала, построенный на основе теории активного восприятия. Он состоит из трех этапов: этап предварительной обработки входного сигнала, этап  $U$ -преобразования и этап расчёта полных групп по сумме.

**Ключевые слова:** теория активного восприятия, распознавание эмоций по голосу, формирование признакового описания

### Описание задачи распознавания эмоционального состояния диктора по голосу

Эмоциональное состояние диктора и его речь тесно взаимосвязаны и являются неотъемлемой составляющей общения. В связи с этим, объективная и точная диагностика эмоций по голосу имеет множество применений на практике.

Большое распространение системы распознавания эмоционального состояния диктора по голосу получили в сферах медицины и образования, в маркетинговых исследованиях, при человеко-машинном взаимодействии и в других областях. Такие системы позволяют выявлять состояние депрессии у пациентов, детектировать эмоциональное состояние водителя, в том числе обнаруживать случаи агрессивного вождения. В сфере маркетинга система распознавания эмоционального состояния диктора по голосу позволяет распознавать раздраженных или разочарованных клиентов, чтобы среагировать соответствующим образом, а так же позволяет определять приоритетность нетерпеливых клиентов. В сфере образования данная система может использоваться при мониторинге учащихся, проходящих online-курсы.

Все существующие системы распознавания эмоционального состояния диктора по голосу в качестве признакового описания используют спектрограммы или акустические, просодические и лингвистические характеристики речи, например, такие как различные параметры частоты основного тона, форманты, темп речи, энергия и мощность сигнала и т.д. На этапе принятия решения классификация производится с помощью метода опорных векторов, метода  $K$ -ближайших соседей, нейронных сетей и т.д. Так как современные методы классификации позволяют довольно быстро принимать решение, к какому классу отнести входной сигнал с определенным набором признаков, то ключевым этапом распознавания является этап вычисления признакового описания. Таким образом, моей задачей стало выявление новых информативных признаков голосового сигнала, отражающих эмоциональное состояние диктора.

## Подходы к решению задачи распознавания эмоционального состояния диктора по голосу

Алгоритм распознавания эмоций диктора по голосу состоит из трех этапов [1]: предварительная обработка входного сигнала, выделение признаков и классификация, то есть принятие решения.

Первый этап заключается в применении к сигналу алгоритма Voice Activity Detection (VAD). Он позволяет обнаруживать голосовую активность во входном акустическом сигнале, то есть отделять активную речь от фонового шума и тишины, которые впоследствии удаляются. Таким образом, после применения VAD из сигнала исключаются паузы и шум, что позволяет улучшить точность распознавания. Далее исходный сигнал делится на сегменты, по которым вычисляются признаки. Каждый сегмент состоит из 140 фреймов, каждый из которых включает в себя 256 отсчетов. Так же к предварительной обработке сигнала относится  $Q$ -преобразование, описанное в теории активного восприятия[1], которое вычисляется по формуле (1).

$$m(\bar{T}) = \sum_{n=0}^{N-1} (s_{dig} [n]), \quad (1)$$

где  $N$  – число отсчетов сигнала  $s_{dig}$ ,  $m(\bar{T})$  – сумма отсчетов сигнала.

Отличие значения  $m(\bar{T})$  от нуля указывает на наличие или отсутствие сигнала на интервале наблюдения  $\bar{T}$ .

К этапу выделения признаков относится  $U$ -преобразование, которое является базовым в теории активного восприятия[2]. Оно вычисляется по формуле (2).

$$\mu_i = \sum_{j=0}^{M-1} \left( \sum_{k \in \bar{T}_i} s_{dig} [k] \right) F_i [j], \quad (2)$$

где  $\bar{T}_i$  –  $i$ -й подынтервал сигнала  $s_{dig}$ ,  $M$  – число используемых фильтров.

$U$ -преобразование выполняет разложение сигнала, которое осуществляется по системе дискретных базисных функций, то есть фильтров  $F$ .

Результат применения к анализируемому сигналу фильтров  $F$  – вектор спектральных коэффициентов  $\mu$ . Каждому фильтру  $F_i$  соответствует булевый оператор  $V_i$ , который определяется по следующим правилам[3]:

- 1) прямой оператор  $V_i$ , если  $\mu_i > 0$ ;
- 2) инверсный оператор  $\bar{V}_i$ , если  $\mu_i < 0$ ;
- 3) оператор отсутствует, если  $\mu_i = 0$ .

Так, на множестве одномерных операторов формируется алгебра групп, которая включает семейство структур  $P_n$  мощности 35 (для 16 операторов) (состоящих из троек операторов), названных полными группами и семейство структур  $P_s$  мощности 105 (для 16 операторов) (состоящих из четверок операторов), названных замкнутыми группами.

С помощью замкнутых и полных групп выполняется спектрально-корреляционный анализ [3]. Полные группы позволяют выявить корреляцию между операторами. Замкнутые группы – корреляцию между полными группами.

Рассмотрим подробнее полные группы.

Существуют полные группы на операции умножения  $V_i \cdot V_j \cdot V_k$  и сложения  $V_i + V_j + \overline{V_k}$ .

Полные группы состоят из троек операторов. Учитывая инверсии операторов, каждой «модели» полной группы можно поставить в соответствие 4 полных группы на операции сложения и 4 – на операции умножения. То есть, всего существует 140 полных групп на операции сложения и 140 – на операции умножения. Тем не менее, по сигналу можно вычислить не больше 35 групп на каждой из операций.

Используем полные группы для описания сегмента входного сигнала. Тогда, в качестве признакового описания для решения задачи распознавания эмоционального состояния диктора по голосу, используем гистограммы, то есть число вхождений каждой из 140 полных групп на определенном отрезке сигнала. В качестве данного отрезка были взяты 140 фреймов, что в итоге дало вектор из 140 значений, который и подается на вход классификатора.

Второй вид признаков, основанный на полных группах из теории ТАВ – это матрица весов полных групп, размером 140x140, которая так же подается на вход классификатора. Так как из 140 полных групп по одному отрезку сигнала можно вычислить не больше 35 групп на каждой операции, остальные элементы матрицы заполняются близкими к 0 значениями, равными  $1 \times 10^{-5}$ .

Рассмотрим завершающий этап алгоритма распознавания эмоций диктора по голосу, классификацию. Задача классификации – это задача отнесения входного элемента к одному из непересекающихся подмножеств, называемых классами.

На этапе классификации использовались сверточные нейронные сети.

Был выбран именно этот вид классификатора, так как нейронные сети обладают рядом преимуществ [4]:

1. Устойчивость к шуму во входных сигналах.

Этот аспект очень важен при решении задачи распознавания эмоционального состояния диктора по голосу, так как необходимо минимизировать влияние условий записи звукового сигнала на качество обучения и результат распознавания. Нейронная сеть же способна фильтровать в процессе обучения неинформативные, шумовые входные сигналы.

2. Адаптация к изменениям.

В рамках решаемой задачи необходимо адаптироваться под разных дикторов, их темп речи, интонацию, тембр голоса и другие индивидуальные особенности.

3. Быстродействие

4. Отказоустойчивость

### **Архитектура системы распознавания эмоционального состояния диктора по голосу**

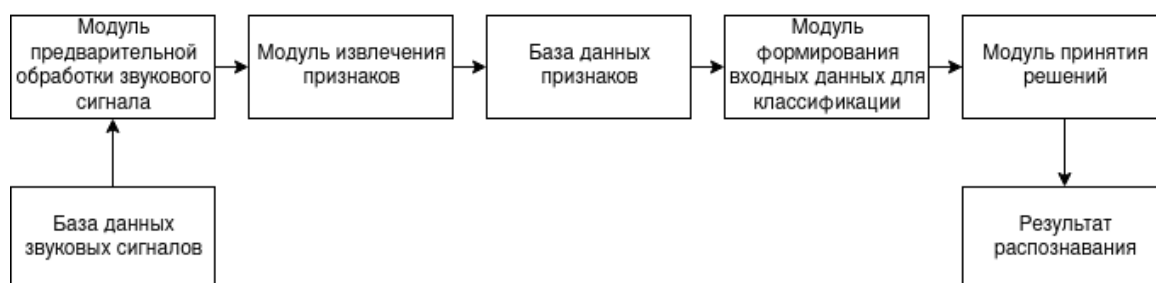
Любая система классификации состоит из нескольких компонент. Для реализации рассматриваемой системы распознавания эмоционального состояния диктора по голосу выделяются следующие модули:

1. База данных звуковых сигналов, где хранятся звуковые записи с тестовыми данными. Все записи хранятся в формате wav.

2. Модуль предварительной обработки звукового сигнала, в котором к исходному сигналу применяется VAD, деление на фреймы и Q-преобразование.



3. Модуль извлечения признаков, в котором из каждого фрейма преобработанного сигнала извлекаются признаки, а именно, веса и индексы полных групп, которые будут использоваться в дальнейшем в качестве входа для классификатора. Данный модуль реализован на языке программирования R для улучшения быстродействия.
4. База данных признаков, которая представляет собой csv файл, в котором построчно хранятся признаки, полученные на предыдущем этапе.
5. Модуль формирования входных данных для классификации, который представляет собой модуль на языке программирования Python для оптимизированного извлечения признаков из базы данных признаков.
6. Модуль принятия решений, в котором реализованы нейронные сети для различных размерностей входного сигнала. Данный модуль реализован на языке программирования Python.
7. Результат распознавания представлен в виде матриц ошибок для каждого эксперимента.



**Рисунок 1. Архитектура системы классификации**

Основные различия между системами классификации, построенными по описанной архитектуре (рис. 1), заключаются в используемом пространстве признаков.

### **Вычислительный эксперимент**

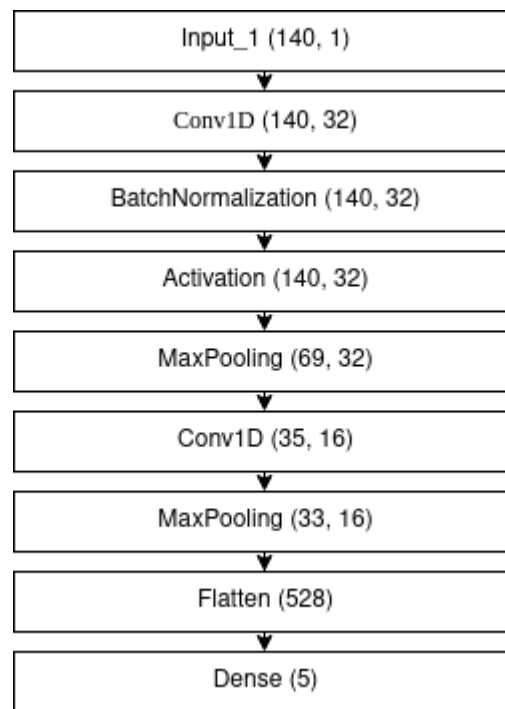
Для каждого вида признакового описания была построена сверточная нейронная сеть, в соответствии с размерностью входного сигнала. Структура нейронной сети, где в качестве входных признаков использовались гистограммы, представлена на рис. 2. Архитектура нейронной сети, где входными признаками являются двумерные матрицы весов полных групп по сложению, представлена на рис. 3.

В качестве тестовых данных были взяты базы данных Cremad, Iemocap, Ravdess, Tess, Savee, Enterface, Ims-improve. Все базы содержат записи на английском языке. Эксперимент проводился на 1, 2 и 3 эмоциях. Все записи из баз данных перемешивались и были разделены на обучающую, тестовую и контрольную выборки. Обучающая выборка использовалась для оценки параметров классификатора и составила 8/10 всех данных, контрольная и тестовая выборки использовались для оценки возможностей классификатора.

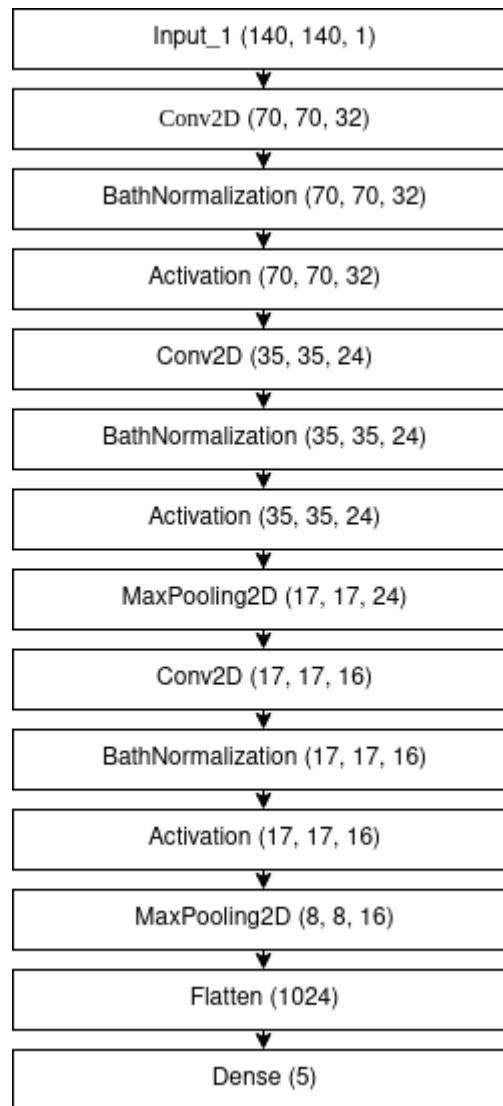
Для одной эмоции (счастье) при обучении на всех базах данных из списка оба классификатора показали 100% точность распознавания. Для двух эмоций (злость и грусть) общая

точность распознавания для гистограмм и двумерных матриц весов составила 74.75% и 70.62% соответственно.

Аналогичные результаты для 3 эмоций (грусть, злость и счастье) составили 51.28% и 41.03% для гистограмм и двумерных матриц весов соответственно.



**Рисунок 2. Архитектура на основе гистограмм**



**Рисунок 3. Архитектура на основе 2D признаков**

### **Заключение**

В ходе исследования была изучена теория активного восприятия и алгоритмы построения нейронных сетей. Так же был проведён эксперимент, в результате которого было выявлено, что признаки, выделенные из голосового сигнала на основе теории активного восприятия, а именно веса полных групп по сумме, а так же гистограммы полных групп по сумме, возможно применять в качестве входных данных для обучения нейронных сетей с целью решения задачи распознавания эмоционального состояния диктора по голосу.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что данный метод решения поставленной задачи имеет большой потенциал и будет проанализирован с помощью других экспериментов, а так же расширен с использованием полных групп по умножению и замкнутых групп по сложению и умножению.

### **Библиографический список**

1. **Утробин, В.А.** Элементы теории активного восприятия изображений / В.А. Утробин. - НГТУ. – Нижний Новгород, 2010. – 9 с.

2. **Гай, В.Е.** Алгоритмы формирования спектрального представления звукового сигнала на основе U – преобразования // Бизнес-информатика №1 (23). НИУ ВШЭ. – Москва, 2013. – 44-49 с.

3. **Гай, В.Е.** Модели и методы распознавания одномерных сигналов и изображений / В.Е. Гай и др. - Нижегород. гос. тех. ун-т. им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2019. – 105 с.

4. **Michael Nielsen.** Neural Networks and Deep Learning. Dec 2019 //cognitivemedium.com URL: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/>

5. Официальная документация TensorFlow. // [tensorflow.org](https://www.tensorflow.org) URL: [https://www.tensorflow.org/versions/r1.15/api\\_docs/python/tf/math/confusion\\_matrix](https://www.tensorflow.org/versions/r1.15/api_docs/python/tf/math/confusion_matrix)

**V. E. Gai, P. V. Kuznetcova**

## **AND ALGORITHMS FOR RECOGNIZING THE SPEAKER'S EMOTIONAL STATE BY VOICE FROM THE STANDPOINT OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION**

NizhnyNovgorodstatetechicaluniversityn. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** Detecting speaker's emotions by an audio signal is acute task for medicine, education, marketing research and human-machine interfacing.

**Design / methodology / approach:** This article describes a method with approach to gathering features of an audio signal, based on the theory of active perception. It consists of 3 stages: preliminary processing of the input signal, U-conversion and calculating the full groups by the sum.

**Findings:** The test results of the method showed its workability in the problem solving.

**Research limitations/implications:** The proposed method and the results obtained are the basis for developing a new method for recognizing the speaker's emotional state by voice.

**Originality/value:** This article describes a method with new approach to gathering features of an audio signal.

**Keywords:** theory of active perception, recognition of emotions by voice, formation of a characteristic description.

Р.С. Курганский, В.Е. Гай

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ В КОЛОННЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Данная работа посвящена разработке программно-аппаратной системы организации движения робота в колонне. Актуальность этой темы обоснована активным развитием беспилотных систем управления автомобилем. Правильность распознавания специальной разметки, в совокупности с корректными алгоритмами управления – это ключевые требования для последовательного движения автоматизированной техники. В данной статье предложены методы решения основных задач.

**Ключевые слова:** распознавание, разметка, генерация команд, управляющая команда, следование.

### Введение

В текущий момент времени происходит переход на автоматическое управление в большинстве видов деятельности человека, основанием для этого служит существенное упрощение жизнедеятельности.

Одной из видов такой деятельности являются автомобили и техника на автоматизированном управлении. Это автомобили или же техника, которые оборудованы системами автоматического управления и способны передвигаться без управления со стороны человека.

Данная техника нужна для повышения безопасности на дорогах, повышения уровня производительности поездок, а также в целом для понижения участия водителя в процессе управления транспортом. Основными разработчиками программного и аппаратного обеспечения беспилотных автомобилей являются такие компании как Tesla, Apple, Google, Uber, Audi и BMW.

Основные задачи, которые должна решать техника с возможностью автоматического организованного движения в колонне являются: распознавание разметки, генерация команд для корректной траектории следования.

### Обзор систем позиционирования роботов

При оценке методов навигации следует в первую очередь учитывать точность позиционирования. Так, принято считать, что допустимая ошибка при определении координат робота – это величина, значение которой не больше половины от минимальных габаритов робота. Кроме того, в условиях замкнутого пространства существует множество помех, таких как проблемы с отражением сигналов, неровности освещения и т. д. В этом случае среда вносит принципиальную неточность и неопределенность в каналы связи. В таких обстоятельствах стоит учитывать способность систем работать в условиях зашумлённой среды. В зависимости от классификации выделяют несколько видов навигационных систем. Для движения по заданной траектории, обхода препятствий, что вероятно в бытовых условиях, предлагается выделить четыре вида навигационных систем: глобальная система, локальная, персональная и автономная системы.

**Глобальная система.** Задача глобальной системы – определение абсолютных координат, т. е. широты и долготы. Это такие системы как GPS, RTK-GPS, Глонасс, которые используют спутники для позиционирования. Точность таких систем зависит от множества факторов, но в условиях, близких к идеальным наиболее развитая из данных систем, GPS, способна обеспечить точность с ошибкой в пределах 60–90 см. Применение систем глобального позиционирования осложняется их зависимостью от условий использования. Затруднительно или невозможно использовать данные системы внутри зданий, подземных сооружениях и т. д. Таким образом, использование глобальных систем позиционирования имеет смысл при следовании по достаточно длинным маршрутам.

**Персональная система.** Персональная система применяется при позиционировании отдельных частей робота и взаимодействии с близлежащими предметами. Такая направленность важна для устройств, имеющих манипуляторы. Такие системы применяются для позиционирования в пределах какой-либо конкретной территории, например, для навигации робота-сборщика. Также персональные системы навигации применяются для следования по заданной линии, при движении по меткам. Применение на практике данных систем позиционирования осложняется их узкой направленностью под заданную местность, они плохо адаптируются под изменённые условия и достаточно дороги. Их применение целесообразно для работы в пределах конкретной территории.

**Автономная система.** В рамках автономной системы навигации применяются гироскопы, цифровые компасы. Существенным недостатком таких систем является их чувствительность к неравномерностям поверхности: наклонам, кочкам и т. д. Это вносит определенные ограничения на их использование. Автономные системы навигации находят применение в условиях, когда передача или прием сигналов извне затруднен или невозможен. Этот аспект важен для замкнутых пространств, так как, как было сказано выше, они имеют повышенную зашумленность среды. Локальная система. Локальные системы используют для позиционирования некоторую точку, обычно стартовую. Данные системы могут применяться на относительно больших локациях, например, для тактических беспилотных самолетов, работающих в рамках известной территории. Система навигации A-GPS, использующая для позиционирования сотовые сети, также является локальной. В условиях замкнутого пространства целесообразно применение локальной системы позиционирования. В настоящее время наиболее часто применяются системы, использующие дальномеры: лазерные, инфракрасные, ультразвуковые и т. д. Существует довольно много методов обработки информации, поступающей от дальномеров, например: гистограмма векторного поля, потенциальное поле, тангенциальное избегание, алгоритм трилатерации.

### Алгоритм работы системы

В данной работе, для позиционирования робота при движении в колонне, используется *персональная система*. Меткой в нашем случае будет служить специальная разметка на идущем впереди роботе («Шахматная доска»). Установленная камера на роботе передает картинку на модуль обработки входного изображения, далее происходит поиск и анализ данной разметки с помощью библиотек машинного зрения. После анализа разметки в специальный массив записываются углы Эйлера и дистанция до идущего впереди робота. На основании полученных данных, с помощью алгоритмов происходит выработка управляющей команды. Далее команда принимается модулем управления и также обрабатывается специальным алгоритмом. Основной задачей при написании алгоритма была генерация и обработка команд была организация следования робота по маршруту, повторяющему маршрут движущегося впереди робота.



**Блок-схема работы системы**

### **Программная и аппаратная составляющая системы**

Модель системы состоит из двух частей - модуля обработки входного изображения и модуля управления роботом. Модуль обработки входного изображения включает в себе реализацию алгоритмов обнаружения специальной разметки с использованием библиотек OpenCV и представляет собой устройство с камерой, устанавливаемое на робота, подключенного к модулю управления по COM-порту.

Модуль обработки входного изображения включает:

- Одноплатный компьютер RaspberryPi 4 с ОС Ubuntu,
- Веб-камеру Logitech.

Модуль управления роботом выполняет задачу по обработке полученных команд управления, также устанавливается на робота и подключается к двигателю и сервоприводу.

Модуль управления включает в себя плату Arduino Uno.

### Заключение

В работе был рассмотрен алгоритм для создания модели системы для организованного движения робота в колонне. Так как при позиционировании используется метка на роботе, идущем впереди, данный алгоритм может быть использован в различных погодных условиях.

### Библиографический список

1. **Википедия.** Беспилотный автомобиль. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный\\_автомобиль](https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_автомобиль)
2. Time-optimal sliding-mode control of a mobile robot in a dynamic environment / Matteo Rubagotti, Marco L. Della Vedova, Antonella Ferrara // IET Control Theory and Applications
3. **Белоногов, А. В.** Анализ и выбор систем навигации робота для позиционирования в условиях замкнутого пространства // IV международная научная конференция «Технические науки: проблемы и перспективы» - Санкт-Петербург, 2016.
4. **Карпов, В. Э.** Система навигации мобильного робота / В.Э. Карпов, М.В. Платонова // Московский Энергетический Институт; Москва, лаборатория робототехники и искусственного интеллекта Политехнического музея – 2008.

**V.E. Gai, R.S. Kurganskii**

### HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM TO ORGANIZING THE MOVEMENT OF ROBOTS IN A CONVOY

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This article is devoted to the development of a software and hardware system for organizing the movement of a robot in a convoy. The relevance of this topic is justified by the active development of unmanned vehicle control systems. The correct recognition of special markup, together with the correct control algorithms, are key requirements for the consistent movement of automated equipment. This article proposes methods for solving the main problems.

**Key words:** recognition, markup, command generation, control command, following.



## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Задача вибродиагностики – одна из актуальных задач технической диагностики. При вибрационной диагностике как правило исследуется временной сигнал или спектр вибрации того или иного оборудования. Предлагается новый подход к вибродиагностике механизмов автотранспортного средства на основе машинного обучения. Приводятся результаты тестирования предложенного метода на базе данных сигналов.

**Ключевые слова:** классификация, теория активного восприятия, распознавание.

### Описание задачи

Задача вибродиагностики на основе машинного обучения сводится к задаче классификации одномерного сигнала. В качестве сигнала будет выступать вибрация, снятая с механизмов автотранспортного средства.

Задача классификации одномерных сигналов – одна из фундаментальных проблем в области машинного обучения и обработки сигналов. Практическое применение данная задача находит в системах распознавания образов, определения спама и т.д.

Структуру системы классификации одномерных сигналов можно представить в виде совокупности трёх блоков: предварительная обработка сигнала, формирование признакового описания, принятие решения. Предварительная обработка обычно заключается в применении к сигналу фильтра, подавляющего шум. Часто, реализация данного этапа не выполняется, в этом случае, ответственность за устойчивость к шуму перекладывается на метод формирования признакового описания.

При формировании признакового описания объекта используется гистограмма ориентированных градиентов, каскады Хаара и т. д. Блок принятия решения заключается в формировании модели на основе признакового описания с использованием нейронных сетей, метода опорных векторов,  $k$ -ближайших соседей.

Если говорить о задаче классификации текстов, то, пожалуй, ее традиционным решением является классификация основная на правилах (rulebasedclassification). В [1] описываются правила определения класса документа по его тексту в виде if-then-else выражений. Этот подход может быть хорошим вариантом если вы работаете с небольшой коллекцией документов, которую вы способны охватить и тщательно проанализировать. Просто потому что вы четко контролируете правила, по которым классификатор принимает решения.

Можно пойти и другим путем. Для каждого слова выбирается некий вес, который будет означать насколько вероятно, что сообщение с этим словом является спамом (0 – никогда не является спамом, 1 – всегда спам). Берется каждое слово и определяется суммарный вес документа отдельно для класса “спам” и класса “не спам”. Суммарный вес определяется как произведение весов всех известных слов документа. Слова, для которых нет веса, пропускаются при классификации. Какой суммарный вес оказался больше - тот класс и побеждает.

Это более разумный подход, так как он более гибок и принимает решение на основании всех известных слов в тексте. Также его гораздо проще сопровождать, чем полотно *if* ов.

В [2] предложен метод распознавания базирующийся на машинном обучении. Благодаря машинному обучению программист не обязан писать инструкции, учитывающие все возможные проблемы и содержащие все решения. Вместо этого в компьютер (или отдельную программу) закладывают алгоритм самостоятельного нахождения решений путём комплексного использования статистических данных, из которых выводятся закономерности и на основе которых делаются прогнозы

Данная работа посвящена решению задачи вибродиагностики с позиций машинного обучения. При данном подходе задача диагностики сводится к классификации. Решение данной задачи будет основываться на ТАВ (Теории активного восприятия). Использование ТАВ позволит распознавать произвольные классов с приемлемой трудоемкостью и высокой точностью, за счёт нового подхода к решению задачи формирования признаков.

### **Формирование признакового описания объекта с позиций теории активного восприятия**

Прежде чем как переходить к преобразованиям следует отметить, что с целью увеличения количества признакового описания сигнал *sig* длиной *len* разделяется на равные части размеров *slen*, а также сдвигом *shft*. Таким образом, разделив сигнал на части, в результате получается следующий массив *seg*:

$$seg[i] = sig[i * shft : i * shft + slen - 1], i = \overline{0, (len - slen + 1) / shft},$$

Базовым преобразованием ТАВ является *U*-преобразование, которое реализуется в два этапа [3]. На первом этапе к сигналу применяется *Q*-преобразование, после которого получаем матрицу масс *m*.

$$m[j][i] = \sum seg[j][i * slen / 16 : (i + 1) * slen / 16], i = \overline{0, 16}, j = \overline{0, (len - slen + 1) / shft}$$

Для корректной интерпретации результатов *Q*-преобразования отсчёты сигнала должны принадлежать положительной области значений. С позиций ТАВ *Q*-преобразование соответствует этапу предварительной обработки изображения.

На втором этапе к результату *Q*-преобразования применяется множество фильтров  $F = \{F_i\}, i = \overline{1, 16}$ . В результате формируется вектор спектральных коэффициентов  $\mu$ :

$$\mu_i = \sum_{k=1}^{slen} \sum_{l=1}^{16} m[k, l] \cdot F_i[l]$$

где *nseg* - количество сегментов, на которое был разбит начальный сигнал.

Размер каждого фильтра составляет 16 элементов. Элемент фильтра может принимать значения «+1» и «-1». Конструктивно данные фильтры подобны фильтрам Уолша системы Хармута. Специфика использования данных фильтров заключается в том, что они применяются после реализации *Q*-преобразования.

Алгебра групп используется для формирования системы признаков вибросигнала. С помощью полных групп выполняется спектрально-корреляционный анализ. Полные группы позволяют выявить корреляционные связи между операторами. Проводя аналогию между алгеброй групп и языком, можно ввести следующие соответствия: оператор – алфавит языка, полная группа – слово.

Полная группа формируется из трёх операторов  $V_i, V_j, V_k$  в том случае, если выполняется следующее условие:

$$e1 = V_i + V_j + V_k, e1 = V_0, i \neq j \neq k \neq 0$$

Перечислив все возможные сочетания операторов, можно получить множество полных групп  $\{P_{ni}\}$ .

### Метод классификации сигналов

Этап обучения заключается в выполнении следующих шагов:

1) формируются образцы для каждого из определяемых классов; база данных образцов включает сигналы определяемых  $C$  классов сигналов;

2) вычисляется признаковое описание для сигнала, находящихся в указанных базах данных; формирование признакового описания сигнала  $S$  выполняется по следующему алгоритму:

- сигнал  $S$  разбивается на части по  $slen$  в каждой с перекрытием равным  $shftP = \{P_i\}$ , с общим количеством частей  $nseg$ , где  $P_i$  –  $i$ -я часть сигнала,  $nseg$  – количество сегментов;

- для каждой части вычисляется признаковое описание на основе  $U$ -преобразования и представления полных групп

$$D = FC [P],$$

где оператор  $FC[\bullet]$  вычисляет признаковое описание сигнала.

В результате применения  $U$ -преобразования и алгебры групп формируется признаковое описание положительных образцов для каждого класса  $F = \{F_i\}, i = \overline{1, C}$ ;

3) с использованием метода опорных векторов на основе вычисленных признаковых описаний формируется модель для классификации каждого из классов сигналов; таким образом, классификатор обучается различать весь набор представленных классов:

$$S = \{S_i\}, S_i = SVM_t [F_i], i = \overline{1, C},$$

где  $SVM_t[\bullet]$  – оператор определения параметров модели метода опорных векторов,  $S$  – множество моделей, полученных в результате обучения классификатора для каждого из классов объектов;

Этап применения заключается в выполнении следующих шагов:

1) предварительная обработка сигнала  $S$  – деление сигнала  $S$ , на котором выполняется классификация, на части размеров  $slen$  и шагом  $shft$  с шагом

$$Q = \{Q_i\}, i = \overline{1, T},$$

где  $Q$  – множество всех частей, полученных по сигналу,  $Q_i$  –  $i$ -я область,  $T$  – количество полученных частей;

2) для каждой области  $Q_i$  формируется признаковое описание:

$$D_{Q_i} = FC [Q_{i, (x, y), s}], i = \overline{1, T},$$

где  $D_{Q_i}$  – признаковое описание области  $Q_{i, (x, y)}$ ;

3) при выполнении классификации на вход направляются полученные на предыдущем этапе признаковые описания областей изображения:

$$C_{Q_{ixys}} = SVM_u [D_{Q_i}, G],$$

где  $SVM_u$  – оператор определения класса по признаковому описанию  $D_{Q_i}$  на основе множества моделей  $G$ ,  $C_{Q_i}$  – класс области  $Q_i$ .

## Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент предназначен для оценки точности работы предложенного метода вибродиагностики узлов. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны сигналы, не входившие в обучающую выборку. В сумме обучение модели происходило на шести классах дефектов. В обучающей выборке для каждого из классов хранится 100 эталонов, таким образом, всего 600 сигналов. Тестовая выборка включает 168 предварительно определенных сигналов в сумме для каждого из классов.

В таблице изображена матрица ошибок по всем шести классам. По таблице нетрудно посчитать точность представленного метода, она составляет порядка 85%.

Матрица ошибок

	1	2	3	4	5	6
1	25	2	1	0	0	0
2	2	30	1	2	3	0
3	3	3	33	2	4	0
4	4	0	0	19	0	0
5	2	1	1	1	17	0
6	0	0	0	0	0	12

## Заключение

Методы вибродиагностики имеют широкий круг применения, включая автомобилестроение. В работе предложен метод вибродиагностики, разработанный с использованием машинного обучения, основанного на теории активного восприятия. Выполнено тестирование предложенного метода на шести классах. Результаты тестирования подтвердили эффективность предложенного метода вибродиагностики.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

## Библиографический список

1. **Biao Qin**, Yuni Xia, Sunil Prabhakar, Yicheng Tu; IEEE International Conference on Data Engineering, pp. 1633-1634
2. **Joseph Redmon**, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi; Classification Techniques in Machine Learning: Applications and Issues, 2017, P. 459-460
3. **Utrobín V. A.** Physical interpretation of the elements of image algebra // Phys. Usp., 2004, № 47.- С. 1017–1032.

**V. E. Gai, N. A. Nikiforov**

## INFORMATION MODEL AND ALGORITHMS FOR VIBRATION DIAGNOSTICS OF CRITICAL COMPONENTS AND MECHANISMS OF THE VEHICLE

The problem of vibrodiagnostics is one of the actual problems of technical diagnostics. In vibration diagnostics, the time signal or vibration spectrum of a particular equipment is usually examined. A new approach to vibration diagnostics of vehicle mechanisms based on machine learning is proposed. The results of testing the proposed method on the signal database are presented.

**Keywords:** classification, theory of active perception, pattern recognition.

А.С. Прихунов

## ПРОЦЕДУРА УСТАНОВЛЕНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СЕКВЕНЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье описана процедура анализа последовательности, состоящая из данных, полученные системой мониторинга технического объекта. Рассмотрены понятия техническая диагностика, поиск неисправностей. Приведены основные виды контроля. Описана задача секвенциального анализа и ее роль в технической диагностике. Рассмотрена структура системы установления причинно-следственных связей отказов на основе секвенциального анализа данных.

**Ключевые слова:** секвенциальный анализ, анализ последовательности, оценка состояния, техническая диагностика, ассоциативные правила.

Техническая диагностика – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов (ГОСТ 20911–89). Техническая диагностика позволяет определить состояние технического объекта в конкретный момент времени. Техническое обслуживание технического объекта включает в себя и понятие техническая диагностика. В современных системах техническая диагностика играет очень важную роль. Она включает в себя процедуры, методы и правила, которые в совокупности гарантируют безопасность технического объекта, его эффективную работу, также функциональную надежность. Немаловажной функцией технической диагностики является существенное снижение расходов на техническое обслуживание объекта, в случае своевременного обнаружения процесса изнашивания или выхода из строя его составных частей [1,2].

Благодаря встроенной системе технического диагностирования или системы мониторинга отказов появляется возможность выявить причину отказа и отследить компонент, который к нему привел.

Техническая диагностика включает в себя теорию, средства, методы, процедуры поиска места неисправности технического объекта. Под неисправностью будем понимать любое отклонение или несоответствие параметров диагностируемого объекта от заданных или ожидаемых. Процесс нахождения неисправности и есть установление факта ее присутствия или отсутствия в диагностируемом техническом объекте.

Поиск неисправности сводится к тому, что необходимо с определенной точностью установить ее местонахождение и сформировать полный или частичный адрес ее возникновения. Некоторые системы в процессе диагностирования осуществляют непрерывный контроль технического объекта. Непрерывный контроль обеспечивает система, которая осуществляет проверку соответствия текущих значений некоторых параметров, характеризующие состояние объекта, на наличие отклонения их от заявленных значений в технической документации. Определив значения этих параметров, система непрерывного контроля способна сформировать текущее состояние диагностируемого объекта. Стоит отметить, что контроль имеет большую классификацию[3, 4].

Контроль можно подразделить на контроль диагностический, прогнозирующий и контроль работоспособности. Наиболее простую задачу имеет контроль работоспособности. Он определяет текущее состояние контролируемого объекта. Цель диагностического контроля заключается не только в определении текущего состояния технического объекта, но также выявление причины и локализация его неисправности. Самая сложная задача у прогнозирующего контроля. Он помимо определения текущего состояния объекта должен произвести прогноз возможного отказа и оценить изменение состояния объекта в ближайшее время [5 – 8].

Далее описанная процедура установления причинно-следственных связей отказов на основе секвенциального анализа данных будет рассмотрена на системе диагностического непрерывного контроля, работающая в автоматическом режиме. Под автоматической системой контроля будем понимать систему, обеспечивающую диагностику технического объекта без какого-либо вмешательства человека. Наряду с автоматическими системами контроля существуют также автоматизированные и ручные. Особенность автоматизированных систем контроля заключается в частичном вмешательстве человека-оператора в их работу. Это может происходить в момент обнаружения неисправности, когда оператору следует конкретизировать место нахождения элемента, который вышел из строя. Ручной контроль подразумевает работу системы контроля без средств автоматизации.

По степени автоматизации контроль может быть автоматическим, автоматизированным и ручным. Автоматический контроль осуществляется специальными устройствами и программами без вмешательства человека-оператора; автоматизированный контроль осуществляется с частичным вмешательством человека; ручной контроль осуществляется без средств автоматизации.

Большинство существующих систем контроля основаны на логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов объекта. В основе данного метода лежит дерево отказов. Дерево отказов - это модель надежности и безопасности, позволяющая отобразить логические и функциональные взаимосвязи между компонентами сложного технического объекта. Дерево отказов графически можно изобразить в виде древовидной структуры, лежащую в основе словесно-графического способа исследования возникновения отказа из последовательностей и комбинации неисправностей и отказов элементов системы. Для реализации системы контроля технического объекта требуется тщательное изучение его существующей структуры. На основе полученных сведений о представлении внутреннего устройства объекта выделяются его составные элементы, отказ которых может привести к отказу объекта в целом, и строится дерево отказов, которое является фундаментом для системы контроля.

Однако такой подход имеет существенные недостатки. Большим и самым главным недостатком является высокие затраты средств и времени на реализацию данного метода. Это связано с необходимостью тщательного изучения внутреннего устройства технического объекта. При росте степени детальности рассмотрения структуры объекта происходит геометрическое увеличение событий, влияющие на отказ. Каждое изменение подразумевает собой внесение изменений и в дерево отказов, что приводит к пересмотру его структуры, а также установления сигналов контроля. Также основываясь на таком подходе, необходимо предъявлять к специалисту требования высоких знаний внутренней структуры объекта и детального его понимания. К недостаткам можно отнести и тот факт, что дерево отказов представляет систему в конкретный момент времени, что не всегда позволяет продемонстрировать последовательность наступления событий.

Описанный подход на основе дерева отказов является классическим в построении системы контроля. Он основан на известной структурной схеме системы (комплекса), зная внутреннее устройство которого можно построить дерево отказов. Построенное дерево отказов

используется для решения различных задач, связанные с диагностикой технического объекта, планированием, а также прогнозирование состояния.

Второй подход основан на машинном обучении. Он предполагает, что изначально внутренняя структура системы, объекта или комплекса неизвестна. Такое может быть, когда между элементами организованы сложные связи или их большое количество. Несмотря на это имеются данные, поступающие с системы мониторинга, основанная на сигналах контроля с разных участков системы. Данные, которые собираются в результате мониторинга имеют заданную структуру и содержат сведения о последовательностях событий, в том числе и отказов. Данные поступают в большом количестве с определенной частотой с разных устройств и компонентов. Записанные данные представляют собой большую выборку, которая периодически пополняется актуальными сведениями о текущем состоянии объекта. Тогда располагая такими сведениями на основе данной выборки можно восстановить или оценить логико-вероятностную модель причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При построении этой модели может использоваться, в частности, секвенциальный анализ.

Секвенциальный анализ или анализ последовательности позволяет производить разбор происходящих событий, связанные во времени. При обнаружении некоторой закономерности в полученных последовательностях становится возможным спрогнозировать появление аналогичных или иных событий в будущем. Такой анализ позволит вовремя принять более правильное решение для своевременного предотвращения отказа или его нежелательных последствий.

Последовательностью будем называть кортеж из упорядоченных наборов элементов. Эта последовательность отображает наборы, в которых одновременно встречаются одни и те же элементы. Эти наборы записываются в порядке их возникновения при наблюдении. Целью анализа последовательности является поиск всех частых последовательностей в большой выборке [9].

Технический объект представляет собой сложный мобильный радиолокационный комплекс. Система автоматического контроля содержит механизм непрерывного контроля. С определенной частотой него поступают данных с разных участков комплекса в виде значений параметров, характеризующие их состояние. Вся информация записывается в базу данных. В качестве входных данных для секвенциального анализа возьмем выборку, которую формирует система непрерывного контроля.

Данные, которые поступают с подсистем комплекса, имеют разный вид. Первым делом система непрерывного контроля должна привести их к единой структуре. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем было удобно обрабатывать данные в алгоритме. В полученных данных нас интересует текущее состояние, а также время, в которое было установлено это состояние. Комплекс имеет сложную структуру, состоящую из множества компонентов. Поэтому было бы хорошо знать, от кого конкретно пришло сообщение. Введем понятие код источник, который будет идентифицировать систему в комплексе. Система может собирать данные со своих компонентов и отсылать их системе непрерывного контроля. Система имеет множество компонентов, состояние которых также стоит оценивать. Каждый компонент имеет свой идентификатор, называемый кодом элемента.

Определившись с необходимым набор информации для анализа можно представить структуру данных, которая будет храниться в базе. Каждая запись будет представлять собой следующую строку: «Dt:CodeSrc:NumEl:CodeCurState». Dt – время, в которое была получена информация об элементе, CodeSrc - код источника, NumEl – код элемента, шифр элемента технического объекта, CurState – код текущего состояния элемента. Стоит отметить, что при поступлении новых данных первым делом необходимо отобрать те события, в которых про-

изошли отказы. Это нужно для поддержания большей информативности данных, чтобы исключить не интересующие нас события. Перед началом анализа необходимо отсортировать сообщения по источникам, а затем по времени их поступления.

В задаче секвенциального анализа будем использовать выборку из результатов мониторинга за определенный интервал времени. При поступлении новой информации участок отбора данных будет смещаться в сторону актуальных значений. К этому времени, алгоритм должен успеть обработать ранее записанные данные. Таким образом, получив новые данные, старые можно будет стереть, оставив лишь результат их анализа. По результатам анализа можно будет восстановить причинно-следственную связь отказа, если он был [10].

Существует множество алгоритмов, позволяющие выполнить анализ последовательности. Среди наиболее известных алгоритмов можно выделить ArjioiAll. На данный момент существует большое число его разновидностей. Алгоритм ArjioiAll изначально не позволял учитывать временную составляющую, однако дальнейшее его развитие сделал его пригодным для секвенциального анализа. Все возможные реализации данного алгоритма базируются на следующем высказывании: последовательность событий, входящая в часто встречающуюся последовательность, также является часто встречающейся. Однако данный алгоритм не позволяет определить характер взаимосвязи. При поиске зависимостей в выборке нас интересуют только события, наступившие в скором времени после наступления других. Последовательность, между которыми прошло достаточно много времени не принесут нам никакой информации и такая зависимость нам не подойдет. Также в алгоритме ArjioiAll отсутствует какая-либо группировка данных. Алгоритм не способен учитывать их структуру.

Восполнить пробелы алгоритма ArjioiAll может алгоритм GSP. Это еще один алгоритм, используемый для добычи последовательности. Он учитывает ограничения по времени между соседними транзакциями.

## Заключение

На сегодняшний день существует множество систем контроля. Он играет важную роль и позволяют своевременно предвидеть возникновение отказов. С помощью встроенных процедур, методов и правил системы контроля может обеспечить безопасность технического объекта, сделать его процесс работы максимально эффективным, а также обеспечить функциональную надежность. С помощью своевременной диагностики становится возможным заблаговременное выполнение технического обслуживания объекта, что в значительной мере снижает расходы. Однако традиционное построение систем контроля требует больших знаний в области структуры технического объекта. Задача поиска последовательности может сделать процесс поиска неисправностей более универсальной для разных систем. Благодаря выявлению некоторых закономерностей в процессе мониторинга технического объекта становится возможным построить причинно-следственную связь отказа.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. 23. ГОСТ Р 27.002-2009 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. 24. ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
3. 25. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.



4. **Рябинин, И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
5. **Труханов, В.М.** Надежность, испытания, прогнозирование ресурса на этапе создания сложной техники / Труханов В.М., Клюев В.В. – М.: ИД «Спектр», 2014;
6. **Клюев, В.В.** Деградация диагностики безопасности / Клюев В.В. – М.: ИД «Спектр», 2012;
7. **Клюев, В.В.** Ресурсный подход к обеспечению безопасности систем «Человек – Объект – Среда» / Клюев В.В., Новожилов Г.Н., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С. – М.: ИД «Спектр», 2014.
8. **Клячкин, В.Н.** Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина, Ю.А. Кравцов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 4(4). – С. 919-923.
9. Поиск ассоциативных правил в Data Mining [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data\\_mining/rules.htm](https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data_mining/rules.htm). (Дата обращения: 5.06.2019). Валеев, С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. 2-е изд., доп. и перераб. / С.Г. Валеев. – Казань: ФЭН, 2001. – 296 с.
10. A Survey on Algorithms for Mining Frequent Itemsets over Data Streams [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cse.ust.hk/faculty/wilfred/paper/kais06.pdf>. (Дата обращения: 28.02.2018).

**A.S. Prikhunov**

**PROCEDURE FOR ESTABLISHING CAUSED-INVESTIGATIVE RELATIONSHIPS  
OF FAILURES OF A TECHNICAL OBJECT BASED ON SEQUENTIAL DATA  
ANALYSIS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article describes the sequence analysis procedure, consisting of data obtained by the monitoring system of a technical object. The concepts of technical diagnostics, troubleshooting. The main types of control are given. The task of sequential analysis and its role in technical diagnostics are described. The structure of the system for establishing causal relationships of failures based on sequential data analysis is considered.

**Keywords:** sequential analysis, sequence analysis, state assessment, technical diagnostics, associative rules

А.В. Прихунова, А.В. Семашко

## РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В настоящее время мы постоянно сталкиваемся со словом «качество»: качество товара, качество услуги, качество продукции, качество труда и т.п. На производстве качество – самый важный критерий достижения успеха на рынке. На каждом предприятии должна быть внедрена система менеджмента качества. В статье рассмотрены два распространенных подхода к принятию решения, выявлены достоинства и недостатки каждого и определена актуальная проблема в области качества – отсутствие автоматизированных систем поддержки принятия решений в системе управления качеством. Предложена модель процедуры принятия решения в системе менеджмента качества в общем виде.

**Ключевые слова:** качество, система менеджмента качества, процесс, модель, процедура, поддержка принятия решений, военная промышленность.

### Введение

На каждом предприятии должна быть внедрена система менеджмента качества [1], [2]. Грамотно спланированная система менеджмента качества помогает достичь лучших результатов в области управления качеством. Функционирование системы менеджмента качества берет начало с постановки целей и задач, далее осуществляет контроль процессов разработки, принятия и реализации решений и завершает оценкой выбранного решения проблемы.

Существует огромное количество предприятий, выпускающих технику военного назначения. Основными целями системы менеджмента качества для соответствующих предприятий является [2]:

- исполнение всего, что изложено в техническом задании заказчика и условий договоров;
- соответствие требованиям нормативно-технической документации;
- выявление продукции, несоответствующей установленным требованиям;
- поддержание стабильного уровня качества продукции и ее процессов изготовления;
- снижение количества брака.

Каждый день приходится сталкиваться с новыми задачами, искать новые пути решения, таким образом, одна из важных особенностей системы управления качеством – необходимость принимать порой даже неформальные решения, то есть выбрать одно решение из нескольких возможных.

Существует два распространенных подхода к принятию решения: эвристический, особенность которого в накопленном опыте работы в данной организации, и с использованием методов оптимизации, особенность которого в сведении задачи к многокритериальной оптимизации. Каждый из данных подходов имеют как свои достоинства, так и недостатки. Недостатки эвристического подхода состоят в том, что с использованием систем искусственного интеллекта невозможно предусмотреть все ситуации в процессе разработок военной тех-

ники. Причинами этих недостатков могут служить: недостаточный опыт, неоднозначность сложившейся проблемы, ограниченность факторов как внешних, так и внутренних. К недостаткам методов оптимизации можно отнести высокую подготовку сотрудников службы качества в области математики. Следовательно, несложно сделать вывод о том, что система менеджмента качества в военной промышленности специфична, уникальна и неоднозначна.

Главным требованием к системе управления качеством в военной промышленности – требование к управлению несоответствиями. Данное требование заключается в том, чтобы своевременно выявлять несоответствия на тех или иных этапах жизненного цикла изделия и разрабатывать корректирующие действия для недопущения брака впоследствии.

Важным дополнением к осуществлению данного требования будет документирование действий, направленных на принятие того или иного решения, с выполнением требований существующих стандартов, а также использование специальных средств и методов, с помощью которых сотрудники службы качества смогут проводить сбор, хранение, обработку информации, анализ решений при выборе корректирующего действия.

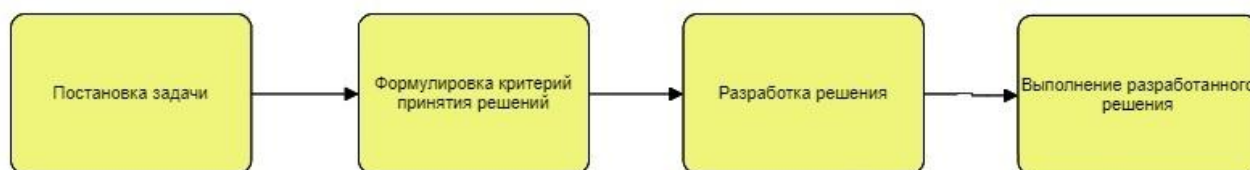
Актуальность данного предложения заключается в том, что настоящие и действующие стандарты серии ИСО 9000 не предусматривают собой использование информационных технологий поддержки принятия решений при управлении несоответствиями.

В сложившемся компьютеризированном мире решение данной проблемы можно осуществить с помощью автоматизированных систем поддержки принятия решений в системе управления качеством. Использование информационных технологий позволит сократить время на выполнение рутинных работ сотрудника службы качества.

### **Модель процедуры принятия решения в системе менеджмента качества в общем виде**

На рис. 1 приведена процедура принятия решения в системе менеджмента качества в общем виде. Она включает в себя 4 основных этапов:

- постановка задачи;
- формулировка критериев принятия решений;
- разработка решения;
- выполнение разработанного решения.



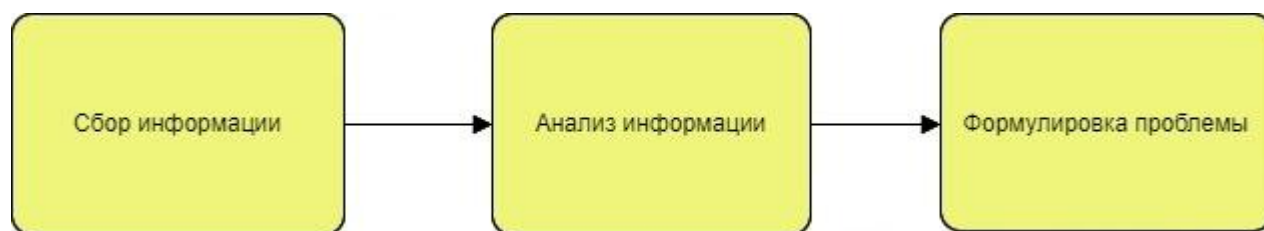
**Рисунок. 1. Процедура принятия решения в системе менеджмента качества в общем виде**

Этап 1. Постановка задачи (рис. 2). Все начинается с постановки проблемы, то есть необходимо решить, какое состояние объекта считается желаемым[3], также нужно выяснить, что именно в настоящий момент расходится с ожидаемым результатом, для этого началом является сбор информации. Проблема возникает тогда, когда происходит обращение к внешним и внутренним факторам, когда обнаруживается какое-либо несоответствие тем или иным факторам, на этом шаге следует анализ информации. Задача на данном этапе состоит в том, чтобы выявить проблему и найти такой путь решения, последствия которого дали бы эффект.

Примерами возникновения проблемы на предприятиях, выпускающих военную технику, могут служить:

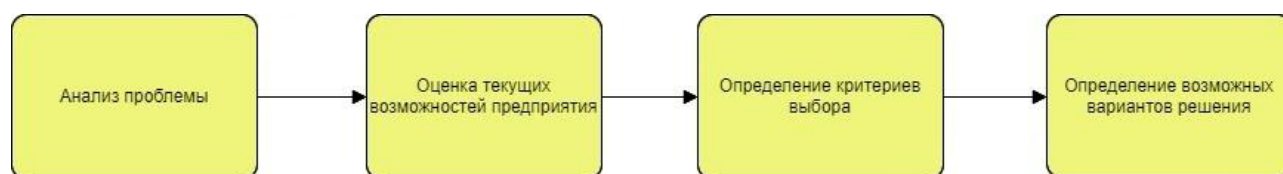
- отклонение электрических параметров составных частей изделий и самих изделий;
- выявленные недостатки при проведении внутреннего аудита;
- отклонение факторов окружающей среды от допустимых;
- информация о роде деятельности конкурентов.

Постановка задачи включает в себя детальное описание возникшей проблемы и ее формулировка.



**Рисунок 2. Детализация процедуры постановки задачи**

Этап 2. Формулировка критериев принятия решений (рис. 3). Формулировка критериев принятия решений начинается с анализа проблемы, а именно выявления причин. Выявив одну причину, которая привела к несоответствию, не стоит останавливаться только на ней, необходимо проводить более обширный анализ. Появление данной причины могли послужить более глубокие причины. Каждый раз, глубже и глубже разбираясь в сути одной из причин, вырисовывается дерево причин, строится так называемый «скелет» из первопричин, модель «рыбий хвост». Ширина и длина «рыбьего хвоста» определяется лицом, принимающим решение, который разбирается в данной предметной области. По каждой из причин следует сделать оценку текущих возможностей предприятия, на их основе определить критерии выбора и предопределить возможные варианты решения.



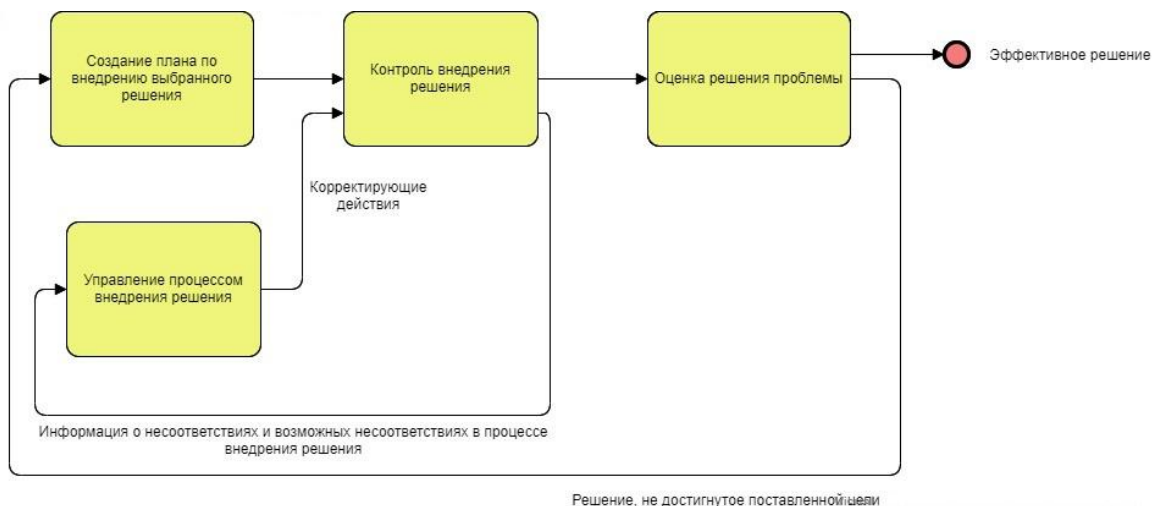
**Рисунок 3. Детализация этапа формулировки критериев принятия решений**

Этап 3. Разработка решения (рис. 4). Как было уже описано ранее, в этапе 2, после достижения первопричины необходимо предопределить возможные варианты решения, соответствующие возможностям предприятия, для предотвращения появления их вновь, а значит потерь, связанных с ним, организации. После нахождения нескольких путей решения проблемы оцениваются последствия. Далее следует выбрать лучшее решение по мнению лица, принимающего решение. Выбор должен быть сделан с учетом того, что потребуется минимум при этом затрат, а именно трудовых, временных, финансовых. Последующий шаг – составление плана по реализации выбранного решения.



**Рисунок 4. Детализация этапа разработки решения**

Этап 4. Выполнение разработанного решения (рис. 5). На данном этапе происходит внедрение выбранного решения по созданному и утвержденному плану. Каждый шаг внедрения выбранного решения по плану должен контролироваться должностным лицом, тем, кого поставили ответственным за выполнение разработанного решения. Вся информация, содержащая в себе положительные результаты, поступает контролирующему лицу, а также о несоответствиях и возможных несоответствиях в процессе внедрения решения. При поступлении информации о несоответствиях необходимо провести корректирующие действия, за это отвечает процедура управления процессом внедрения решения. Как только решение было внедрено, следует произвести оценку решения проблемы. Под оценкой решения проблемы можно понимать подсчет того, сколько было затрачено трудовых, временных и финансовых ресурсов организации, а также вывод о том, было ли решение достигнуто поставленной цели. Если решение, по мнению должностного лица, не достигнуто поставленной цели, то это означает, что необходимо пересмотреть план по внедрению выбранного решения на данном этапе. После контроля внедрения решения, оценки решения проблемы рождается эффективное решение.



**Рисунок 5. Детализация этапа выполнения разработанного решения**

Разрабатывая модель процедуры принятия решений в системе менеджмента качества в общем виде, учитывались особенности предметной области, а также проблемы, которые могут возникнуть, внештатные ситуации, причины их возникновения.

Моделирование процедуры принятия решений в системе менеджмента качества в общем виде проводилось для оценки эффективности этого процесса, его уязвимых мест и поиска

способов их устранения, а значит улучшения функционирования всей процедуры. Среди всех этапов важными шагами в моделируемой процедуре являются поиск первопричины, построение «рыбьего хвоста», и выбор лучшего решения. Результат всего процесса наибольшим образом зависит от этих двух процессов. Далее предлагается рассмотреть математическую модель процедуры принятия решений в системе управления качеством.

### **Заключение**

В статье рассмотрены два распространенных подхода к принятию решения, выявлены достоинства и недостатки каждого и определена актуальная проблема в области качества – отсутствие автоматизированных систем поддержки принятия решений в системе управления качеством. Предложена модель процедуры принятия решения в системе менеджмента качества в общем виде. Рассмотренную модель интересно применить на предприятии, выпускающем военную технику, имеющем систему менеджмента качества и занимающемся научно-исследовательскими работами. В научно-исследовательских институтах большую часть времени занимают опытно-конструкторские работы. К примеру, применение такой модели возможно при проведении технической проверки в секторе технического контроля для выявления причин отклонения заявок, предъявляемых на техническую проверку изделий или его составных частей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### **Библиографический список**

1. **ГОСТ Р ИСО 9001-2015** «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. ISO 9000:2015»
2. **ГОСТ РВ 0015-002-2012** Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования». Москва, Стандартинформ, 2012
3. **Голубков, Е.П.** Какое принять решение? (Практикум хозяйственника) [Текст] / Е.П. Голубков. - М.: Экономика, 1990. – 189 с.

**A.V. Semashko, A.V. Prikhunova**

### **DEVELOPMENT OF DECISION-MAKING PROCEDURES IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEM**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Currently, we are constantly confronted with the word “quality”: quality of goods, quality of services, quality of products, quality of work, etc. In production, quality is the most important criterion for success in the market. At each enterprise, a quality management system should be implemented. The article discusses two common approaches to decision making, identifies the advantages and disadvantages of each and identifies an urgent problem in the field of quality - the absence of automated decision support systems in the quality management system. A model of the decision-making procedure in the quality management system is proposed in general.

**Key words:** quality, quality management system, process, model, procedure, decision support, military industry.

**В. Е. Гай, С. А. Разумовский**

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СИГНАЛАМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Рассмотрены основы построения систем автоматической обработки информации с использованием технологии нейронных сетей для радиолокационных станций. Изложена концепция внедрения нейросетевых методов в обработку радиолокационной информации. Приведены конкретные примеры решения задач обработки радиолокационной информации с помощью нейронных сетей и дан сравнительный анализ эффективности систем обработки построенных на нейросетевых и традиционных принципах. Рассмотрены перспективы использования нейросетевых методов для решения задач обработки радиолокационной информации.

**Ключевые слова:** радиолокация, нейронные сети, классификация объектов.

### **Введение**

Информатизация российского общества востребована массовым пользователем и идет в последние годы достаточно быстро. Использование технологий высокопроизводительной обработки данных увеличивает эффект проводимых исследований и сокращает затраты на проектирование передовых, сложных образцов продукции, а также повышает качество промышленных изделий.

Одним из направлений построения эффективных систем обработки данных является использование новой информационной технологии - технологии нейронных сетей. Данная технология дает возможность компьютерной системе обучаться на примерах. Искусственные нейронные сети позволяют получать решения многих проблем, ранее считавшихся неразрешимыми. При этом достигается гибкость и адаптивность работы, робастность, способность к обобщению. Кроме того, за счет использования специальных архитектур, основанных на множестве одинаковых, достаточно простых элементов, появляется возможность применения параллельных вычислительных средств, причем простота элементов позволяет реализовывать массовую параллельность вычислений. Среди большого числа приложений нейронных сетей есть и приложения в области радиолокации. В настоящее время американское военное командование финансирует целый ряд научно-исследовательских работ, которые посвящены этой тематике. Агентство по перспективным исследованиям DAPRA начало финансирование исследований в области применения нейронных сетей для обработки радиолокационной информации.

В настоящее время известно достаточно большое число зарубежных исследований, в которых рассматривается возможность создания нейросетевых обнаружителей. Например, в работах Andina D and Sanz-Gonzalies J.L., Kuck M., Guo C., Kuh A., Bhattacharya T.K., Chilingarian A. обсуждаются особенности использования нейронных сетей для решения задач обнаружения целей, такие как выбор формы желаемого отклика, стабилизация уровня ложной тревоги, последовательное обнаружение, работа в существенно нестационарных условиях, обнаружение слабых сигналов на фоне интенсивных шумов, демонстрируются их преимущества перед традиционными обнаружителями. Из российских исследователей, зани-

мающихся данной проблемой, можно назвать Перова А.И., Татузова А.Л., Галушкина А.Н. В работе Перова А.И., Соколова Г.Г. рассматривалась проблема обнаружения и оценки параметров сигнала нейросетевыми методами.

### Решение поставленной задачи. Описание теоретической части алгоритма

В этом разделе описывается метод моделирования радиолокационного сигнала и теоретическая часть моделирования нейронной сети. Основной задачей является построение математической модели реальной работы радара и проектирования нейронной сети. Второстепенными задачами являются: построение 3D моделей человека и автомобиля.

ПО используемое в данном проекте:

- Unity 2018.4.9.f1,
- Visual Studio 2017,
- Matlab R2019a,
- Communications Toolbox,
- Deep Learning Toolbox.

Параметры радара:

Sampling frequency	$f_s = 50 \text{ MHz}$
FFT size for range:	512
FFT size for speed:	128

#### Математическая модель

$\Delta f_r = \frac{2 * r * dF}{c * T_p}$  - массив частот, полученный из-за изменения расстояний

$\varphi = \frac{4\pi r_i(t)}{\lambda}$  - массив значений доплеровской фазы

$Sig = \exp\left(1i * \left(2 * \pi * f_r * \frac{rem(i, N_s)}{F_s} + \varphi\right)\right)$  - полная реализация во времени

Расчет значений расстояния (диапазона), соответствующих частотам по размеру диапазона (внутри одного чирпа):

$$Ranges(i) = \frac{(i - 1) * F_s * c * T_p}{2 * N_s * dF}$$

Расчет значений скоростей, соответствующих одному периоду:

$$Velocities(i) = \frac{(i - 1) * \lambda}{2 * N_d * T_p}$$

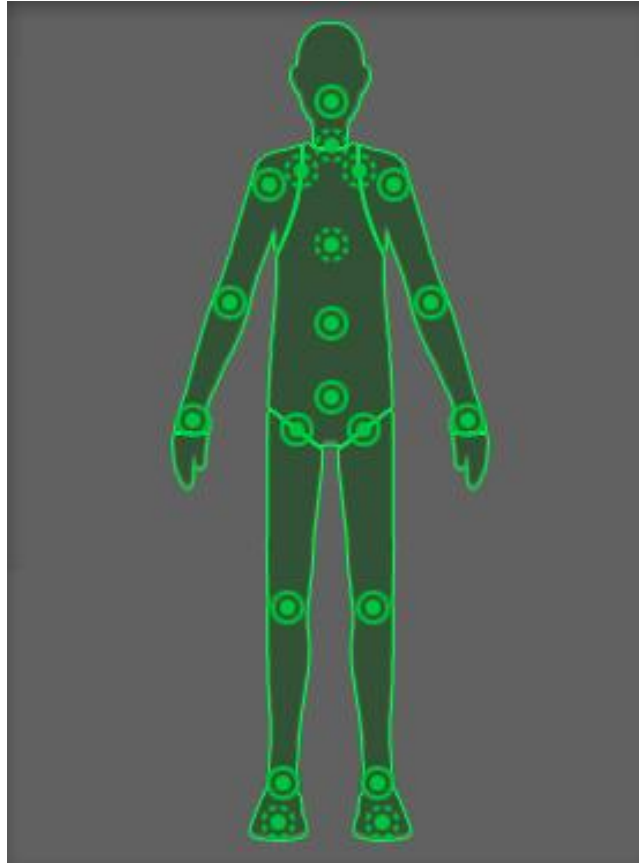
Для генерации данных используются разные начальные скорости пешеходов, разные векторы направления и разное время моделирования сцены. Скорость пешехода варьируется от 1,3 до 2,6 метра в секунду. Направление от -90 до 90 градусов. Время от 1 до 10 секунд.

#### Построение моделей человека и машины

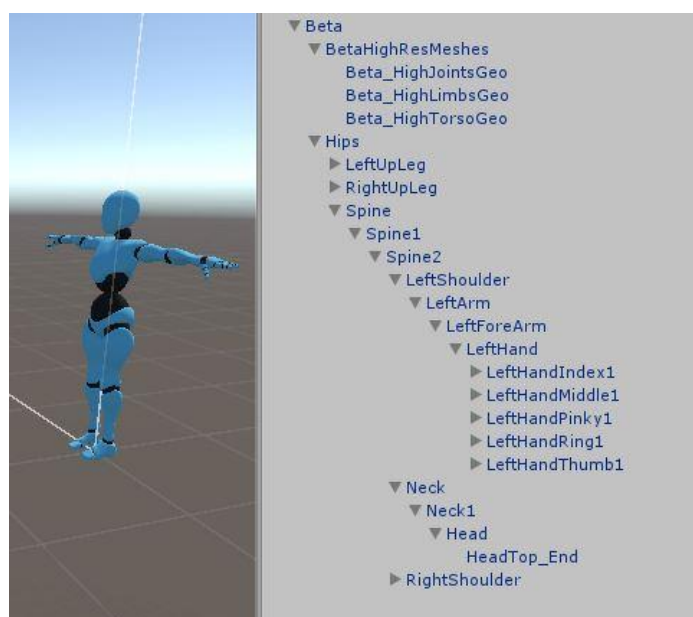
Пешеход построен на основе гуманоидного аватара, готовые модели и анимации взяты из mixamo. Машина и ее физика взяты из примера UnityAsset «VehiclePhysicsPro». Unity имеет специальные функции для работы с гуманоидными персонажами. Поскольку гуманоидные персонажи часто встречаются в играх, Unity предоставляет специализированный рабочий



процесс и расширенный набор инструментов для гуманоидных анимаций. Система аватаров – это то, как Unity определяет, что конкретная анимированная модель имеет гуманоидный вид и какие части модели соответствуют ногам, рукам, голове и телу. Из-за сходства в структуре кости между различными персонажами-гуманоидами можно отображать анимацию от одного персонажа-гуманоида к другому, позволяя ретаргетинг и обратную кинематику.



**Рисунок 1. Структура аватара в Unity**



**Рисунок 2. Структура гуманоида**

## Структура нейронной сети

В некоторых случаях нейронная сеть может принимать на вход трехмерную матрицу (т.е. каждый кадр представлен отдельно (рис. 3)), в нашем случае на вход двумерную матрицу (т.е. до передачи в матрицу все кадры суммируются (рис. 4)). Это решение было принято, потому что проще и быстрее разработать нейронную сеть для двумерной матрицы.

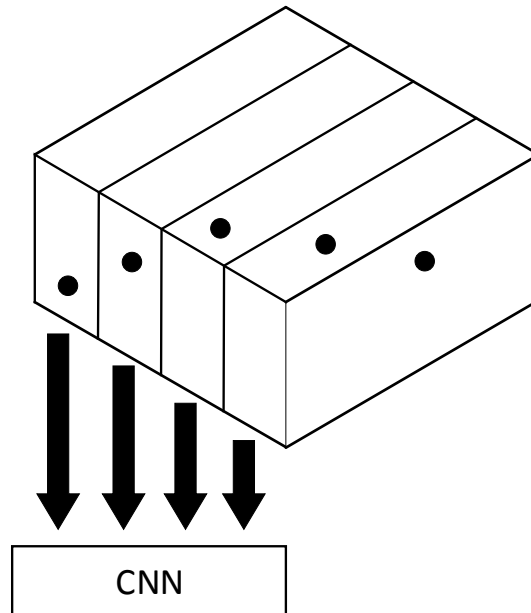


Рисунок 3. На вход нейронной сети подаются кадры по отдельности

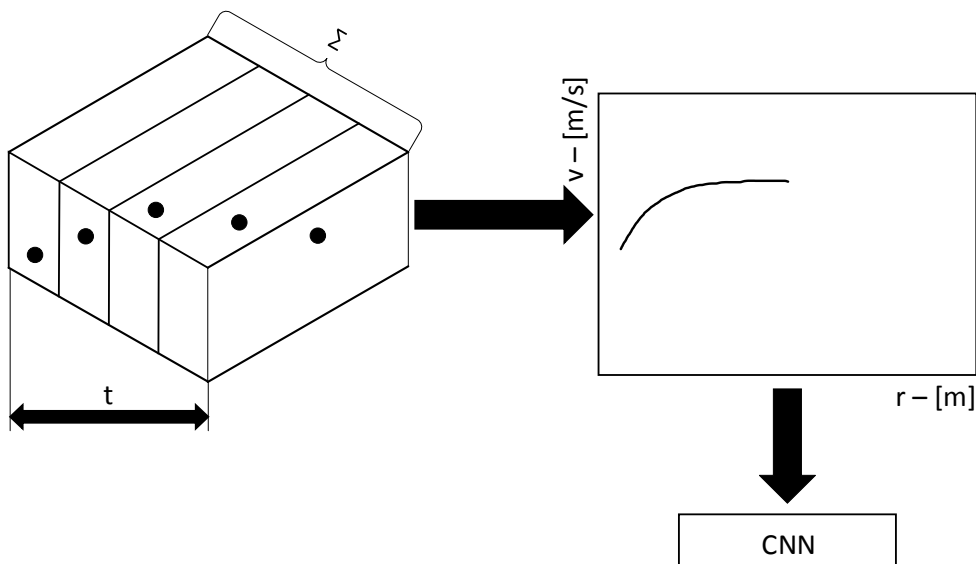
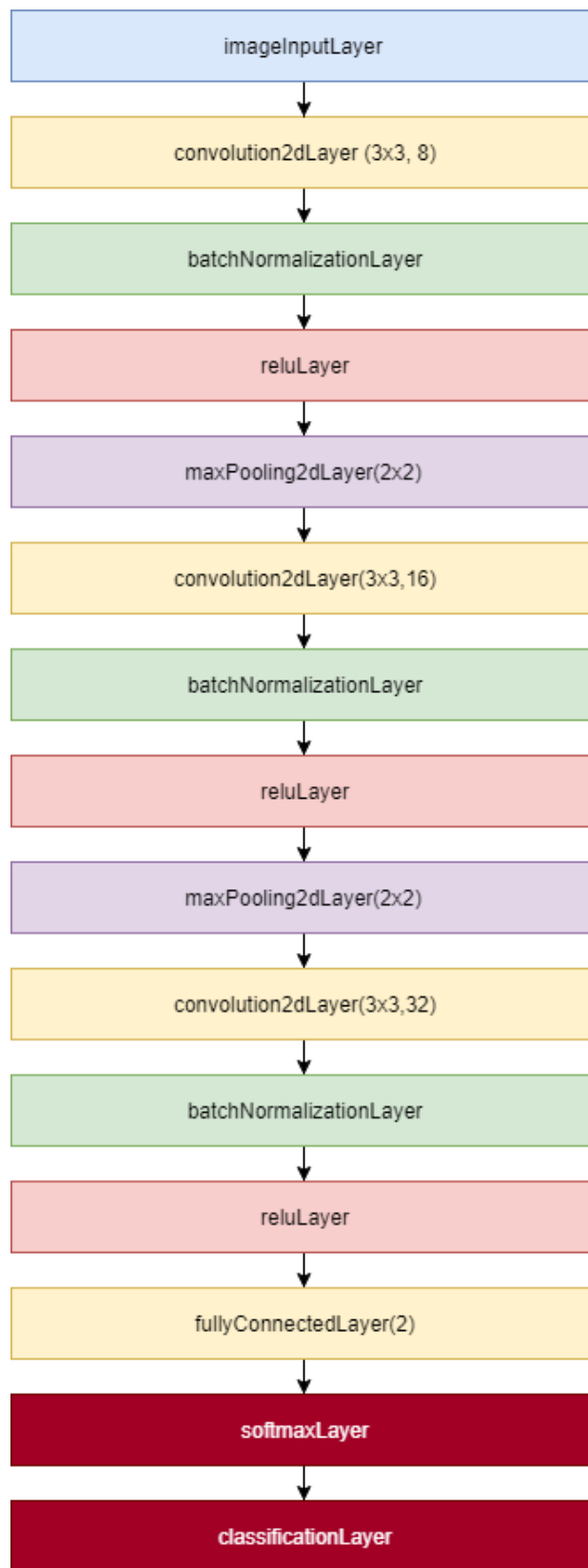


Рисунок 4. На вход нейронной сети подаётся сумма кадров



**Рисунок 5. Архитектура нейронной сети**

## Результат симуляции

В результате моделирования радара, следующие спектрограммы были получены следующие результаты, приведенные на рис. 6-9.

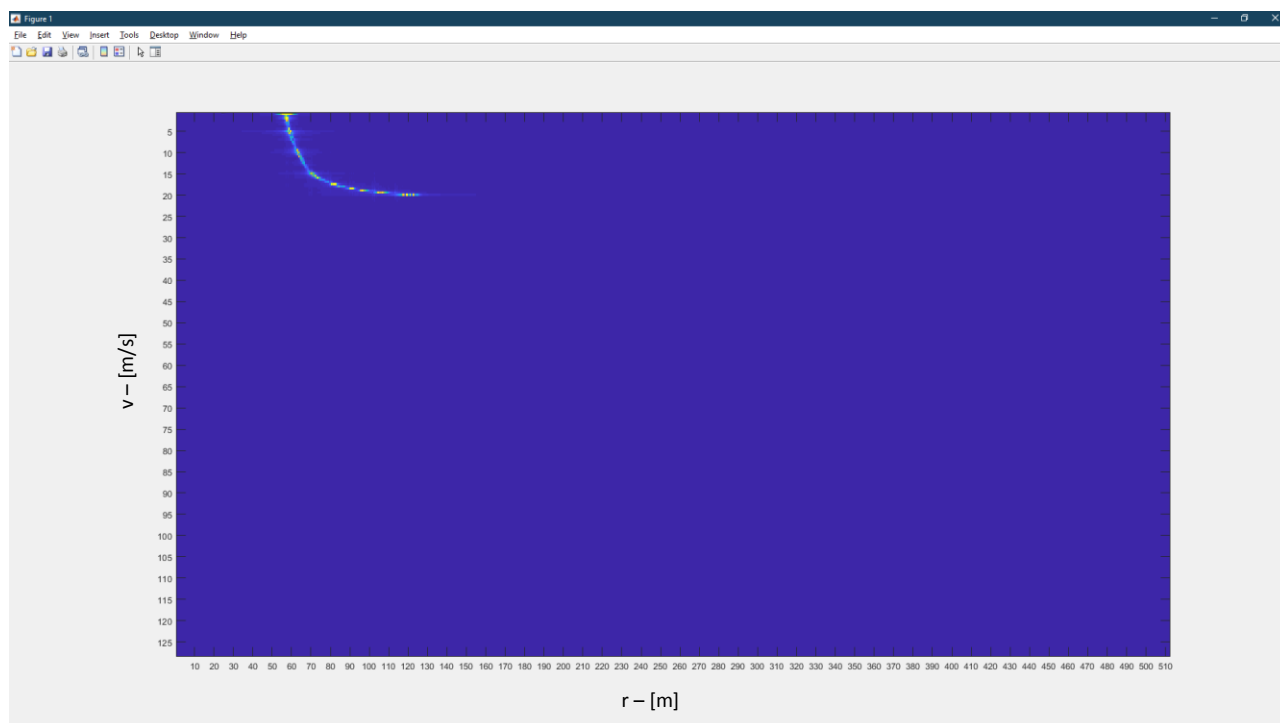


Рисунок 6. Спектрограмма машины

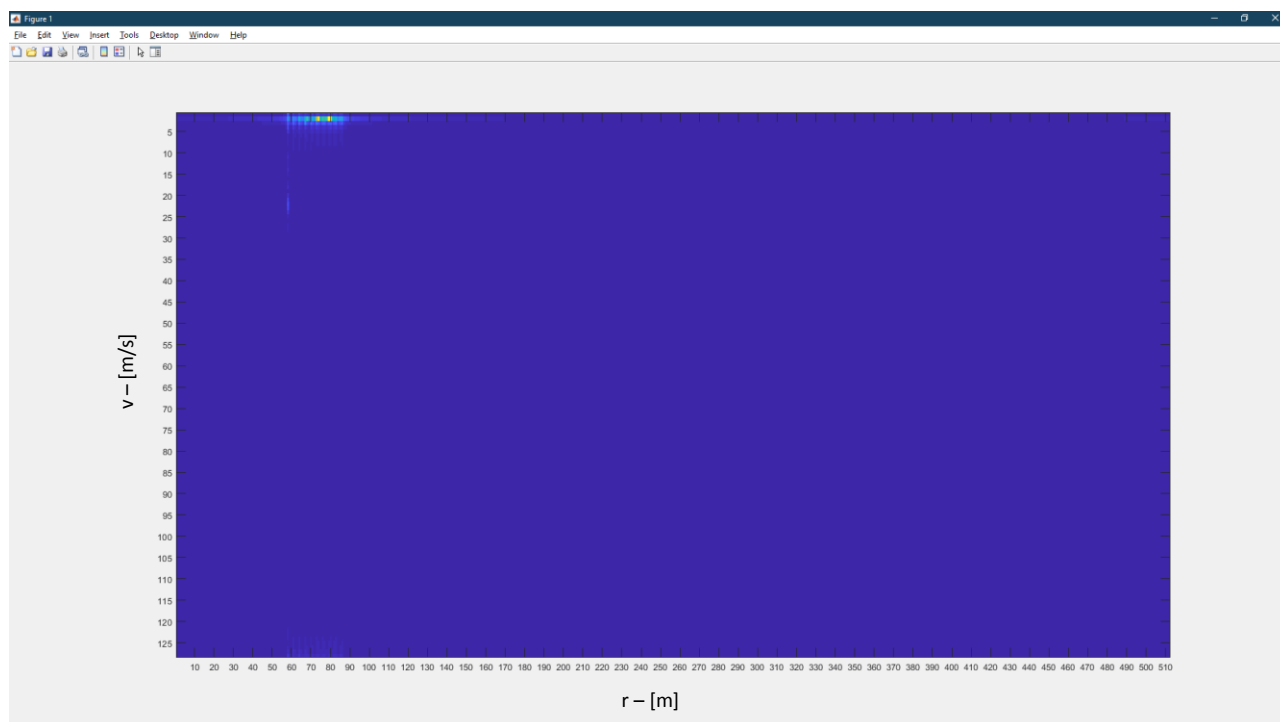


Рисунок 7. Спектрограмма движения пешехода

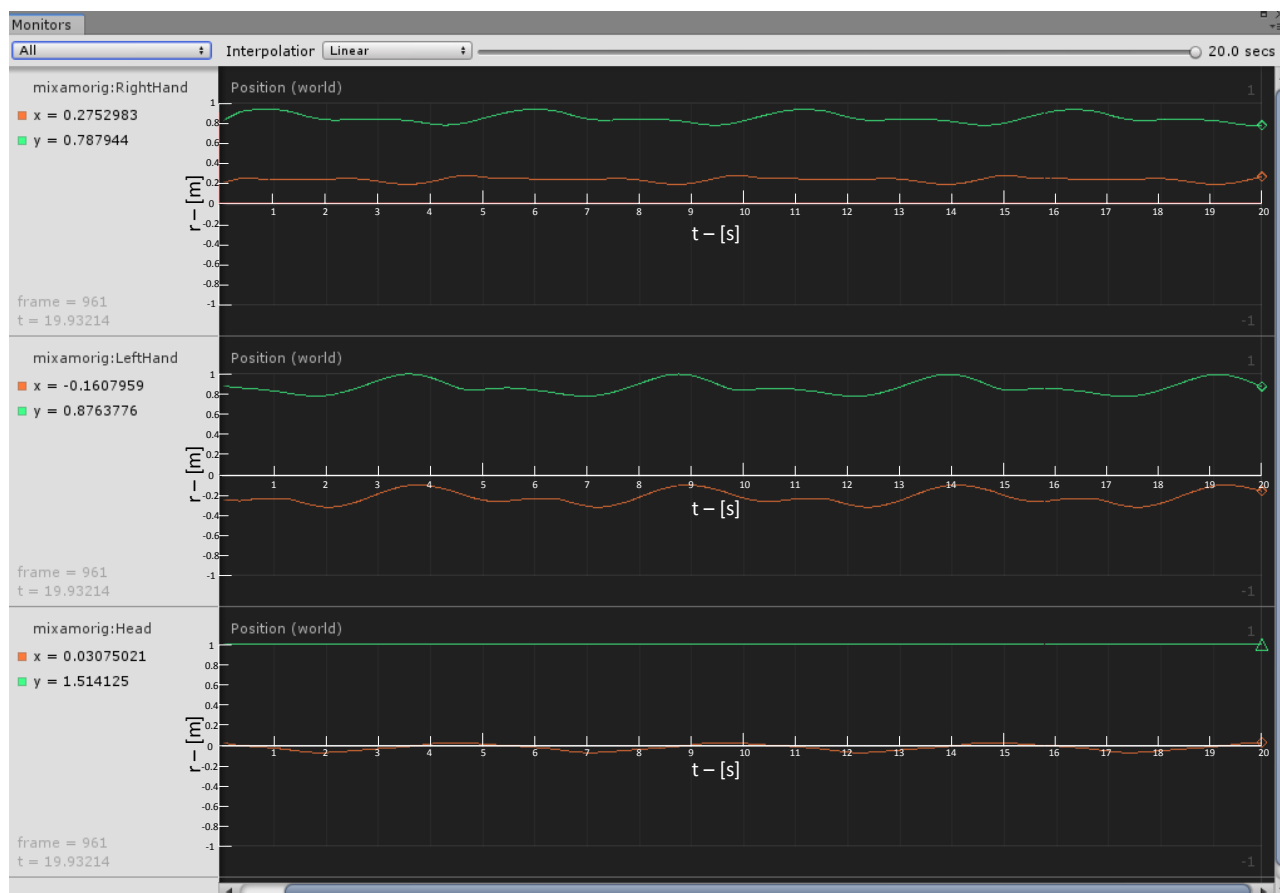


Рисунок 8. Осциллограмма движения пешехода

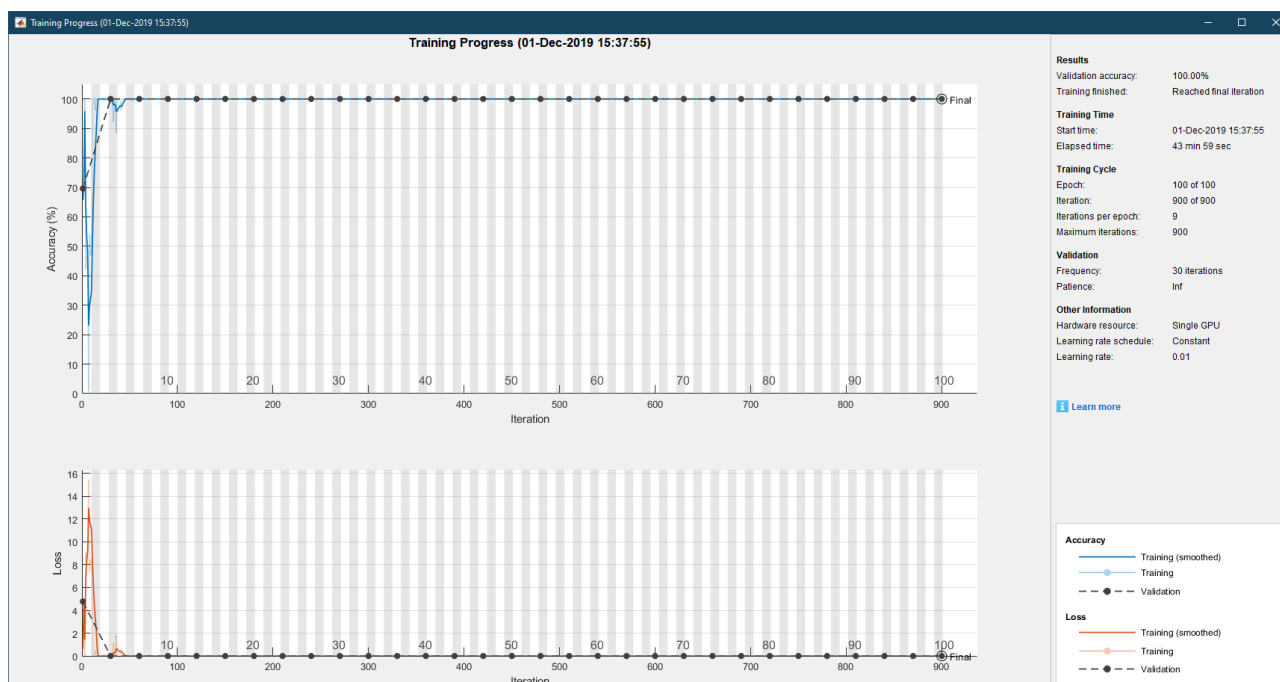


Рисунок 9. Результат обучения нейронной сети

После обучения и тестирования точность распознавания составляет 100 процентов. Однако при дальнейшей работе с реальными данными точность может измениться. Нейронная

сеть была обучена на 1440 спектрограммах, где 720 спектрограмм представляют один класс. Для каждого класса 600 значений, используемых при обучении, и 150 значений для тестирования.

### **Заключение**

В результате работы была разработана математическая модель, моделирующая радиолокационный сигнал (FMCW), смоделировано движение пешехода и автомобиля, построены их 3D модели, спроектирована нейронная сеть с определённой архитектурой, она была обучена и проверена на данных из симулятора сигналов. В итоге была получена нейросеть, способная классифицировать человека или автомобиль по радиолокационным спектрограммам. Для дальнейшего улучшения необходимы данные с реального радара.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-37-20383.*

### **Библиографический список**

1. **Samuele Capobianco, Luca Facheris, Fabrizio Cuccoli and Simone Marinai**, Vehicle classification based on convolutional networks applied to FM-CW radar signals, CNITRaSSc/oDipartimento di Ingegneria dell'Informazione
2. **A. Bartsch, F. Fitzek, and R. H. Rashofer**, Pedestrian recognition using automotive radar sensors, Adv. Radio Sci., 10, 45–55, 2012
3. **Вс. Vojtech Micka**, Objects identification in signal processing of FMCW radar for Advanced Driver Assistance Systems, Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering Department of Cybernetics
4. **Patrick J. McGetrick, Chul-Woo Kim, Arturo González, Eugene J. OBrien**, Dynamic axle force and road profile identification using a moving vehicle, The Twenty-fifth KCCNN Symposium on Civil Engineering October 22-24, 2012, Busan, KOREA

**V. E. Gai, S. A. Razumovskiy**

### **INFORMATION MODEL AND ALGORITHMS OF OBJECT IDENTIFICATION BY RADAR SIGNALS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Basics of construction of systems of automatic information processing with use of technology of neural networks for radar stations are considered. The concept of introducing neural network methods in radar information processing is described. The concrete examples of the decision of problems of the radar information processing by means of neural networks are resulted and the comparative analysis of efficiency of systems of processing constructed on neural networks and traditional principles is given. The prospects of using neural network methods for solving the problems of radar information processing are considered.

**Key words:** Radar, neural networks, Classification of objects.

Т.А. Рубцова, А.В. Семашко

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ В РЕЖИМЕ ВЕЩАНИЯ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С КИБЕРАТАКАМИ. МЕТОД MLAT

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В 2020 году планируется ввести на большинстве самолетов систему автоматического зависимого наблюдения – вещания (АЗН-В). Она уже используется на некоторых импортных воздушных судах. После эксплуатации и анализа системы АЗН-В на базе 1090 ES был выявлен очень критичный недостаток – подверженность киберугрозам, для решения данной проблемы были предложены два метода: метод добавления вторичного радиолокатора и метод MLAT.

**Ключевые слова:** АЗН-В, ADS-B, кибератаки, MLAT, радиолокатор, VDL-4, 1090 ES.

### Введение

Существует система АЗН-В, получившая широкое распространение за рубежом и на данный момент частично внедрена в России. Она позволяет определять погоду, местоположение самолета, позволяет повысить безопасность полетов самолетов в условиях плохой видимости. Несмотря на все эти преимущества, система имеет ряд недостатков.

Хакерские атаки являются угрозой для многих объектов, в том числе и системы АЗН-В. Серверы авиакомпаний не являются исключением. Это может повлиять на отмену или задержку пассажирского рейса.

### Описание системы АЗН-В

Система наблюдения АЗН-В, которая предназначена для замены традиционных радиолокационных систем станет важной частью системы воздушного транспорта следующего поколения. Это система управления воздушным движением, которая передает информацию о воздушном судне, такую как местоположение, курс, скорость.

АЗН-В, уже проверенный и сертифицированный в качестве приемлемой недорогой замены обычного радара, позволяет пилотам и авиадиспетчерам «видеть» и контролировать воздушное судно с большей точностью и на гораздо большем участке земной поверхности, чем когда-либо было возможно [1].

Автоматический, поскольку он всегда включен и не требует вмешательства оператора. Зависимый, так как зависит от точного сигнала GNSS для данных о местоположении. Наблюдение предоставляет «радарные» службы наблюдения, очень похожие на RADAR. Широковещательная рассылка непрерывно транслирует данные о местоположении самолета и другие данные на любой самолет или наземную станцию, оборудованную для приема ADS-B.

Авиационные администрации рассматривали АЗН-В как основной метод наблюдения, который должен был бы быть установлен на всей гражданской авиации к 2020г. На всех зарубежных самолетах типа «boeing» и «airbus», в которых первоначально была установлена данная система наблюдения, и на российских самолетах КБ Туполева и Ильюшина в 2003 г.

было рекомендовано использовать АЗН-В на определённой частоте 1090 МГц - 1090 ES (АЗН-В/1090)[2].

### Сравнение АЗН-В и радиолокаторов

Наиболее наглядно увидеть разницу этих технологий позволяет увидеть табл. 1.

Таблица 1

Сравнение АЗН-В и радиолокаторов

Критерии	Радиолокаторы	АЗН-В
Установка и обслуживание	Являются громоздкими, дорогостоящими в установке и обслуживании устройствами со сложными антенно-фидерными устройствами.	Низкое энергопотребление, небольшая стоимость, не имеют в своем составе подвижных и вращающихся конструкций, обеспечивают большую точность позиционирования ВС
Темп обновления данных	10 секунд	1 секунда
Частоты:	960-1,215 МГц	978 МГц (UAT/США); 1090 МГц (1090ES/ЕС, США т.д.); 108-118 МГц (VDL-4/Швеция, Россия).
Полет на малых высотах	Непригодны для контроля за полетами воздушных судов (ВС) на малых высотах.	Обеспечивают поле наблюдения за ВС на малых и предельно малых высотах
Отслеживание месторождения в Северных широтах	Непригодны для поддержки функций ОрВД в ряде районов Российской Федерации, особенно в районах Крайнего севера и Арктики	Не зависимы от зон
Принятие решений	Диспетчеров УВД	Пользователи воздушного пространства (экипажи ВС)

Наглядное сравнение работы радиолокатора и АЗН-В представлено на рис. 1-2 [3].

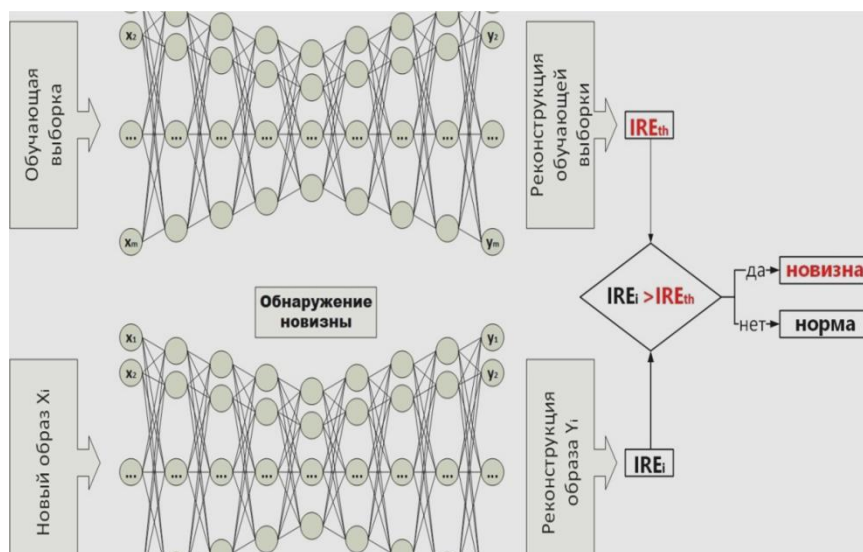
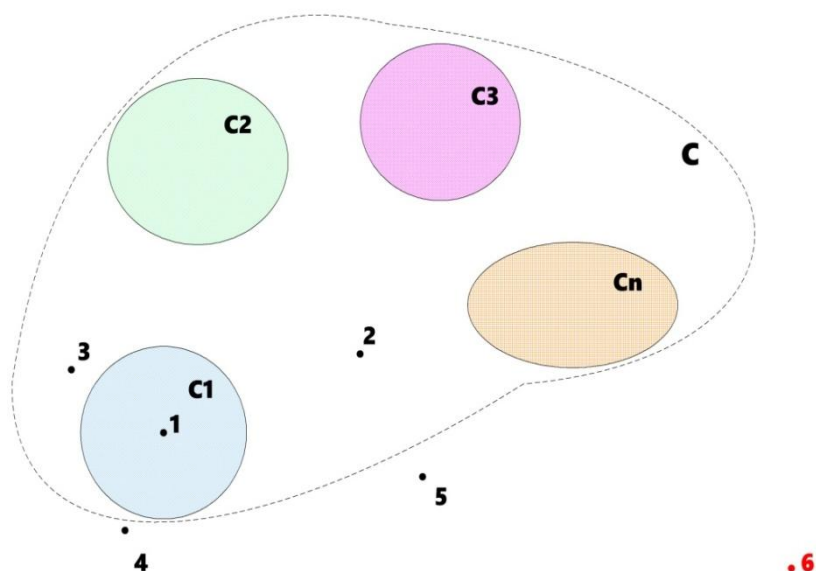


Рисунок 1. Вторичный радиолокатор





**Рисунок 2. АЗН-В**

Таким образом, система АЗН-В имеет ряд преимуществ по сравнению с радаром и определить местоположение самолета с ее помощью можно намного быстрее и удобнее. Поэтому имеет смысл заменять радарные установки на данную более современную систему.

В ЕС за последний год бортовое оснащение АЗН-В 1090ES выросло вдвое (данные на апрель 2019г.). Оборудование уже не первый год устанавливают на новые самолеты. Сейчас эта линия передачи данных применяется в более чем 50 странах мира [4].

В воздушном пространстве Российской Федерации реализуется АЗН-В на основе двух стандартов:

- 1090 ES («расширенный сквиттер»);
- VDL-4[5].

Реализация сопряжения двух стандартов (1090ES и VDL-4) предусмотрена за счет наземных средств. При этом реализация канала «земля-борт» применительно к VDL-4 заложена в базовую основу указанного стандарта, а передача информации по каналу «земля-борт» в формате 1090ES имеет ряд технических трудностей. Данная система имеет огромный минус. Поскольку АЗН-В - это система вещания, предназначенная для всех близлежащих воздушных судов, в ней передаваемые данные не шифруются. Это не препятствует атакам и ложному внедрению данных.

### **Методы, препятствующие атакам на самолеты**

Некоторые из возможных методов атаки - подмена данных АЗН-В и заикливание. АЗН-В на базе 1090ES абсолютно незащищено от несанкционированного вмешательства. Канал АЗН-В это канал широковещательного типа, сигналы не проверяются на подлинность. Таким образом, атакующий может добавить местоположение несуществующего самолета в систему [6]. Для использования информации на АЗН-В на базе 1090 ES должна обязательно выполняться верификация с использованием одного из двух методов, описанных далее. По этим причинам западные страны подтвердили важность поддержания радарной системы наблюдения или организации системы мультilaterации, но они обе достаточно дороги.

Одно из решений – добавление вторичного радиолокатора наблюдения. Это нужно для проверки целостности и компенсации потери данных АЗН-В. Если самолетов мало, то это

вполне действенный метод. При большом скоплении числа самолетов более действенным является второй метод, MLAT.

## Метод MLAT

Метод проверки MLAT (англ. Multilateration, русский аналог: наземный многопозиционный) может использоваться для обнаружения простых ложных передач данных АЗН-В. Этот метод наблюдения, основанный на разнице во времени прихода радиосигнала. Даже при такой проверке подделку сложнее обнаружить, если злоумышленник осведомлен о методах проверки. При этом отсутствуют частые ошибки, из-за которых из строя выходят работающие приемники, что является серьезной проблемой во время работы АЗН-В.

В марте 2018 года внедрена в эксплуатацию система MLAT «Альманах», В 2016 в Пулково были проведены успешные испытания данной системы.

Когда «бескоординатный» борт излучает сигнал Mode-S, то этот сигнал проделывает путь в атмосфере и поступает в приемники, распространяясь при этом со скоростью света (1):

$$V_{LS} = \frac{c}{r_{air}} = 299.522 \text{ m/s} = 300 * 10^6 \text{ m/s} = 300 \text{ m/mks} \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что пакет данных проходит 300 метров или 1000 футов в 1 микросекунду [7].

Типичный пакет передачи данных приемником SBS-1 показан в табл. 2. Каждый пакет данных содержит в себе информацию, в которой есть значение 24-битного счетчика приемника (SBS-1).

Таблица 2

Пакет передачи данных приемником SBS-1

10 02	Header STX (заголовок)
01	SBS-1 тип сообщения
00	всегда 0
1b 29 56	SBS-1 24 битный счетчик
8f 71 be 01 60 bf 00 b3 1c 5c a1 00 00 00	Mode-S DF17 сообщение
3e 49	SBS-1 CRC
10 03	Trailer ETX (трейлер)

MLAT представляет собой новый путь в области слежения за воздушным пространством. Данный метод имеет ряд преимуществ относительно предыдущего метода [8].

## Заключение

Необходимость внедрения АЗН-В 1090 ES (с ее недостатками) в России обусловлена тем, что она уже используется на импортных воздушных судах. Установка АЗН-В 1090 ES нецелесообразна без развития наземной инфраструктуры вторичной радиолокации или использования системы MLAT.

Плюсы MLAT-систем перед вторичной радиолокацией - это более высокая точность определения информации о местоположении и выше скорость получения информации. Наиболее лучший вариант решения проблемы кибербезопасности - система MLAT [5].

## Библиографический список

1. Есть ли защита от кибератак? // Транспорт России – URL: <http://transportrussia.ru/item/4220-est-li-zashchita-ot-kiberatak.html>
2. ADS-B and other means of surveillance implementation status.Sesar deployment manager. May 15th , 2018 – 56 стр.
3. ADS-B Technologies// How Does ADS-B Work?– URL:<http://www.ads-b.com/>
4. АЗН-В как технология наблюдения// habr.com– URL:<https://habr.com/ru/post/467627/>
5. Автоматическое зависимое наблюдение и сопутствующие информационных технологии// ФГУП «Государственный научно – исследовательский институт авиационных систем» – URL: <https://www.gosniias.ru/pages/d/maks-15-azn1.pdf>
6. Секьюрити для неба//Российская газета – URL: <https://rg.ru/2017/07/17/kak-zashchitit-aviatransport-ot-hakerskih-atak.html>
7. Multilateration – MLAT// ADBRadar– URL: <https://adsbradar.ru/ads-b-multilateration-mlat>
8. MLATтехнология// ADBRadar– URL: <https://adsbradar.ru/mlat-using-part-1>

**T.A. Rubtsova, A.V.Semashko**

### **RESEARCH OF AUTOMATIC DEPENDENT OBSERVATION IN THE MODE OF BROADCASTING AND METHODS OF COMBATING CYBER ATTACKS, IN PARTICULAR MLAT METHOD**

Nizhny Novgorod state technical university. R.E. Alekseeva

In 2020, it is planned to introduce an automatic dependent surveillance - broadcasting system (AZN-V) on most aircraft. It is already used on some imported aircraft. After operation and analysis of the AZN-V system based on 1090 ES, a very critical drawback was revealed - exposure to cyber threats, two methods were proposed to solve this problem: the method of adding a secondary radar and the MLAT method.

**Keywords:** AZN-B, ADS-B, cyberattacks, MLAT, radar, VDL-4, 1090 ES

Т.А. Рубцова, А.В.Семашко

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОГНИТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННОЙ СВЯЗИ И УРОВНЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОГНИТИВНЫХ РАДОСТАНЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Авиационный спектр недостаточно используется из-за стратегии распределения статического спектра. Системы авиационной связи, такие как воздух-воздух и воздух-земля, беспроводная авионика, внутренняя связь, может значительно выиграть от динамического доступа к спектру. Использование динамического доступа к спектру в ряде случаев может считаться эффективным решением. Для управления использованием спектра необходимы инновационные методы с использованием когнитивного радио.

**Ключевые слова:** CRS, система когнитивного радио, СА, радиочастотный спектр.

### Введение

Потребности в авиационном частотном спектре всегда имели и имеют решающее значение для авиации и, как ожидается, будут иметь еще большее значение при устойчивом росте воздушного движения. Огромный рост авиационной промышленности за последние два десятилетия прогнозирует увеличение числа самолетов к 2025 году. Количество пассажиров воздушного транспорта неуклонно растет, создавая непростую задачу авиакомпаний – поддерживать безопасность полета, при большой концентрации самолетов на квадратный метр [1].

В 2017 г. в отечественной гражданской авиации был преодолен рубеж в 100 млн перевезенных пассажиров, а в 2018 г. их число возросло уже до более 116 млн чел. За 12 месяцев 2019 года российские авиакомпании перевезли 128,1 млн. пассажиров, превысив показатели прошлого года на 10,2% [2].

Этот прирост в сфере воздушного транспорта требует не только новых инфраструктур аэропорта, но и инноваций в системах управления воздушным движением. Радиочастотный спектр, выделенный для авиационной связи, имеет широкое распространение в полосе с 30 – 300 МГц, но обеспечивает только 760 радиоканалов с амплитудной модуляцией (АМ) и спектральным разносом 25 кГц [3]. Он присутствует во всех режимах VDL, но на первоначальных этапах исследования VDL-4 были обнаружены проблемы с электромагнитной совместимостью при работе бортового и наземного оборудования VDL-4 со штатным оборудованием ОВЧ диапазона воздушных судов и органов обслуживания воздушного движения. Все это приводит к быстрому истощению свободных авиационных радиоканалов, особенно в густонаселенном воздушном пространстве [4].

Поэтому распределенные ресурсы авиационного спектра к 2021-2025 гг. будут недостаточными из-за ожидаемого роста числа самолетов в областях воздушного пространства.

### Система когнитивного радио применимо к БЛА

Еще одной новой тенденцией последних лет является широкое распространение и использование беспилотных летательных аппаратов. Беспилотные летательный аппарат (БЛА) иг-

рают важную роль в социальном, экономическом и авиационном секторах воздушного пространства каждой страны благодаря его вкладу в разведку. Они все чаще используются для гражданских целей, таких как определение погоды, мониторинг стихийных бедствий. В отличие от традиционных пилотируемых самолетов БЛА удаленно пилотируется с помощью беспроводной линии связи между наземной станцией и беспилотником. Безопасная и успешная эксплуатация БЛА заключалась в обмене огромным количеством данных о навигации, проверке работоспособности и управление воздушным движением. Таким образом, БЛА также нуждается в некотором диапазоне спектра.

Крайне важно, чтобы положение дел оставалось неизменным среди существующих полос частот, дабы избежать помех в существующих системах авиационной безопасности. Кроме того, важно управлять ограниченным авиационным спектром с помощью инновационных технологий.

Прежде всего, значительная часть радио спектра остается недостаточно используемой; процент использования даже ниже 10%. Дефицит авиационного спектра полос наиболее наблюдается для связи воздух-земля. Это подчеркивает необходимость отмены статического распределения спектра и использование динамического [5].

### Система когнитивного радио

Система когнитивного радио (CRS) – радиосистема, способная получать сведения об особенностях собственной эксплуатации и на основе этих данных корректировать свои параметры работы (рис.1). Технология когнитивного радио позволяет системам связи выбирать неиспользуемые полосы частот и вещать на них. Это позволяет средствам связи работать в условиях эффективного радиоэлектронного подавления и перенастраивать автоматически приемопередатчики на наименее подавляемые частоты. Это также актуально для сотовой связи, в связи с тем, что в ближайшее время возможен дефицит частот [6],[7].

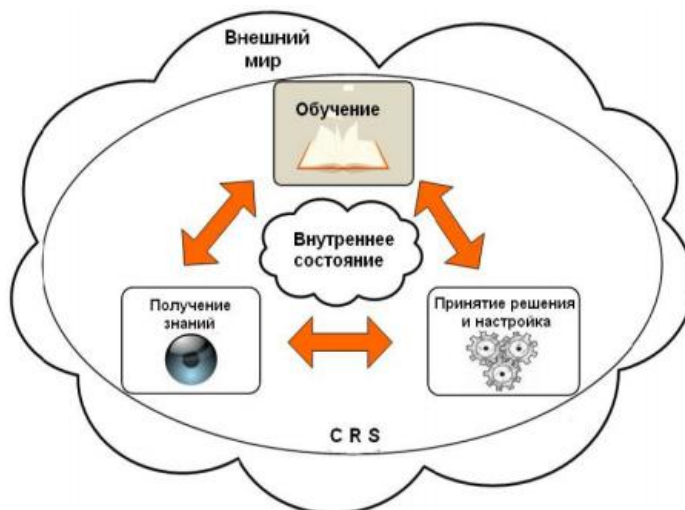
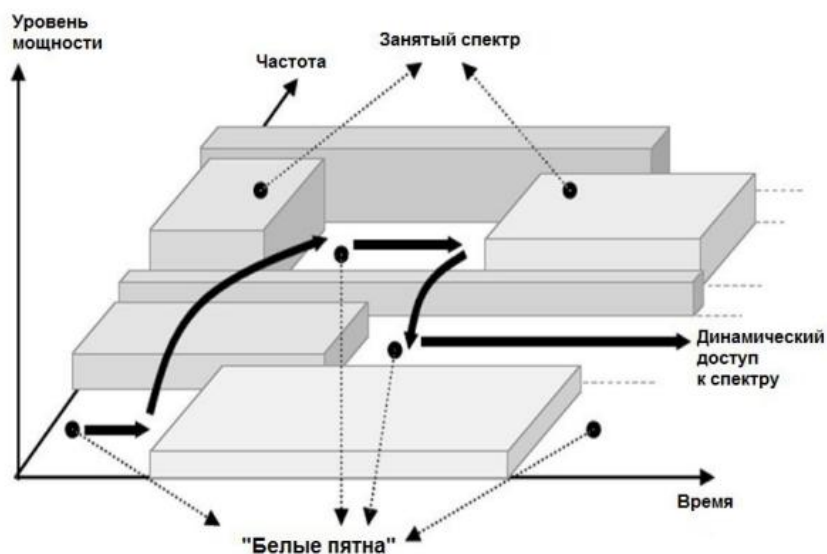


Рисунок 3. Когнитивное радио

Под динамическим доступом к серверу понимается способность временно занимать неиспользуемые спектры частот. Необходимо использование систем мониторинга занятости спектра, которая в данный момент времени находит свободные участки спектра частот или свободные временные позиции в структуре сигнала, излучаемые действующими средствами

связи («белые пятна»), и производит передачу сигналов новым средствам, исключая взаимные помехи [8].



**Рисунок 4. Принцип работы когнитивного радио**

Системы дальней связи транспортной авиации РФ построены с помощью когнитивного радио (CR), когнитивных антенн (СА), малозаметности для радиолокаторов, интегрированной модульной авионики (ИМА), помогающих обеспечивать безотказную работу при наличии отказов во время работы различных модулей (они заменяются на исправные модули без прерывания работы системы).

Когнитивное радио автономно изучает информацию, такую как восприятие радиочастотного (РЧ) спектра, а также поведение пользователя в среде с помощью компьютерного зрения, распознавание и синтез речи. Кроме перечисленных технологий, используются также семантические сети.

В CR можно выделить четыре составляющие:

1. Чувствительность – способ получения информации с помощью:

- мониторинга энергетических возмущений,
- циклоstationарный мониторинг - рукотворные сигналы регулярно повторяются;

2. Распознавание – понимание состояния:

- свободных диапазонов частот,
- свободных временных интервалов,
- коммуникационного этикета.

3. Адаптация – возможность менять частоту, при не доступности диапазона.

4. Взаимодействие - создание двустороннего канала связи и обмен информацией между узлами [9].

### **Уровни взаимодействия**

Во время сеанса связи одновременно несколько обменов информацией происходят на нескольких уровнях стека протокола взаимодействия открытых систем.

На высоком уровне пользователи задают друг другу вопросы, дабы повысить вероятность достижения цели миссии, отвечают на вопросы они с помощью радиостанций. На более низ-

ких уровнях обсуждаются вопросы обеспечения улучшения качества услуг, обмениваясь параметрами канала и качества приема, чтобы улучшить качество связи. Это необходимо для того, чтобы сигналы приходили на ведущую станцию без задержек, сдвигов по частоте и искажений формы сигнала.



Рисунок 5. Уровни взаимодействия когнитивных радиостанций

Тесное взаимодействие физических и канальных уровней предполагает дуплексную работу линии с частотными и временными разделениями. Знания позиций, скоростей движения, параметров канала позволяет сформировать достаточно узкие диаграммы направленности антенн для коротких сеансов связи, чтобы уменьшить уровень шумов и повысить уровень полезного сигнала входа приемника, это увеличивает помехозащищенность и скрытность, пропускную способность системы и робастность систем связи [10].

### Заключение

Когнитивное радио помогает решить проблему отсутствия незанятого частотного спектра, чтобы не нарушать и не прерывать правильную работу системы. Использование взаимодействия физических и канальных уровней позволяет уменьшить уровень шумов, повышает помехозащищенность канала, увеличивает пропускную способность.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №08-08-06041 и №15-07-20095.*

### Библиографический список

1. Национальный аэрокосмический журнал взлет // Воздушный транспорт России – URL: <http://www.take-off.ru/item/4130-vozdushnyj-transport-rossii-2019>

2. Деловой авиационный портал// Авиаперевозка пассажиров за 2019 год– URL: <http://www.ato.ru/press-releases/za-12-mesyacev-2019-goda-rossiyskie-aviakompanii-perevezli-1281-mlnpassazhirov?sea=34772>

3. **Рубцова, Т.А.** Исследование автоматического зависимого наблюдения в режиме вещания и методов борьбы с кибератакам / Рубцова Т.А., Семашко А.В., //Информационные системы и технологии, 2019. стр.1-2

4. Национальная технологическая инициатива// Аэронавигационный комитет союза авиапроизводителей России– URL: <http://nti-aeronet.ru/blog/2019/08/29/ajeronavigacionnyj-komitet-sojuza-aviaproizvoditelej-rossii-o-standarte-vdl-4/>

5. **В. Kamali**, “An overview of VHF civil radio network and the resolution of spectrum depletion,” in Proc. IEEEIntegr. Commun. Navigat. Surveill. конференц. (ICNS), май 2010, стр. 4-8.

6. N+1// Новый российский бомбардировщик получит когнитивное радио– URL: <https://nplus1.ru/news/2015/07/13/radio>

7. Википедия// Когнитивное радио– URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE)

8. **Снопко, К.А.**, Интегрированная система сотовой связи и передачи данных на основе когнитивного радио / К.А. Снопко. - М., 2014.

9. Астрософт // SDR, когнитивное радио и SCA применительно к системам связи, РЛС и системам радиоэлектронной разведки– URL: <https://www.astrosoft.ru/articles/radar/sdr-kognitivnoe-radio-i-sca-primenitelno-k-sistemam-svyazi-rls-i-sistemam-radioelektronnoy-razvedki/>

10. **Joseph Mitola**. Cognitive radio architecture : the engineering foundations of radio XML / by Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. 488 p. (Джозеф Митола. Архитектура когнитивного радио: инженерные основы радио XML).

**T.A. Rubtsova, A.V. Semashko**

## **RESEARCH OF THE COGNITIVE SYSTEM OF AERONAUTICAL COMMUNICATIONS AND LEVELS OF INTERACTION OF COGNITIVE RADASTATIONS**

Nizhny Novgorod state technical university R.E. Alekseeva

With increasing demand, the aviation spectrum will be congested. However, studies have shown that the aeronautical spectrum is underutilized due to the static spectrum allocation strategy. Aeronautical communication systems such as air-to-air and air-to-ground, wireless avionics, intercom, can greatly benefit from dynamic spectrum access. The use of dynamic spectrum access in some cases can be considered an effective solution. Spectrum management requires innovative methods using cognitive radio.

**Keywords:** CRS, cognitive radio system, CA, radio frequency spectrum



М.Е. Сеницына, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В докладе описываются методы идентификации личности человека с использованием сверточных нейронных сетей. Приведена архитектура нейронной сети LaNet.

**Ключевые слова:** сверточные нейронные сети, маска, градиентный спуск, функция потерь.

### Введение

В современном мире, пронизанном технологиями и различными гаджетами для улучшения качества жизни, человек думает о разных ее сферах: науке, безопасности, здравоохранении, быте и многом другом. Человечество придумывает и изобретает все более совершенные решения для упрощения своей работы.

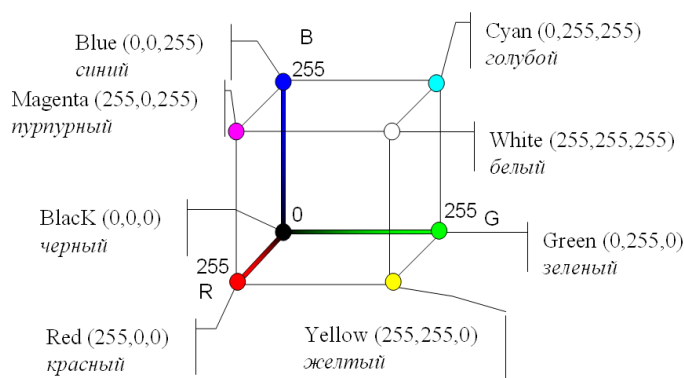
Вопрос идентификации личности человека по биометрии весьма актуален в настоящее время. Данные технологии используются для обеспечения безопасности, охраны правопорядка, для ведения электронного бизнеса, для безопасности в банковской сфере, сфере розничной торговли, социальных услуг, для доступа к рабочим местам, защиты личной информации и др.

Биометрический способ идентификации человека основан на его уникальных физиологических или поведенческих характеристиках. Одними из самых распространенных видов идентификации указанного типа являются дактилоскопия, аутентификация радужной оболочки глаза, идентификация по сетчатке глаза, распознавание голоса, сканирование геометрии лица. Именно на сканировании геометрии лица будет сделан акцент в этой работе.

Для осуществления задачи распознавания лиц будут использованы сверточные нейронные сети, одни из самых влиятельных инноваций в области компьютерного зрения. С помощью этих технологий можно обрабатывать и анализировать большое количество данных как в дискретном представлении, так и в аналоговом. Большие мощности, способность к обучению и совершенствованию привело к большому распространению нейронных сетей данного типа.

### Представление изображений для машинного распознавания

Как правило, изображение человека для машинного распознавания геометрии лица получается с веб-камеры. Указанное изображение представлено в цветовой модели RGB, то есть цвет каждого пикселя изображения закодирован с помощью трёх чисел - составляющих красного, зелёного и синего цветов. Схематично модель RGB может быть представлена в виде трехмерного куба, по осям которого задаются значения вышеуказанных цветов (от 0 до 255) (рис. 1).



**Рисунок 1**

В основании куба заложен черный цвет, характеризующийся нулевыми значениями составляющих. На противоположной вершине куба расположена точка, означающая белый цвет (при котором значения всех составляющих максимальны). Любая точка внутри куба характеризуется своим цветом и имеет вполне определенные значения составляющих.

Для машинного распознавания получаемое изображение может быть представлено в виде 3-х двумерных массивов. Каждый массив создается под хранение определенных числовых значений для каждого пикселя изображения. Соответственно, один двумерный массив для хранения значений красного цвета пикселей, один для значений зеленого и один для синего цветов.

Полученные двумерные массивы для удобства машинного распознавания могут объединяться в многомерные структуры и подаваться на вход распознающего механизма – нейронной сети.

### Структура сверточных сетей

Под искусственной нейронной сетью в широком смысле понимается математическая модель, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей - сетей нервных клеток живого организма. Данная математическая модель может иметь аппаратную или программную реализацию. Сверточная нейронная сеть представляет собой специальную архитектуру искусственных нейронных сетей, нацеленную на эффективное распознавание образов.

В соответствии с изложенным, при получении изображения с веб-камеры компьютер формирует из него массив пикселей. В зависимости от разрешения и объема изображения размер массива может быть разным. При разрешении изображения  $32 \times 32 \times 3$  (где 3 – это значения каналов RGB) размер массива будет  $32 \times 32 \times 3 = 3072$ . Каждому из этих чисел присваивается значение от 0 до 255, которое описывает интенсивность пикселя в этой точке. С таким изображением может работать полносвязная нейронная сеть. Если же изображение имеет большее разрешение, то эффективнее использовать сверточную нейронную сеть. Например, цветное изображение в формате JPG, размер которого  $480 \times 480$  пикселей, потребует размера массива  $480 \times 480 \times 3 = 691200$ . При использовании полносвязной нейронной сети для распознавания данного изображения понадобится большое количество нейронов, количество весов сети будет стремительно расти, что приведет к чрезмерной полносвязности и переобученности сети в силу наличия большого количества параметров. Сверточные нейронные сети образуют более чувствительную архитектуру к подобному типу данных. В частности, в отличие от обычных нейронных сетей, слои в сверточной нейронной сети располагают нейроны в

3 измерениях – ширине, высоте, глубине. Слово «глубина» относится к 3-му измерению активационных нейронов, а не глубине самой нейронной сети, измеряемой в количестве слоёв.

Сверточные нейронные сети состоят из слоев, где каждый слой преобразует одно представление в другое с использованием некой дифференцируемой функции. Как правило, выделяют три главных типа слоёв для построения свёрточных нейронных сетей: свёрточный слой, слой подвыборки и полносвязный слой. Свёрточный слой является основным слоем при построении свёрточных нейронных сетей. В его основе лежит понятие «свёртки».

Рассмотрим работу свёртки на примере некоторого изображения, состоящего из одного канала, имеющего размер 5x5 и содержащего некоторые целые числа. Стоит отметить, что свёртка хорошо работает не только с изображениями, но и с другими структурами данных. В рассматриваемом примере для свертки исходного изображения выберем некоторую маску – двумерный массив: (1 0 -1); (0 1 0); (-1 0 1). В качестве элементов массива могут быть выбраны любые числа. Эта маска называется «ядром свёртки». Далее исходное изображение увеличивается за счет добавления нулей по его краям. Данные нули называются «отступ» (padding). На следующем шаге выбранная маска прикладывается к некоторой позиции в изображении (рис.2).

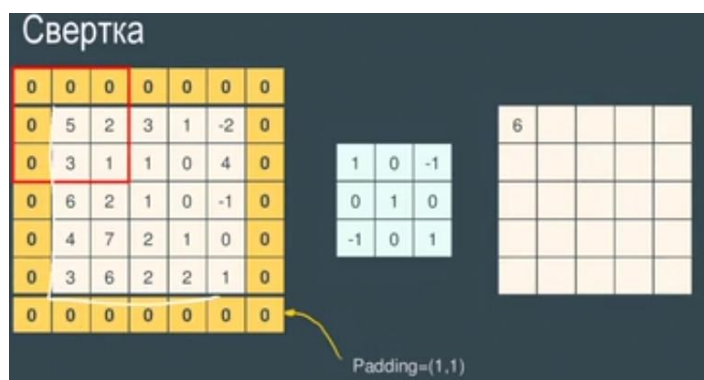


Рисунок 2

Далее осуществляются операции перемножения коэффициентов из маски со значениями пикселей на изображении, и их складывание. Полученный результат заносится в соответствующую позицию выходного слоя. В рассматриваемом примере, в качестве результата получена цифра «6». На следующем шаге описанная операция повторяется в отношении следующей позиции, то есть со сдвигом маски на один пиксель вправо. При подсчете суммы произведений значений исходного изображения и выбранной маски в рассматриваемом примере в результате получается цифра «0». Паддинг делается для того, чтобы левый верхний пиксель результата соответствовал левому верхнему пикселю входного изображения. Если данный отступ не делать, то максимальное изображение, которое получается в результате операции свёртки - 3 на 3. После подсчета первого ряда осуществляется переход на ряд ниже. Повторяем описанные операции для каждого последующего элемента в каждом ряду. Итоговый результат работы свёртки с выбранным ядром по отношению к исходному изображению с паддингом «1» представлен на рис.3. В ходе анализа можно сделать вывод, что получившийся результат не совпадает с исходным изображением, но при этом у него такой же размер.

6	0	2	4	-2
3	-2	0	3	5
12	1	-4	-5	-2
8	11	0	2	-2
-4	8	8	4	2

Рисунок 3

Стоит отметить, что у свёртки можно задавать шаг («stride»), например не «один», а «два» (рис.4). В данном случае получится несколько другой результат (рис.5). Результирующее изображение получается меньше, чем исходное. В ходе свертки пропускаются вторые и четвёртые строки и ряды исходного изображения. Если к рассматриваемому изображению применить свертку с шагом равным «3», то в ходе операции будет получена цифра «6», затем «4». Следующий шаг приводит к выходу за границу исходного изображения, поэтому вместо этого осуществляется переход к следующему ряду. Однако, так как шаг равен «3», то пропускается два ряда, и расчет осуществляется с первого элемента третьего ряда. На данном этапе при свертке получается значение «8». Далее осуществляется сдвиг на три элемента в текущем ряду и получается цифра «2».

Свертка

0	0	0	0	0	0	0
0	5	2	3	1	-2	0
0	3	1	1	0	4	0
0	6	2	1	0	-1	0
0	4	7	2	1	0	0
0	3	6	2	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0

1	0	-1
0	1	0
-1	0	1

Рисунок 4

6	2	-2
12	-4	-2
-4	8	2

Рисунок 5

Однако реальные изображения, как правило, трёхканальные, а именно: в них есть красный, синий и зелёный цвет. Для каждого из этих цветов есть некоторая матрица, которая описывает уровень зелёного, красного и синего цвета в каждом пикселе. В случае с трёхканальными изображениями в качестве ядра свёртки выступает трёхмерная таблица. Для каждого канала это такая же таблица, как в рассмотренном выше примере, но для каждого канала эти различные таблицы продублированы. Стоит отметить, что все эти таблицы для каждо-

го канала могут быть разными. Например, на синем канале задать следующие значения: (1 0 -1); (0 1 0); (-1 0 1), а для красного канала - нули. Соответственно, для каждого цвета маски могут отличаться. В этом случае берется трёхмерная таблица и прикладывается к какому-либо месту исходного изображения. И дальше повторяется алгоритм, описанный ранее. Так работает один фильтр в свёрточном слое. Но в свёрточном слое может быть много фильтров. При использовании следующего фильтра берется тот же вход, но совсем другой фильтр и другое значение смещения. И повторяется тот же алгоритм.

Для решения задачи распознавания изображения нейронная сеть будет состоять из нескольких скрытых свёрточных слоев и нескольких полносвязных слоев на базе архитектуры LaNet (рис. 6).

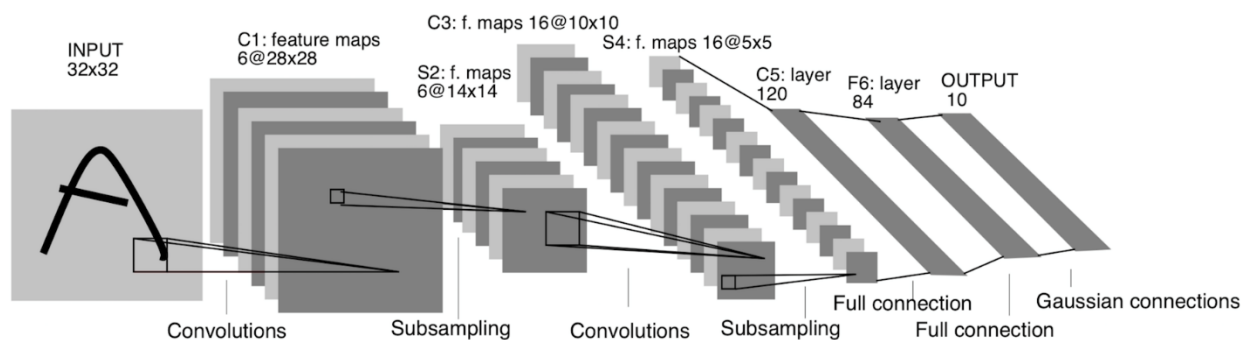


Рисунок 6

### Обучение нейронной сети

Обучение нейронной сети будет проводиться с помощью одного из самых популярных алгоритмов – градиентного спуска.

Градиентный спуск – метод нахождения минимального значения функции потерь (существует множество видов этой функции). Минимизация любой функции означает поиск самой глубокой впадины в этой функции. Функция используется для осуществления контроля ошибок в прогнозах модели машинного обучения. Поиск минимума означает получение наименьшей возможной ошибки или повышение точности модели. Можно увеличить точность, перебирая набор учебных данных при настройке параметров нашей модели (весов и смещений).

Математически функция потерь, по которой происходит обучение нейронной сети, выглядит следующим образом:

$$\nabla f = \left[ \frac{\partial f}{\partial w_0}, \frac{\partial f}{\partial w_1}, \frac{\partial f}{\partial w_2} \dots \frac{\partial f}{\partial w_n} \right],$$

$$w^1 = w^0 - \alpha \nabla f(w^1)$$

$$w^2 = w^1 - \alpha \nabla f(w^2) \quad ,$$

$$w^3 = w^2 - \alpha \nabla f(w^3)$$

$$w^{t+1} = w^t - \alpha \nabla f(w^{t+1})$$

где  $\alpha$  – коэффициент скорости обучения;  $\nabla f$  – градиент функции потерь;  $w$  – веса нейронной сети.

## Заключение

Нейронные сети достигли высокого уровня в распознавании образов. Их способность к обучению позволяет все более точно распознавать объекты на изображении. Это приводит к повышению удобства идентификации личности человека. Все больше сфер жизни прибегают к решению данных проблем именно с помощью сверточных нейронных сетей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

## Библиографический список

1. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е издание, пер. с англ. - Издательский дом "Вильямс", 2006. –1104 с.
2. **Форсайт, Д.** Компьютерное зрение. Современный подход; пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. - 928 с.
3. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. - М. : Издательский дом "Вильямс", 2001. с.

**M.E. Sinitsina, V. E. Gai**

## **A SOFTWARE SYSTEM TO IDENTIFY A PERSON BY FACIAL IMAGE**

Nizhny Novgorod technical University. R. E. Alekseev

The report describes personal identification system methods using convolutional neural net. The architecture of LaNet neural network is presented.

**Keywords:** convolutional neural net, mask, gradient descent, loss functions.

С.С. Скорынин

## ОБЪЕДИНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ И ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ ПАТЕНТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе рассмотрена объединенная модель текстовых данных, состоящая из подстрок, метрики TF-IDF и модели, основанной на когнитивном подходе и теории прототипов. Осуществлено тестирование моделей для различных текстов патентов и сделан сравнительный анализ полученных результатов. Показаны достоинства и перспективы предложенного подхода.

**Ключевые слова:** классификация, текстовые данные, когнитивная семантика, WordNet, патенты, бэггинг, подстроки, TF-IDF

### Введение

Развитие современных технологий привели к информационному взрыву – многократному увеличению объемов создаваемой и используемой информации (с каждым годом количество информации увеличивается экспоненциально [1]), включая текстовые данные. Во многих задачах возникает проблема представления текстов и от выбора соответствующей модели зависит итоговый результат. Таким образом, этап моделирования текстовых данных продолжает оставаться актуальным для исследования.

Классификация текстовых данных – задача разделения текстов на естественном языке по тематическим классам из заранее определенной выборки. Однако, понятие семантики документа является неоднозначным, следовательно, и понятие категоризация текстов, тоже не может быть определено однозначно. Например, классификатору или эксперту легко различить тексты из различных категорий, но они могут ошибиться в разделении текстов из смежных областей. Чтобы решить данную задачу предлагается использовать сразу несколько моделей представления текста. Основная идея заключается в том, что при правильном сочетании моделей и использовании ансамблевых методов: бэггинга, бустинга и стекинга [2] можно охватить различные характеристики текста и повысить итоговое качество классификации. При объединении моделей предлагается применять весовые коэффициенты, чтобы в полной мере использовать подходящие модели и в меньшей степени нежелательные. Настраиваемая модель позволяет не только наилучшим образом отразить исследуемые тексты, но и учесть многие дополнительные условия самой задачи. К таким условиям могут относиться: особенности рассматриваемых текстов, требования к быстродействию или точности результата и т.п. Объединение лингвистических и статистических подходов позволяет учитывать, различные характеристики текста [3,4,5].

В рамках классификации текстов можно выделить задачу классификации патентов, они относятся к научным текстам и имеют свои особенности: четкую структуру (библиографические данные, название; описание изобретения, формула изобретения, чертежи; реферат), на-

учный стиль изложения; широкое употребление штампов и клише, наличие большого числа синонимов, наличие большого числа многозначных слов, широкое употребление архаизмов и канцеляризмов и другие. В зависимости от задачи, может моделироваться как весь текст, так и отдельные его части. Например, Ларки индексировал только заголовок, аннотацию, первые двадцать строк описания и раздел, описывающий новизну изобретения [6]. Этот подход возможен при наличии знаний о структуре классифицируемого документа (что не всегда возможно). В противном случае определение признаков, характеризующих документы, становится довольно сложной задачей, но ее может решить объединенная модель, т.к. она охватывает различные характеристики текстовых данных.

### Объединенная модель текстовых данных

Предложенная объединенная модель состоит из следующих, перечисленных далее компонентов.

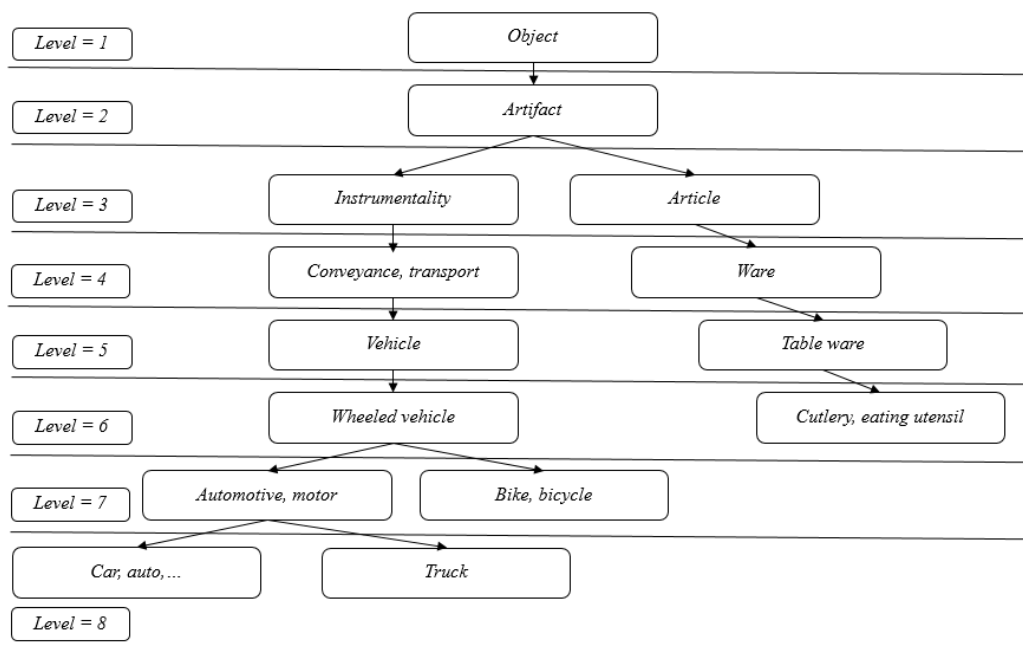
1. *Лингвистическая модель, основанная на когнитивном подходе и теории прототипов.* С точки зрения формального подхода, язык может порождаться на основе алгоритмических процедур, а идея когнитивной лингвистики, наоборот, заключается в том, что основные свойства естественного языка существенно связаны с телесной природой человека, а также его физическим и социальным опытом. С точки зрения когнитивной семантики и теории прототипов, категоризация, объединяет предметы действительности на основе естественной логики, но не формальной. Когнитивный подход рассматривает проблему категоризации следующим образом [7]:

- в классах существуют прототипы, то есть структура многих естественных классов не является однородной. В них присутствуют наиболее репрезентативные члены. Они являются лучшими представителями по сравнению с остальными;
- существует базовый уровень категоризации, который находится в середине иерархии «общего-конкретного». Обобщение происходит вверх от базового уровня, специализация – вниз. Пример: собака – базовая категория, хищник – обобщение, овчарка – специализация. Базовый уровень является промежуточным уровнем концептуальной организации. также существуют концепты базового уровня для действий и свойств (бег, еда, относятся к базовому уровню, а движение и глотание – к вышестоящему уровню).

WordNet - это лексическая база данных, которая доступна в интернете и предоставляет большое хранилище английских лексических элементов. Будем использовать WordNet для поиска базового уровня в тексте. Для этого анализируем каждое слово и ищем соответствующие в иерархии нужного уровня. Уровень определяется количеством слов от корневого узла. Таким образом, подающейся на вход текст приводится к определенному уровню слов в иерархии WordNet (рисунок).

Прежде чем строить иерархию, нужно решить задачу определения части речи и разрешения многозначности слов. Для определения части речи используем алгоритм Эрика Брилла [8]. Для разрешения лексической многозначности применяется алгоритм Майкл Леска [9]. На следующем этапе строится иерархия гиперонимов для каждого слова. Потом исходный текст приводится к необходимому уровню иерархии. Для полученного текста строится модель (TF-IDF или подстрок) и осуществляется классификация методом ближайшего соседа (kNN) [10].





Уровни слов в иерархии WordNet

**2. Статистическая модель, основанная на подстроках.** Модель на основе подстрок базируется на  $N$ -граммах. Откажемся от ограничения в виде величины  $N$  и сделаем это значение различным. Моделирование осуществляется на основе подпоследовательности элементов, где значение  $N$  не фиксировано. Для текущей конфигурации минимальная длина подстроки равна 2, а максимальная 5. Более подробно описано в [11].

**3. Статистическая модель, основанная на TF-IDF метрике.**

Данная статистическая мера, используемая для оценки важности слова в контексте документа, являющегося частью коллекции документов. Вес некоторого слова пропорционален количеству употребления этого слова в документе, и обратно пропорционален частоте употребления слова в других документах коллекции. TF-IDF мера вычисляется как:

$$w_{ij} = TF(\tau_i, d_j) * IDF(\tau_i, D) \quad (1)$$

где  $TF(t,d)$  – частотная характеристика термина в пределах одного документа.

$$tf(t,d) = \frac{n_i}{\sum_k n_k} \quad (2)$$

Здесь  $n_i$  – число вхождений термина в текст,  $\sum_k n_k$  – количество слов в тексте

$IDF(t,D)$  – обратная частота документа. Данное значение определяется как инверсия частоты употребления термина в других документах коллекции.

$$idf(t,D) = \log \frac{|D|}{|d_i \supset t_i|} \quad (3)$$

Здесь  $|D|$  – количество документов в коллекции,  $|d_i \supset t_i|$  – количество документов, в которых термин присутствует [12].

Итоговая модель классификации строится на основе объединения трех вышеперечисленных моделей с учетом весовых коэффициентов. Блок принятия решений принимает решение о классификации с учетом всех параметров и присвоением весовых коэффициентов. Классификация текстов осуществляется на основе метода ближайшего соседа.

## Исследование результатов работы объединенной модели

Для подтверждения эффективности предложенной объединенной модели текстовых структур в задачах классификации были рассмотрены тексты патентов на английском языке из различных (4 класса) и смежных категорий (4 класса). Рассматривались обучающие и тестовые наборы по 100 текстов для каждой категории. Эффективность моделей оценивалась по точности, полноте и F-мере. Качество классификации для различных категорий и текстов патентов из смежных категорий представлены в табл. 1 и табл. 2 соответственно.

Таблица 1

Качество классификации моделей для текстов патентов различных категорий

Тип текста	Модель	Качество классификации		
		F-мера	Точность	Полнота
Патенты	TF-IDF	0,63	0,67	0,6
	Substring	0,6	0,64	0,55
Патенты с применением лингвистической модели	TF-IDF	0,86	0,88	0,85
	Substring	0,55	0,55	0,55

Таблица 2

Качество классификации моделей для текстов патентов смежных категорий

Тип текста	Модель	Качество классификации		
		F-мера	Точность	Полнота
Патенты смежные	TF-IDF	0,48	0,47	0,5
	Substring	0,37	0,35	0,4
Патенты смежные с применением лингвистической модели	TF-IDF	0,66	0,675	0,65
	Substring	-	-	-

Анализируя результаты, можно отметить, что модели для патентов из различных категорий показали хорошие результаты. Качество классификации в среднем около 60% по F-мере. С применением модели на основе онтологий повышается качество классификации по метрике TF-IDF в среднем на 10-15 процентов (в некоторых текстах она не влияет на итоговый результат вообще). Такая разница по F-мере зависит от уровня слов текста в иерархии. Если автор использует абстрактные слова (более высокий уровень иерархии), то предложенный метод будет менее эффективен, по сравнению с более низким уровнем иерархии WordNet. Однако лингвистическая модель не работает для подстрок. Тестирование показало, что качество классификации не повышается или даже снижается на 5-10 %. Следовательно, лингвистическая модель подходит только для метрики TF-IDF. Для смежных категорий видим, что качество классификации заметно ухудшается и в целом можно отметить, что модели не способны осуществить классификацию. По F-мере для TF-IDF качество классификации ухудшилось в среднем на 15%, а для подстрок на 23%.

Объединённые модели классификации для текстов патентов с весовыми коэффициентами и без них представлены в табл. 3.

Качество классификации объединённой модели

Тип текста	Модель	Качество классификации		
		F-мера	Точность	Полнота
Патенты	Union (1*TF-IDF +1*Substring)	0,81	0,83	0,8
	Union (0,4*TF-IDF + 1* Substring)	0,87	0,87	0,87
Патенты смежные	Union (1*TF +1*Substring)	0,66	0,73	0,6
	Union (1*TF-IDF + 0,75* Substring)	0,71	0,78	0,65

Можно отметить, что качество классификации в обоих случаях увеличилась в среднем на 15-20% по сравнению с отдельными моделями без применения лингвистической составляющей. Для смежных категорий качество классификации равно 66% и теперь ее можно использовать для классификации. При введении этапа калибровки (введение весовых коэффициентов), F- мера также увеличилась на 5-6%. Самое высокое качество классификации, получилось при следующей конфигурации весовых коэффициентов. Для различных категорий: подстроки – 1, TF-IDF с применением лингвистической моделью – 0,4. Для смежных категорий: подстроки – 0,75, TF-IDF с применением лингвистической модели – 1. Это объясняется тем, что модели работают по-разному в зависимости от исходных текстов, требований и условий. Для достижения наилучших результатов необходим этап калибровки объединенной модели. Однако этот этап снижает универсальность системы, так как модель обучается для узконаправленного набора текстов. Для дальнейшего повышения качества классификации необходимо добавлять другие модели, у которых эффективность сопоставима с представленными моделями или выше.

Таким образом, если сравнивать лучший результат объединённой модели с каждой из моделей по отдельности, то качество классификации по F-мере увеличилось в среднем на 20-30%. Значение точности говорит о том, что при использовании итоговой модели увеличивается число правильно классифицированных документов. Значение полноты говорит о том, что количество ошибок классификации уменьшилось. При добавлении модели в объединенную необходимо тщательно исследовать ее поведение при различных сценариях работы, а также влиянии на другие.

### Заключение

В работе рассмотрена объединенная модель текстовых данных на основе статистических и лингвистических моделей. Рассмотрены конкретные модификации представленной модели и их влияние на итоговое качество классификации. Качество классификации оценивалось по точности, полноте и F- мере. Показаны преимущества и ограничения предложенной объединенной модели при классификации текстов патентов как в смежных, так и в различных категориях. Для повышений эффективности классификации предложенной системы представляется перспективным привлечение новых моделей с последующим детальным исследованием.

Для каждой модели должна быть определена область применения (то есть, для каких задач и типов текстов она подходит). Как показало тестирование, если одна из моделей показывает хорошее качество классификации, а другие нет, то итоговое решение может быть ниже или незначительно выше. В данном случае нужно переопределять весовой коэффициент или вообще исключать из итоговой модели.

Таким образом, при добавлении модели в обобщенную необходимо тщательно исследовать ее поведение при различных сценариях работы. На основе анализа полученных результатов, необходимо правильно задавать весовой коэффициент в блоке принятия решений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-20720.*

### Библиографический список

1. Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical. Don't Focus on Big Data; Focus on the Data That's Big. David Reinsel John Gantz John Rydning | April 2017. An IDC White Paper, Sponsored by Seagate
2. **Rokach, L.** Ensemble-based classifiers // Artificial Intelligence Review. – 2010. – Т. 33, вып. 1–2.
3. **Berry, M.W.**, Kogan J. Text Mining. Applications and Theory. - Wiley. - 2010. - 207 p.
4. **Feldman, R.**, Sanger J. The text mining handbook. Advanced Approaches in Analyzing Unstructured Data. - Cambridge University Press. -2007. - 410 p.
5. **Lomakina, L. S.**, Surkova A. S., Zhevnerchuk D. V., Chernobaev I. D. Text structures synthesis on the basis of their system-forming characteristics // IV International Research Conference "Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine" (ITSMSSM2017). Advances in Computer Science Research (ACSR). 2017. vol. 72. pp. 108-113
6. **Larkey, L.S.** A patent search and classification system / L.S. Larkey // Proceedings of DL-99, 4th ACM Conference on Digital Libraries. – 1999. P. 179–187.
7. **Lakoff, George.** 1987. Women, Fire, and Dangerous Things. What Categories Reveal about the Mind. Chicago: University of Chicago Press.
8. **Eric Brill.** 1992. A simple rule-based part of speech tagger. In Proceedings of the third conference on Applied natural language processing (ANLC '92). Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, 152-155.
9. **Lesk, Michael.** Automatic Sense Disambiguation Using Machine Readable Dictionaries: How to Tell a Pine Cone from an Ice Cream Cone // Proceedings of the 5th Annual International Conference on Systems Documentation. – 1986. – С. 24-26.
10. **Anna Surkova**, Sergey Skorynin, Igor Chernobaev Word embedding and cognitive linguistic models in text classification tasks. // CSIS'2019: Proceedings of the XI International Scientific Conference Communicative Strategies of the Information Society. 2019. Article No.: 12 P.1–6.
11. **Суркова, А.С.** Моделирование текстов на основе энтропийных характеристик в задачах классификации / А.С. Суркова, С.С. Скорынин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта (Вестник ВГАВТ), 2016, №4 (49), с. 54-61.
12. **Jones, K. S.** A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval (англ.) // Journal of Documentation : журнал. – MCB University: MCB University Press, 2004. – Vol. 60, no. 5. – P. 493-502.

**S.S. Skorynin**

**UNIFIED MODEL BASED ON STATISTICAL AND LINGUISTIC APPROACH  
IN THE PATENT TEXT CLASSIFICATION TASKS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Abstract:** the paper is considering a unified text model consisting of substrings, tf-idf measure and model based on the cognitive approach and prototype theory. Models testing and comparative analysis for patent texts are given. The advantages and future perspectives of the proposed model are analyzed.

**Keywords:** classification, text data, cognitive semantics, WordNet, patents, bagging, substrings, TF-IDF

С.А. Стеклов, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ГОЛОСОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена исследованию технологий голосового управления мобильным роботом и обработке речи в целом. Создание подобных систем достаточно актуальное направление в сфере развития информационных технологий. В данной работе рассматривается подход к решению задачи на основе программы распознавания голоса.

**Ключевые слова:** голосовое управление, управление роботом, распознавание речи.

### Введение

Голосовое управление – способ взаимодействия с устройством при помощи голоса. Считается, что это следующая стадия управления техникой, после сенсорного ввода информации. Преимуществами голосового управления можно считать возможность удаленного и интерактивного взаимодействия с устройством, а также отсутствие с ним тактильного контакта.

Области применения систем голосового управления:

- Автоматизированные обслуживающие устройства. Более старые устройства и интерактивные системы голосового ответа могут реагировать на нажатие кнопок клавиатуры с помощью тонов DTMF, но те, которые имеют полный голосовой пользовательский интерфейс, позволяют абонентам говорить запросы и ответы без необходимости нажимать какие-либо кнопки. Более новые системы голосового управления «дикторнезависимы», поэтому они могут реагировать на несколько голосов, независимо от акцента или диалекта. Они также способны отвечать на несколько команд одновременно, разделяя голосовые сообщения и обеспечивая соответствующую обратную связь.

- Автомобили, управляемые вручную, пытаются усовершенствовать, внедряя «умную» электронику, для упрощения управления с помощью подачи голосовых команд. Также системы голосового управления используются в разработке беспилотных автомобилей, например возможность вызова машины, дистанционного управления, выбора маршрута и т.п.

- Система «умный дом». Управление на расстоянии бытовой техникой и другими системами домашней автоматизации, такими как, например, включение и отключение света, розеток, чайника или утюга, и т.п.

- Повсеместная встраиваемость голосового помощника в различные мобильные устройства. Это включает в себя базовые функции управления устройством: как контроль и изменение функций телефона или планшета, установка будильника и напоминания, создание заметки, отправка СМС, осуществление исходящего вызова, проигрывание музыки, так и поиск информации в интернете.

## Общая структура голосового интерфейса

Можно рассматривать общую структуру голосовых интерфейсов через три основные составляющие:

- 1) система распознавания речи. Компьютеры не способны понять человеческую речь в той форме, в которой ее понимают люди. Для этого существуют системы, которые позволяют преобразовывать слитную проблемно-ориентированную человеческую речь в компьютерную форму (ввод звуковой информации в систему и преобразование ее в текст);
- 2) событийная система обработки данных. Система обрабатывает полученные от системы распознавания речи входные данные. Непосредственное ядро всей структуры, именно эта часть отвечает за все действия, совершаемые устройством. Подобные системы могут быть абсолютно разными, от простых чат-ботов до полноценных голосовых помощников (обработка текстовой информации, выполнение каких-либо действий, формирование ответа);
- 3) система синтеза речи. Синтез речи – это технология, которая дает возможность воспроизвести текст, как можно более похожим естественным человеческим голосом (преобразование текстовой информации в звуковую с последующим выводом на устройства воспроизведения звука).

## Обзор систем распознавания речи

CMU Sphinx – это система распознавания речи, созданная разработчиками из университета Карнеги-Меллон и состоящая из различных модулей для извлечения речевых признаков, распознавания речи и обучения такому распознаванию. CMU Sphinx использует скрытые марковские модели на акустико-фонетическом уровне распознавания и статистические N-граммные модели на лингвистическом уровне распознавания. Из минусов использования данной системы можно выделить низкую точность и скорость распознавания слитной речи. Плюсы: при небольших словарях система быстро и точно распознает отдельные слова, небольшое потребление ресурсов системы, не требуется подключение к интернету.

Kaldi – это набор инструментов для распознавания речи с открытым исходным кодом, написанный на языке C++ для распознавания речи и обработки сигналов, свободно доступный под лицензией Apache2.0. Это программное обеспечение, которое является гибким и расширяемым, предназначено для использования исследователями автоматического распознавания речи (ASR) для построения системы распознавания.

Google Cloud Speech API – облачная технология распознавания речи и синтеза речи. Сервис позволяет распознать, озвучить или перевести любой текст на многих языках. Преимуществом системы является то, что все вычисления выполняются на удаленном сервере, что позволяет снизить нагрузку на локальное устройство. Из минусов можно выделить необходимость в постоянном интернет соединении с сервером, задержки в получении ответа, а также наличие тарифного плана на работу сервиса.

Yandex. Speech Kit – облачная технология распознавания речи и синтеза речи от российской компании Яндекс. Практически все то же самое, что и у Google. Минусы: меньшее количество распознаваемых языков – всего три (русский, английский и турецкий), отсутствие возможности перевода. Плюсы: более точное распознавание речи и более приятный на слух ее синтез, а также менее агрессивная ценовая политика.

## Предлагаемая схема работы системы голосового управления роботом (рисунок)



### Цикл работы системы

1. Ожидание команды. Несмотря на то, что облачные системы способны куда лучше распознавать голос, постоянное их использование довольно ресурсозатратно и долго. Поэтому предлагается для постоянной прослушки и активации интерфейса использовать оффлайн утилиты, вроде CMU Sphinx или Kaldi. Они не будут сильно нагружать систему, а точности их распознавания будет вполне достаточно.

2. При получении служебной команды система сразу ее исполняет. Например, при получении команды «стоп» система прекратит текущее выполняемое действие и вернется к прослушке поступаемых аудиоданных.

3. При получении кодового слова запроса будет записан непосредственно запрос от пользователя, который целесообразно распознавать с помощью облачных технологий, поскольку они куда точнее и быстрее распознают сложные предложения.

4. После получения информации с облака она обрабатывается, выполняются необходимые действия и готовится ответ для пользователя, который в виде текста отправляется на сервер, синтезируется в речь, и отправляется обратно на локальное устройство.

### Общие проблемы голосовых интерфейсов

Перечислим основные проблемы, которые возникли перед разработчиками систем речевых технологий.

- Невозможность полностью подавить внешний шум. Системы очень чувствительны к шуму окружающей среды. И любые внешние помехи препятствуют правильному распознаванию речи.

- Поскольку сама система распознавания речи – это сложный процесс согласования данных, то любая, даже незначительная ошибка, может привести к получению неверного результата.

- Чувствительность систем к речевым оборотам диктора. От дикции человека зависит очень многое, но так как система направлена на широкое использование, то функционал программы, отвечающий за распознавание речи, должен быть очень гибким.



- Ограниченный функционал систем. Невозможно написать программу, которая могла бы решить все проблемы. Даже в сложных и дорогих системах никогда нельзя продумать до конца, как с ней может взаимодействовать пользователь.

## Заключение

Работа посвящена обзору технологий распознавания речи и разработке системы голосового управления робота. Были рассмотрены современные технологии распознавания и синтеза речи. Рассмотрена структура программной системы голосового управления мобильным роботом.

Мною был настроен модуль CMU Sphinx, написана программа на языке Python 3, схема которой была описана ранее.

Касательно непосредственно технологий распознавания речи, CMU Sphinx, при его настройке на распознавание отдельных команд, с задачей справляется достаточно хорошо, команды распознаются с расстояния до 1 метра с посредственным микрофоном, результат можно улучшить заменой микрофона более качественным. Yandex Speech Kit работает без нареканий, даже сложные предложения распознаются практически безупречно, речь синтезируется достаточно хорошо, есть возможность настраивать интонацию и ударения слов, звучание больше похоже на человеческий голос, чем монотонное звучание синтеза речи Google.

Системы для управления голосом специализированных средств, таких как умный дом, мобильный робот-помощник и другие, не являются универсальными. Однако интерес к новым технологиям возрастает, появляются возможности управления различными устройствами посредством мобильной связи, bluetooth технологий. Использование технологий голосового управления, ориентированного на конкретного пользователя, позволит в итоге улучшить качество бытовой жизни.

## Библиографический список

1. **Петрушенко, А. А.** Речевые технологии – следующий уровень сервиса / А.А. Петрушенко, Р.В. Петрушенко // Технические науки в России и за рубежом: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Москва, январь 2016 г.). – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 6-8. – URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/164/9303/>
2. **Беленко, М.В., Балакшин П.В.** Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым кодом / <https://research-journal.org/technical/sravnitelnyj-analiz-sistem-raspoznavaniya-rechi-s-otkryтым-kodom/>
3. **Даниил, Г.** Почему Kaldi хорош для распознавания речи / <https://habr.com/en/post/470696/>
4. **PocketSphinx.** Распознавание речи и голосовое управление в Linux. - <https://habr.com/en/post/167479/>
5. **«CMU»** About CMU Sphinx. Official Wiki/ <https://cmusphinx.github.io/wiki/tutorialconcepts/>
6. **«Яндекс.Облако»** Yandex Speech Kit / <https://cloud.yandex.ru/services/speechkit>.

**S. A. Steklov, V. E. Gai**

**SOFTWARE SYSTEM FOR VOICE CONTROL OF A MOBILE ROBOT**

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This work is devoted to the study of voice control technologies for mobile robots and speech processing in General. The creation of such systems is quite relevant in the field of information technology development. In this paper, we consider an approach to solving the problem based on the voice recognition program.

**Keywords:** voice control, robot control, speech recognition.

Н.А. Черкас, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ РАЗМЕТКИ И ЗНАКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Интерес к автономным транспортным средствам с каждым днем только повышается. В последнее время разрабатываются различные системы поддержки водителей. Возможность распознавания светофоров, знаков дорожного движения и дорожной разметки – это ключевые особенности беспилотного автомобиля. В данной статье предлагаются алгоритмы для решения этих задач.

**Ключевые слова:** распознавание, светофор, знаки дорожного движения, дорожная разметка, беспилотный автомобиль, сопоставление с шаблоном.

### Введение

В настоящее время происходит автоматизация практических всех видов деятельности в большинстве случаев для того, чтобы упростить жизнь людям.

На сегодняшний день очень актуальной темой является разработка беспилотных автомобилей. Это автомобили, оборудованные системой автоматического управления и способные передвигаться без участия человека.

Беспилотные автомобили нужны для того, чтобы повысить безопасность вождения, производительность поездок, снизить стресс водителей при управлении транспортным средством. Такие автомобили могут оказать помощь водителям, чтобы избежать аварий или к примеру, оценить оптимальный расход топлива. Поэтому многие крупные компании, такие как Tesla, Apple, Google, Nvidia и Waymo, инвестировали большие суммы денег в разработку аппаратного и программного обеспечения, необходимого для создания автономных транспортных средств.

Транспортные средства с возможностью полностью автономного вождения обязательно должны уметь решать такие задачи как: распознавание знаков дорожного движения [2], светофоров [3] и дорожной разметки [4].

### Расознавания светофора и знаков дорожного движения Алгоритм распознавания светофора

1. Получение изображения.
2. Предварительная обработка изображения.
  - а. **Преобразование изображения в пространство HSV.** Цветовая модель HSV (англ. Hue, Saturation, Value – тон, насыщенность, значение) является нелинейным преобразованием модели RGB. Данная модель близка к человеческому восприятию цветов и широко используется в распознавании изображений.

На рис. 1 изображено цветовое пространство HSV в виде конуса. Оттенок (H) здесь изменяется при движении вдоль окружности конуса, насыщенность (S) возрастает с отдалением от оси конуса, а яркость (V) – с приближением к его основанию.

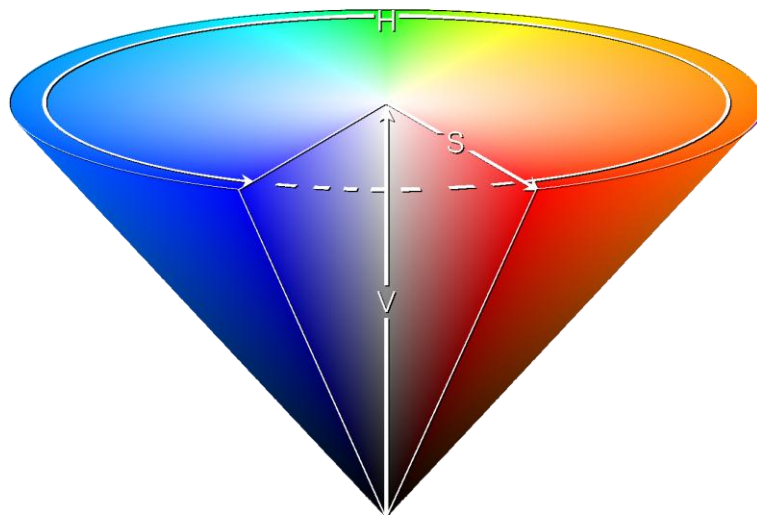


Рисунок 1. Цветовая модель HSV в виде конуса

в. **Наложение масок на изображение.** При распознавании светофора на изображении нам нужно искать только красные, зеленые и желтые цвета, которые характеризуют светофор. Для этого необходимо создать граничные значения для этих цветов и сформировать маски, фильтрующие заданный цветовой диапазон.

Знаки дорожного движения в основном состоят из красного, синего или желтого цвета. Поэтому при распознавании знаков дорожного движения на изображении нужно искать именно эти цвета.

с. **Применение морфологических операций.** После наложения маски, на изображении скорее всего будут выделены регионы, которые содержат цвета, входящие в созданный выше цветовой диапазон, но не относящиеся к светофору или знакам дорожного движения. Поэтому нужно уменьшить количество ненужных регионов, не убрав при этом действительно интересные нас регионы, содержащие светофор или знаки.

Для этого к выделенным регионам применяются морфологические операции – наращивание и эрозия. Наращивание позволяет увеличить контур вокруг найденного региона, а эрозия – уменьшить.

д. **Нахождение контуров.** После применения морфологической операции, необходимо найти контуры всех найденных регионов.

3. **Обработка найденных контуров.**

На изображении могут быть выделены контуры, не относящиеся к светофору или знакам дорожного движения и число таких контуров необходимо сократить. Для этого проводятся следующие операции:

а. **Фильтрация контура по его площади.** Подходящая величина площади контура выбирается экспериментальным путем и затем площади меньшего или большего размера отбрасываются.

б. **Аппроксимация контура с помощью алгоритма Дугласа-Пекера.** Этот алгоритм позволяет уменьшить число точек кривой, аппроксимированной большой серией точек.

В задаче распознавания светофора с помощью этого алгоритма можно фильтровать контуры по числу найденных точек. Экспериментальным путем было выявлено, что если контур состоит из трех или четырех точек, то он относится к светофору.

В задаче распознавания знаков благодаря этому алгоритму можно фильтровать контуры по их форме.

#### 4. Сопоставление полученного контура с шаблонным.

Этот этап нужен для распознавания знаков дорожного движения. На данном этапе нужно создать шаблонные контуры, которые повторяют формы дорожных знаков – круг, квадрат, треугольник. Затем полученные на предыдущем этапе контуры проверяются на схожесть с одним из шаблонных контуров. Если контур совпадет с шаблонным, то он помечается как искомый, иначе – удаляется.

### Распознавание дорожной разметки Алгоритм распознавания дорожной разметки

#### 1. Калибровка камеры.

Калибровка камеры нужна для того, чтобы получить внутренние параметры камеры – матрицу камеры и коэффициенты дисторсии. Это поможет исправить дисторсию на изображениях и уменьшить тем самым искажение кадров.

На рис. 2 представлено изображение шахматной доски перед калибровкой камеры, а на рис. 3 – после. Можно заметить, что все искажения были удалены.

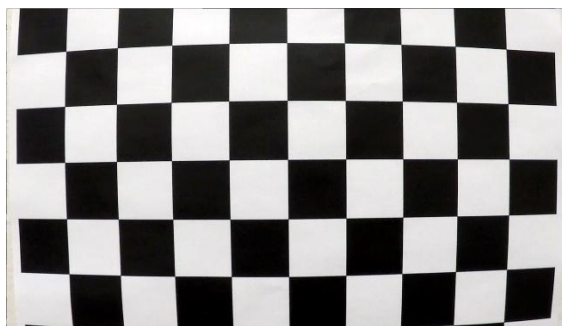


Рисунок 2. Изображение шахматной доски перед калибровкой камеры

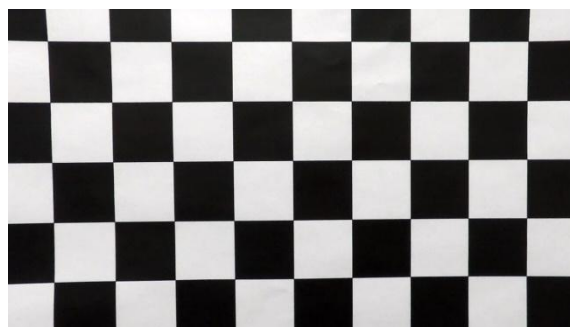


Рисунок 3. Изображение шахматной доски после калибровки камеры

#### 2. Получение неискаженного изображения.

#### 3. Предварительная обработка изображения.

##### а. Пороговая бинаризация изображения.

На данном этапе происходит пороговая бинаризация изображения. Пороговые методы бинаризации работают со всем изображением, находя порог, позволяющий разделить все изображение на два цвета – черный и белый. Это нужно для того, чтобы сделать линии дорожной разметки четко видимыми.

Фильтры, описанные далее, применяются с пороговым значением, чтобы создать отдельные бинарные изображения, соответствующие каждому фильтру:

1. С помощью оператора Собеля вычисляется производная в направлении  $x$
2. С помощью оператора Собеля вычисляется производная в направлении  $y$
3. С помощью оператора Собеля вычисляется абсолютное значение производной
4. Преобразование изображения из пространства RGB в пространство HLS и применение порогового значения на канале S (насыщенность). HLS - (от англ. *hue, saturation, lightness (intensity)*) – цветовая модель, в которой цветовыми координатами являются тон, насыщенность и светлота.

В конце этого этапа полученные четыре бинарные изображения объединяются, чтобы создать финальное бинарное изображение.

#### **в. Перспективное преобразование.**

Перспективное преобразование строится на основе четырех точек, формирующих выпуклый четырехугольник. Для преобразования необходимо задать исходную и желаемую конфигурацию точек.

Цель преобразования состоит в том, чтобы найти область интереса, то есть область исходного изображения, где находятся линии дорожной разметки.

#### **4. Полиномиальные преобразования.**

Выполнив предыдущий шаг, мы получим двоичное изображение, где линии дорожной разметки четко видны. Однако, необходимо явно решить, какие пиксели являются частью линий, и к какой линии они принадлежат (правой или левой).

Для этого выполняются следующие действия:

а. Построение гистограммы нижней части бинарного изображения и поиск пиков правой и левой половин гистограммы. С этих пиков начнется поиск линий дорожной разметки.

б. С помощью двух скользящих окон, расположенных вокруг центров линий, двигаться к верхней части изображения, решая, какие пиксели изображения к какой полосе принадлежат. Метод скользящего окна будет применяться только к первому кадру.

с. Полином второго порядка устанавливается на каждую линию движения. Эта функция вернет три коэффициента, которые описывают кривую.

#### **5. Расчет радиуса кривизны.**

Следующий шаг – это расчет радиуса кривизны по коэффициентам, полученным на предыдущем шаге, для каждой линии в соответствии с формулой 1.

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\left|\frac{d^2y}{dx^2}\right|} \quad (1)$$

#### **6. Положение транспортного средства относительно центра.**

Предполагается, что камера установлена в центре крыши автомобиля, поэтому центр полосы движения – центральная точка в нижней части изображения между двумя линиями, которые были обнаружены. В этом случае мы можем аппроксимировать смещение автомобиля от центра полосы движения как расстояние между центром изображения и центральной точкой в нижней части изображения между обнаруженными полосами движения.

### **Заключение**

Алгоритмы распознавания светофоров, дорожной разметки и знаков дорожного движения, рассмотренные в данной статье, могут быть использованы в различных погодных условиях, что делает их пригодным для использования в реальном времени. Однако данные

алгоритмы все же не будут работать идеально, поэтому их можно улучшить, добавив в алгоритм нейронные сети.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

5. **Википедия.** Беспилотный автомобиль. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный\\_автомобиль](https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_автомобиль)
6. **Sallah, S. S. M., Hussin, F. A., & Yusoff, M. Z.** Road sign detection and recognition system for real-time embedded applications. / International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE).
7. **Yuki Omori, Yoshihiro Shima.** HSV Color Space Based Lighting Detection for Brake Lamps of Daytime Vehicle Images / Meisei University, Graduate School of Science and Engineering.
8. **Yan, J., Baek, S.-H., & Park, S.-Y.** Robust road line color recognition based on 2-dimensional S-color space. / 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI).
9. **Википедия.** URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/HSV\(цветовая\\_модель\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/HSV(цветовая_модель))
10. **Википедия.** URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор\\_Собеля](https://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля)

**N. A. Cherkas, V. E. Gai**

### SOFTWARE SYSTEM FOR RECOGNIZING ROAD MARKINGS AND SIGNS FOR A MOBILE ROBOT

Nizhny Novgorod state technical University. R. E. Alekseeva

Interests of Autonomous vehicles only increases every day. Various driver support systems have been developed recently. The ability to recognize traffic lights, traffic signs, and road markings are key features of an unmanned vehicle. In this paper, we propose algorithms for solving these problems.

**Keywords:** recognition, traffic lights, traffic signs, road markings, driverless car, pattern matching.

В.Е. Гай, К.Н. Шарутин

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Задача распознавания звуковых сигналов – одна из самых интересных и сложных задач искусственного интеллекта. На сегодняшний день существует достаточно много сервисов и программ, выполняющих различные задачи с распознаванием речи: голосовое управление, голосовой набор, поиск композиций. В основе предлагаемого в данной статье метода лежит новый подход к вычислению признакового описания, построенный на основе теории активного восприятия. Предлагаемый метод включает четыре этапа: предварительную обработку сигнала, формирование системы признаков, размещение сегментов сигнала в бинарном дереве и поиск звукового сигнала в базе данных. На этапе предварительной обработки звуковой сигнал подвергается преобразованиям, которые помогают представить его в удобной форме для последующего анализа. На этапе формирования системы признаков решается одна из главных задач распознавания – однозначная идентификация сигнала. На этапе размещения сегментов сигнала в бинарном дереве происходит формирование бинарного дерева, в узлах которого хранится массив сегментов, содержащих признаковое описание сигнала. Этап поиска звукового сигнала в базе данных заключается в сравнении признакового описания входного сигнала и уже имеющего в базе данных.

**Ключевые слова:** идентификация звукового сигнала, теория активного восприятия, поиск сигнала в базе данных, формирование признакового описания.

### Введение

Задача распознавания звуковых сигналов в настоящее время является одной из актуальных задач в области теоретической информатики. Частным случаем данной задачи является задача поиска звукового сигнала в базе данных. Результат поиска звукового сигнала можно применить в области охраны интеллектуальной собственности, поиска звуковых композиций, а также в области криминалистики для сопоставления двух голосовых записей и выявления сходства. Этапы идентификации звукового сигнала включают [1]:

- 1) предварительную обработку сигнала;
- 2) формирование системы признаков;
- 3) размещение сегментов сигнала в бинарном дереве;
- 4) поиск звукового сигнала в базе данных;

Известны различные алгоритмы распознавания звуковых сигналов. К ним относятся скрытые марковские модели, методы с применением нейронных сетей.

Алгоритм с использованием скрытых марковских моделей заключается в разбиении фрагмента речи на отрезки, в течении которых параметры речи можно считать постоянными, после чего вычисляются характерные признаки. При распознавании происходит вычисление вероятностей соответствия данного звукового фрагмента определенному слову из базы данных [2]. Недостатком данного метода является его низкая устойчивость шуму.



Алгоритмы с использованием нейронных сетей обладает значительным преимуществом перед алгоритмами, основанными на вычислении метрик – вычислительные затраты не зависят от количества слов в словаре [3]. Недостатком нейросетевого подхода является отсутствие возможности добавления новых слов в словарь после окончания процесса обучения.

## Метод идентификации звукового сигнала в базе данных

### 1. Предварительная обработка сигнала

Этап предварительной обработки сигнала включает в себя нормирование звукового сигнала к диапазону  $[0, 1]$  и выполнение  $Q$ -преобразования, заключающегося в применении к сегментам исходного сигнала операции сложения. Нормирование сигнала происходит по следующей формуле:

$$S_{dsc} = S_{dsc} - \min(S_{dsc}), S_{dsc} = \frac{S_{dsc}}{\max(S_{dsc})},$$

где  $S_{dsc}$  – дискретный звуковой сигнал.

Нормированный сигнал представляется в виде множества сегментов  $s$ . Каждый сегмент – это последовательность значений из исходного сигнала  $S$ :

$$s = \{S_k\}, k = 1: K,$$

где  $K$  – число сегментов, длина сегмента составляет  $M$  отсчётов, сегменты выбираются из сигнала с равномерным шагом в  $N$  отсчётов.

### 2. Формирование системы признаков

На этапе формирования системы признаков вычисляются признаки сигнала, предварительно обработанного на предыдущем этапе, которые будут использоваться в момент принятия решения при поиске звукового фрагмента в базе данных.

Алгоритм формирования системы признаков состоит из следующих шагов:

1)  $U$ -преобразование – каждый сигнал подвергается делению на  $M$  равных частей, после чего применяется операция суммирования к каждой из частей (результат  $Q$ -преобразования). В результате вычисления  $U$ -преобразования формируется спектральное разложение сигнала:

$$q_k[i] = \sum_{l \in T_i} S_k[l],$$

где  $T_i$  – индексы отсчётов сегмента  $S_k$ , принадлежащие  $i$ - части сегмента.

2) Применение к полученному вектору множества  $q_k$  фильтров Уолша системы Хармута, в результате чего формируется вектор спектральных коэффициентов  $\mu_k$ :

$$\mu_k[i] = \sum_{j=0}^{M-1} q_k[j] F_i[j], i = 1, M, k = 1, K,$$

где  $M$  – число используемых фильтров Уолша системы Хармута.

В состав теории активного восприятия входит раздел «Алгебра групп», посвященный анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Использование подобных зависимостей позволяет добиться большей эффективности распознавания на этапе принятия решения.

Пусть каждому из ранее используемых фильтров Уолша соответствует бинарный оператор  $V_i$ , тогда каждой ненулевой компоненте вектора спектральных коэффициентов  $\mu$  можно поставить в соответствие оператор  $V_i$ . На множестве операторов формируется алгебра групп анализируемого сигнала – семейство полных и замкнутых групп.

Полные группы образуются на тройке операторов  $V_i, V_j, V_k$ . Среди них выделяют полные группы на операции сложения и умножения.

Замкнутые группы образуются на четверке операторов  $V_i, V_j, V_p, V_m$  и представлены как замкнутые множества и группы.

Использование полных групп позволяет выявить корреляционные связи между операторами  $V_i$ , замкнутые группы в свою очередь позволяют выявить связи между полными группами. Чтобы объединить данные, полученные от разных сегментов анализируемого сигнала, вычисляется гистограмма операторов, полных и замкнутых групп:

$$h_v = H[DV, G], h_{na} = H[P_{na}, G], h_{nm} = H[P_{nm}, G], h_s = H[P_s, G],$$

$$h_c = H[P_c, G], h_{nam} = H[P_{na}, P_{nm}, G], h_{sc} = H[P_s, P_c, G],$$

где  $h_v$  – гистограмма операторов,  $h_{na}$  – гистограмма полных групп на операции сложения,  $h_{nm}$  – гистограмма полных групп на операции умножения,  $h_s$  – гистограмма замкнутых групп,  $h_c$  – гистограмма замкнутых множеств,  $h_{nam}$  – гистограмма полных групп на операции сложения и умножения,  $H$  – оператор вычисления гистограммы заданной размерности,  $G$  – размерность гистограммы:  $1d$  – одномерная гистограмма,  $2d$  – двумерная гистограмма,  $3d$  – трёхмерная гистограмма

Таким образом, результатом этапа формирования системы признаков является массив признаков, полученный с помощью операции  $U$ -преобразования, а также с помощью вычисления замкнутых групп на основе  $U$ -преобразования.

### 3. Размещение сегментов сигнала в бинарном дереве

В качестве средства для хранения признакового описания сигнала используется бинарное дерево. На самый верхний уровень бинарного дерева помещается исходный сегмент сигнала и описатель. Процесс размещения сегментов в узлах дерева является рекурсивным:

1) Инициализируется  $N$ -уровневое двоичное дерево, в качестве текущего уровня анализа устанавливается первый:

$$i = 1, (i \leq N),$$

где  $i$  – текущий уровень дерева,  $N$  – число уровней дерева.

2) Вычисляется  $U$ -преобразование сегмента сигнала  $S_k$ , результатом вычисления является вектор спектральных коэффициентов:

$$\mu'_k = \text{sgn}(\mu_k),$$

где  $\mu_k$  – результат вычисления  $U$ -преобразования сегмента сигнала  $S_k$ .

3) Вычисляется расстояние Хэмминга между  $\mu'_k$  и бинарными векторами:

$$d_1 = \text{DIST}[\mu'_k, T_1],$$

$$d_2 = \text{DIST}[\mu'_k, T_2],$$

где  $\text{DIST}[\ ]$  – оператор вычисления расстояния Хэмминга,  $T_1$  и  $T_2$  – бинарные вектора:  $T_1 = \{1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0\}$ ,  $T_2 = \{0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1\}$ .

Отношение  $d_1$  к  $d_2$  определяет половину анализируемого сегмента, которая будет использоваться для дальнейшего анализа. При  $d_1 < d_2$  выбирается левая половина сегмента, информация о сегменте помещается в левый дочерний узел текущей вершины, в обратном случае – для анализа используется правая часть сегмента и информация помещается в правый дочерний узел.

4) Переход на следующий уровень анализа исходного сегмента  $S_k$ . В качестве рассматриваемого сегмента  $S_k$  выбирается его левая или правая часть в зависимости от решения на предыдущем шаге. Увеличивается на один текущий уровень дерева и выполняется переход к шагу 2. В случае если  $i > N$ , сегмент считается обработанным. Работа алгоритма выполняется

до тех пор, пока информация о всех сегментах исходного сигнала не будет помещена в двоичное дерево. Результатом работы алгоритма является бинарное дерево, в узлах которого хранится массив сегментов, содержащих признаковое описание сигнала.

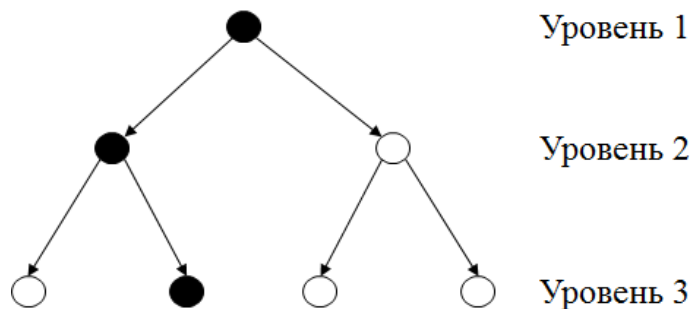


Рисунок 6. Размещение сегментов сигнала в узлах N-уровневого бинарного дерева

#### 4. Поиск звукового сигнала в базе данных

Алгоритм поиска в базе данных заключается в формировании дерева запроса искомого сигнала и сравнении его с уже существующими. Результатом сравнения является последовательность сегментов, исходя из которой можно сделать выводы о том, является ли входной запрос фрагментом из песни, найденной в базе данных, или же не является.

Запрашиваемый сигнал подвергается предварительной обработке, формируется набор признаков по алгоритму, описанному выше, после чего происходит построение бинарного дерева запроса. Количество уровней бинарного дерева запрашиваемого сигнала должно совпадать с количеством уровней бинарного дерева базы данных.

После того, как было построено бинарное дерево запроса, необходимо произвести сравнение искомого сигнала с сигналами из базы данных.

Сравнение признаковых описаний каждого сегмента из дерева запроса с каждым сегментом из дерева базы происходит соответственно, то есть сравниваются только сегменты, которые находятся в соответствующих узлах в деревьях.

В качестве начальной точки выбирается самый нижний уровень бинарного дерева запроса и бинарного дерева базы данных.

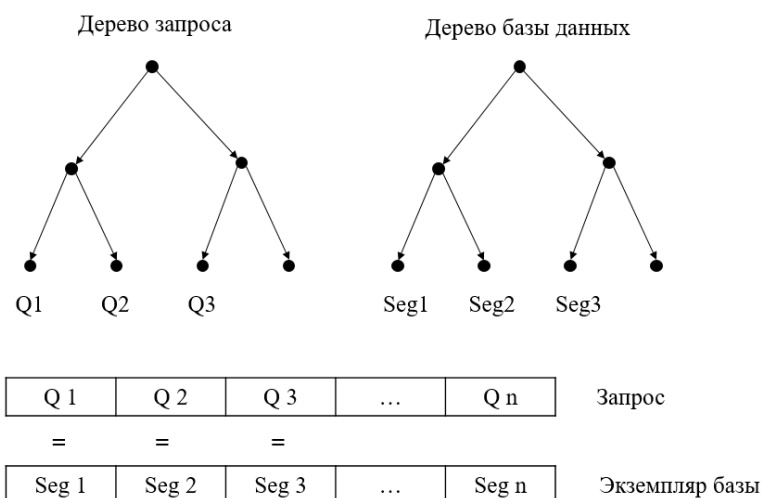


Рисунок 2. Сравнение сегментов деревьев запроса и базы данных

В случае обнаружения схожих признаков описаний сегментов с обеих сторон производится сравнение с соседними сегментами сигналов до нахождения полной последовательности.

Результатом работы алгоритма является массив сегментов, найденных в результате сравнения. Данный массив подвергается процессу сортировки по заранее определенным идентификаторам, а также сегменты сортируются по номерам в рамках одного сигнала. Максимальная последовательность сегментов будет являться результатом поиска.

### Заключение

В данной работе рассмотрен подход к построению модели и алгоритма поиска сигнала в звуковых базах данных. В отличие от известных методов поиска, например, вейвлет-преобразований, преобразования Фурье или же моделей глубокого обучения, данный метод позволяет вычислять признаки более высокого уровня, а также использовать заранее заданные шаблоны без использования обучения.

В качестве способа формирования признакового описания используются U-преобразования теории активного восприятия. Бинарное дерево используется для формирования базы данных звуковых сигналов, формировании структуры сигнала запроса и помогает при поиске схожих звуковых фрагментов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-06056.*

### Библиографический список

1. **Гай, В.Е.** Идентификация диктора по спектральным характеристикам речевого сигнала (статья) // Датчики и системы, № 7, 2013, С. 40-45
2. **Моттль, В.В.** Скрытые марковские модели в структурном анализе сигналов / В.В. Моттль, И.Б. Мучник. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 1999
3. **Шакла, Н.** Машинное обучение и TensorFlow / Библиотека программиста // Санкт-Петербург, 2019
4. **Утробин, В.А.** Элементы теории активного восприятия изображений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. – 2010. – Т. 81. – № 2. – С. 61-69.
5. **Гай, В.Е.** Метод обработки биометрической информации в системах контроля и управления доступом // Труды Нижегородского государственного технического университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. – Нижний Новгород, 2013, № 8 (94). – С. 65-32.
6. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений: учеб. пособие / В.А. Утробин. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2001. – 234 с.

V. E. Gai, K. N. Sharutin

**INFORMATION MODEL AND ALGORITHMS FOR IDENTIFYING  
THE AUDIO SIGNAL**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** The paper proposes a solution to one of the urgent problems of sound recognition – identification of the audio signal in the database. The created method of solving this problem can be in the field of intellectual property protection, search for sound compositions, as well as in the field of forensics.

**Design / methodology / approach:** The proposed method is based on the theory of active perception and includes 4 stages: signal pre-processing, forming a system of signs, placing signal segments in a binary tree and searching for an audio signal in the database.

**Research limitations/implications:** The proposed method is the starting point in the new method development of sound recognition.

**Originality/value:** The value of the proposed method is in the new approach of calculating the feature description of a sound signal and search it in a database which is a binary tree.

**Keywords:** search for a signal in a database, theory of active perception, feature description forming, identification of a sound signal

К.М. Шунин, В.Е. Гай

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Одна из задач робототехнической системы - движение без столкновения с препятствиями. Один из способов решения проблемы – установка датчиков. Но перед их установкой, необходимо обеспечить прямолинейное движение робота. В статье пойдет речь о решении данных задач

**Ключевые слова:** система управления движением мобильного робота, PID-регулятор, ультразвуковые датчики, 3D-печать

### Введение

Робот включает в себя два двигателя от стеклоподъемника двери автомобиля Volkswagen Polo двух моделей 6RO.959.802 и 6RO.959.801, два колеса диаметром 128 мм, одноплатный компьютер RaspberryPIB+, плата микроконтроллера ArduinoMega, драйвер двигателей L298N. На колесах установлены инфракрасные датчики и оптические диски на 30 секторов, далее эту пару будем называть энкодером. Так как, помимо моделей, у двигателей разная степень изношенности, из-за этого отличается скорость вращения, и робот не может двигаться прямолинейно. На основе этого было составлено техническое задание, на решение этой проблемы. Оно звучит так: реализовать управление двигателями через PID регулятор, на основе информации с энкодеров.

Следующим шагом было дополнение существующего технического задания новым пунктом: установка на робота группы ультразвуковых датчиков, чтобы робот имел возможность детектировать и объезжать препятствия, ровно двигаться вдоль стены.

Таким образом, итоговое техническое задание выглядит следующим образом:

- Реализация PID регулятора на основе данных с энкодеров.
- Разработка схемы крепления ультразвуковых датчиков.
- Разработка крепления для ультразвуковых датчиков модели HC-SRO4.

### PID регулятор

Стоит начать с того, что представляет собой PID регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор выдает на выходе сигнал для плавного управления объектом управления (драйвер двигателей), при помощи управляющего устройства (ArduinoMega), с детектированием ошибок, при помощи обратной связи (энкодеры). На рис. 1 изображена предполагаемая схема управления, где  $X(t)$  - задающее воздействие, желаемая скорость двигателей,  $Y(t)$  - реальный выходной сигнал,  $Z(t)$  - помехи (разный износ двигателей, неровность поверхности и пр.). Обратим внимание, что в сумматоре происходит вычитание значений с энкодера из задающего воздействия, это называется ошибкой. Из описания становится понятно, что регулятор оперирует тремя коэффициентами (пропорциональный, интегральный, дифференциальный), задающим воздействие (величина, которую должен

поддерживать регулятор), сигналом обратной связи (показания энкодера), на основании этих данных выдает сигнал, который подается на объект управления.

Итоговая формула для вычисления управляющего сигнала выглядит следующим образом:

$$u_{pid} = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) = k_p * e(t) + k_i * \int e(t)dt + k_d (y(t) - y(t-1))$$

На основе схемы из рис. 1 можно приступить к проектированию программного алгоритма, блок-схема которого изображена на рис. 2.

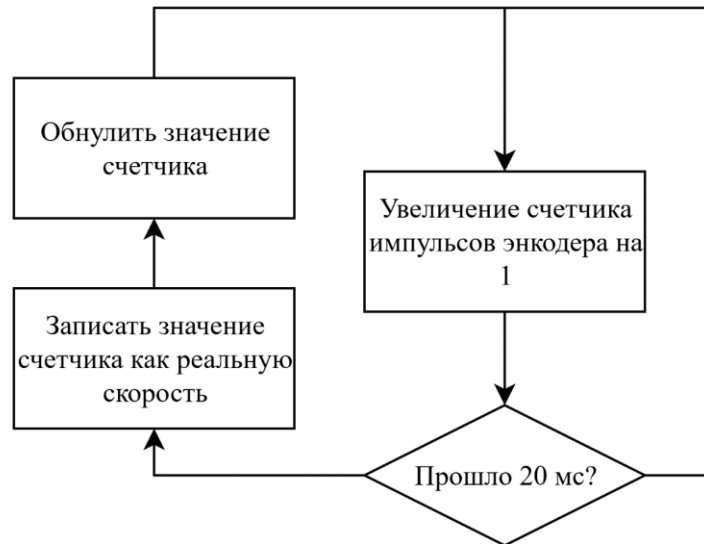


**Рисунок 1. Схема управления на основе ТЗ**



**Рисунок 2. Основной алгоритм движения робота**

На рис. 2 вычисление ошибки управление происходит путем вычитания текущей скорости из поддерживаемой, которая задается пользователем. Текущая скорость вычисляется фоновым процессом, который считает число срабатываний энкодера. Блок-схема этого процесса изображена на рис. 3.



**Рисунок 3. Фоновый процесс вычисления текущей скорости**

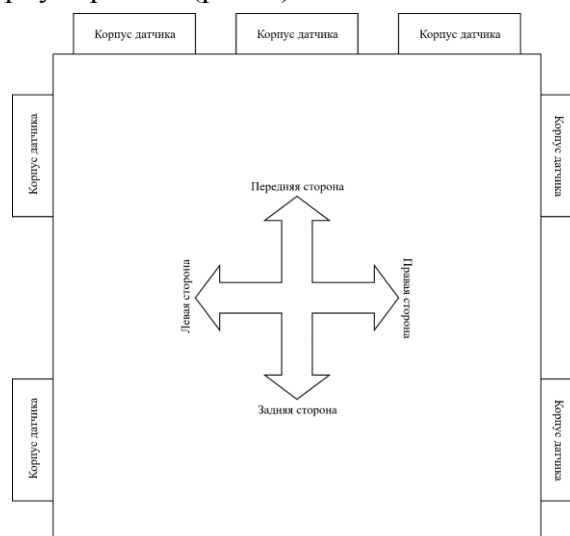
Так как двигателя у нас два, и PID регулятора будет два и каждый будет стараться удерживать общую заданную скорость, основываясь на показаниях энкодера, установленного на своем колесе.

### Предварительный итог

Используя алгоритм PID регулятора, автоматически решается проблема непрямолинейного движения робота из-за неровностей поверхности, особенностей используемых двигателей и других факторов, влияющих на колеса робота в разной степени. Можно приступить к следующему пункту ТЗ

### Ультразвуковые датчики

Одним из пунктов ТЗ была установка датчиков модели HC-SR04, для детектирования препятствий. Путем изучения технических характеристик датчиков была разработана схема крепления датчиков на корпусе робота (рис. 4).



**Рисунок 4. Схема расположения датчиков**

Было решено использовать три датчика спереди, для более точной оценки препятствий и по два датчика с боков, чтобы была возможность реализовать прямолинейное движение вдоль стены.



Следующим этапом была разработка крепления для датчиков, самым простым способом малосерийного производства которых является 3D-печать. Была разработана и напечатана корпус для датчика (рис. 5), в количестве 7 штук. Далее было произведено крепление корпусов датчиков к корпусу робота на винты и гайки М3.



**Рисунок 5. Корпус датчика HC-SR04**

### **Заключение**

Написав алгоритм PID регулятора и установив датчики, удалось значительно усовершенствовать систему движения робота. Теперь появляется возможность для дальнейшего расширения функционала. Появилась возможность реализовать алгоритмы для обхода лабиринта, можно заставить робота двигаться ровно вдоль стен, корректно объезжать препятствия и избегать столкновений с внезапно возникающими объектами.

### **Библиографический список**

1. **Денисенко, В.В.** ПИД-регуляторы: вопросы реализации. - СТА, No4, 2007, с. 86 - 97, No1, 2008, с. 86-99
2. **Карпов, В.Э.** ПИД-управление в нестрогом изложении
3. **Ротач, В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов – 5ое издание, переработанное и доп. / В.Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
4. **Воронов, А.А** Основы теории автоматического регулирования и управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. - М.: Высш. школа, 1977.519 с.

**K. M. Shunin, V. E. Gai**

### **SOFTWARE SYSTEM FOR CONTROLLING THE MOVEMENT OF A MOBILE ROBOT**

Nizhny Novgorod state technical University. R. E. Alekseeva

One of the tasks of the robotic system is to move without colliding with obstacles. One way to solve the problem is to install sensors. But before installing them, you must ensure that the robot moves in a straight line. The article will focus on solving these problems

**Keywords:** mobile robot motion control system, PID controller, ultrasonic sensors, 3D printing

И.В. Щельканцев, А.В. Семашко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ,  
РАБОТАЮЩИХ НА СЛОЖНЫХ СИГНАЛАХ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье приведен расчет помехоустойчивости систем телеуправления, работающих с использованием сложных сигналов. Представлен сравнительный анализ помехоустойчивости при использовании сигналов с типами манипуляций ФМн-4, КАМ и ФМн-2/ЧМн-2 для заданных вероятностей ложного срабатывания и правильного приема сообщений.

**Ключевые слова:** телеуправление, критерий Неймана-Пирсона, отношение сигнал-шум.

Телемеханика является быстроразвивающейся областью техники сбора, передачи, обработки и отображения информации, необходимой для оперативного централизованного контроля и управления различными процессами. В настоящее время в таких отраслях промышленности, как энергетика, транспорт, нефтяная и газовая промышленность, формируются иерархические автоматизированные системы диспетчерского управления с применением микро-ЭВМ и использованием локальных вычислительных сетей. Это приводит к существенному изменению, как в технических средствах, так и в методах передачи телемеханической информации.

Системы телемеханики должны обеспечивать высокую надежность передачи команд управления ( $P_l = 10^{-10} - 10^{-5}$ ), поскольку ущерб от передачи неправильных команд или других оперативных сообщений и задержка в передаче этих сообщений могут привести к большим экономическим потерям, а в отдельных случаях – и к гибели людей.

Подобные системы функционируют в условиях, когда факт посылки сигнала априори не известен, а приемно-декодирующая аппаратура автоматизирована и не обслуживается человеком, поэтому в них применяется статистический критерий оптимального обнаружения сигналов – критерий Неймана-Пирсона. В соответствии с критерием Неймана-Пирсона сначала должна обеспечиваться заданная и достаточно малая вероятность ложного приема команды  $P_l$ , затем должны предприниматься все меры для получения наибольшей вероятности правильного приема команды  $P_k$ .

В [1] показано, что в зависимости от типа модуляции передаваемого сигнала коэффициент помехоустойчивости  $K_{ny}$  радиолинии может существенно меняться, расширяя или сужая радиус зоны обслуживания системы телеуправления. Этот факт имеет особое значение в плоских каналах и при ограниченном энергопотреблении приемника.

В связи с этим целесообразно найти типы сигналов, позволяющие максимально увеличить  $K_{ny}$  радиолинии.

**Методика расчета помехоустойчивости системы телеуправления,  
работающей со сложными сигналами**

Поскольку параметры канала связи на поверхностных волнах изменяются с течением времени незначительно и отсутствует многолучевость, то в данном случае применима **модель аддитивного гауссовского канала связи**. (Также предполагается, что степень неровности

реальной поверхности удовлетворяет критерию Релея, т.е. возмущающим действием неровностей можно пренебречь, что в СВ-диапазоне выполняется в большинстве случаев). Модель такого канала задается уравнением наблюдения:

$$Z(t) = S(t) + n(t).$$

где  $Z(t)$  – случайный процесс, поступающий на вход приемника;  $S(t)$  – детерминированный полезный сигнал;  $n(t)$  – белый гауссовский шум.

Помехоустойчивость систем телеуправления характеризуется двумя показателями: вероятностью  $P_{л}$  ложного приема команды за определенный промежуток времени (срок службы  $T_{сл}$  исполнительного объекта) и вероятностью  $P_{к}$  правильного приема команды управления. Удобно также использовать коэффициент помехоустойчивости  $K_{пу}$ , т. е. отношение напряженности поля помех  $E_n$  к напряженности поля сигнала  $E_c$  в точке приема  $E_n/E_c$ , при котором  $P_{к} = 0,5$  при заданной вероятности  $P_{л}$ .

Вероятность ошибки на символ не может служить показателем помехоустойчивости систем телеуправления, поскольку не учитывает ложный прием команд управления, хотя определение вероятности  $P_{л,с}$ , или вероятности правильного приема символа двоичной комбинации  $P_c$  будет входить в процедуру вычисления  $K_{пу}$ .

В подобных системах команды обычно передаются кодом, состоящим из  $N$  блоков по  $n$  двоичных символов в каждом блоке [2]. Переданная команда считается принятой правильно при верном приеме всех  $N$  ее блоков. Блок считается принятым правильно при верном приеме  $n-s$  символов из  $n$ , т. е. допустимо не более  $s$  ошибок, причем место ошибки в комбинации может быть любым. Это условие подразумевает использование помехоустойчивого кодирования. Количество ошибок  $s$  в приеме символов  $n$ -разрядной двоичной комбинации, рассматриваемое как случайная величина, будет иметь биномиальное распределение [3,4]:

$$P(s) = C_n^s P_c^{n-s} (1 - P_c)^s,$$

где  $P(s)$  – вероятность наступления  $s$  ошибок в комбинации из  $n$  символов;

$$C_n^s = \frac{n!}{s!(n-s)!} - \text{число сочетаний из } n \text{ по } s.$$

При отсутствии сигнала в симметричных аддитивных гауссовских каналах связи

$P_c = 0,5$  [4]. Тогда вероятность ложного приема одноблочной команды на каждом тактовом интервале, равном длительности блока, совпадающей с длительностью команды ( $T_{б} = T_{к}$ ), будет равна

$$P = \frac{\sum_{i=0}^s C_n^i}{2^n}$$

Ложный прием команды, происходящий под действием случайных помех, представляет собой случайное событие. Поток этих событий является марковским, отсутствует последствие, и имеет место ординарность. В этих условиях число  $k$  таких событий (ложных приемов команды) за отрезок времени, равный  $t$ , имеет распределение Пуассона [3]:

$$P(k) = \frac{(\gamma)^k}{k!} \exp(-\gamma),$$

где  $\gamma$  – средняя частота событий.

Вероятность того, что за время  $t = T_{сл}$  произойдет хотя бы один ложный прием команды составит

$$P_{л} = P(k \geq 1) = 1 - P(0) = 1 - \exp(-\gamma T_{сл}). \quad (1)$$

Заданная вероятность ложного приема команды представляет собой весьма малую величину, поэтому можно ограничиться двумя первыми членами разложения (1) в степенной

ряд. В результате получим простое выражение

$$P_{л} = \gamma T_{cl}, \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для одноблочной команды. Поскольку

$$\gamma = \frac{P}{tk} = \frac{\sum_{i=0}^s C_n^i}{2^n tk},$$

получаем

$$P_{л} = \frac{T_{cl}}{2^n tk} \sum_{i=0}^s C_n^i.$$

Вероятность ложного приема команды, состоящей из  $N$  блоков, определяется выражением

$$P_{л} = \gamma_1^N T_{cl} T_{\bar{\sigma}}^{N-1}. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma_1 = \frac{\sum_{i=0}^s C_n^i}{2^n T_{\bar{\sigma}}}$  – средняя частота ложного приема блока команды на каждом тактовом

интервале, равном  $T_{\bar{\sigma}}$ . Подставляя значения  $\gamma_1$  в (3) и имея в виду, что  $T_{\kappa} = NT_{\bar{\sigma}}$ , приходим к выражению для вероятности ложного приема многоблочной команды:

$$P_{л} = \left( \frac{\sum_{i=0}^s C_n^i}{2^n} \right)^N \frac{NT_{cl}}{T_{\kappa}}. \quad (4)$$

Вероятность правильного приема одноблочной команды совпадает с интегральной функцией распределения дискретной случайной величины  $s$ :

$$P_{\kappa} = \sum_{i=0}^s C_n^s P_c^{n-s} (1 - P_c^s).$$

Поскольку правильный прием блоков команды представляет собой независимые события, для многоблочной команды получаем

$$P_{\kappa} = \left( \sum_{i=0}^s C_n^s P_c^{n-s} (1 - P_c^s) \right)^N. \quad (5)$$

В соответствии с критерием Неймана-Пирсона из (4) определяется число допустимых ошибок  $s$  в приеме символов двоичной комбинации, при котором обеспечивается заданная  $P_{л}$ . Далее полученная величина  $s$  подставляется в (5). Из этого выражения при заданной вероятности правильного приема  $P_{\kappa}$  определяется требуемая вероятность  $P_c$  правильного приема символа.

Как известно, наиболее высокая достоверность приема сигналов и наиболее высокая помехоустойчивость достигается при применении согласованной фильтрации. В качестве примера рассмотрим помехоустойчивость приема  $N$ -блочных  $n$ -разрядных многопозиционных сигналов ФМн-4, КАМ и ФМн-2/ЧМн-2. Предположим, что приемные устройства содержат фильтры, согласованные с элементами соответствующих сигналов и имеет место поэлементная обработка двоичной комбинации. В соответствии с моделью аддитивного гауссовского канала связи на входе приемников действует сумма двоичного сигнала и белого шума.

Вероятность правильного приема символа ФМн-4-сигнала (когерентный прием) определяется выражением

$$P_c = \Phi(q\sqrt{2}), \quad (6)$$

где  $q = \frac{V_m}{\sqrt{2}\sigma}$  – отношение сигнал/шум (ОСШ) в полосе согласованного фильтра;  $V_m$  – амплитуда входного ФМн-4 сигнала;  $\sigma^2$  – мощность узкополосного шума на выходе согласованного фильтра;  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp(-\frac{y^2}{2}) dy$  – интеграл вероятностей Лапласа.

Из (6) следует

$$q_{\text{ФМн}} = \frac{1}{\sqrt{2}} F(P_c), \quad (7)$$

где  $F(x)$  – функция, обратная интегралу вероятности Лапласа.

Вероятность правильного приема символа для  $M$ -позиционной КАМ равна [6]:

$$P_c = (1 - P_{\sqrt{M}})^2,$$

где

$$P_{\sqrt{M}} = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \left( 1 - \Phi \left( q \sqrt{\frac{3}{M-1}} \right) \right), \quad (8)$$

$q_{\text{КАМ}}$  рассчитывается численными методами.

Вероятность правильного приема микроблока ФМн-2/ЧМн-2, состоящего из двух символов, (когерентный прием) определяется выражением

$$P_c = P_c(\text{ФМн}) \cdot P_c(\text{ЧМн}) = \Phi(q\sqrt{2}) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{q^2}{2}\right) \right], \quad (9)$$

Следовательно вероятность правильного приема символа ФМн-2/ЧМн-2 (когерентный прием) определяется среднегеометрическим выражением:

$$P_c = \sqrt{P_c(\text{ФМн}) \cdot P_c(\text{ЧМн})} = \sqrt{\Phi(q\sqrt{2}) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{q^2}{2}\right) \right]}, \quad (10)$$

$q_{\text{ФМн2/ЧМн2}}$  рассчитывается численными методами.

Структура сигнала ФМн-2/ЧМн-2 представлена на рис. 1. 4-позиционное объемное со звездие представляет собой тетраэдр. На рисунке схематично показаны ортогональные частотные плоскости, в каждой из которых сигнал представляет собой сигнал с ФМн.

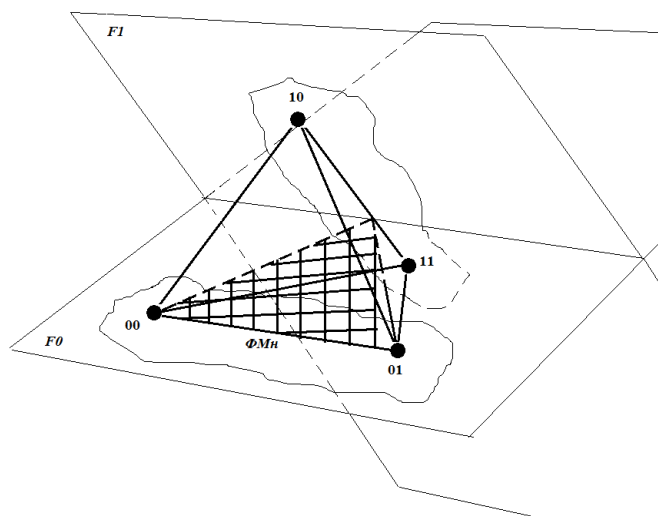


Рисунок 1. Структура сигнала ФМн-2/ЧМн-2

Коэффициент помехоустойчивости определяется по формуле:

$$K_{ny} = \frac{1}{q\sqrt{\Delta f_{np}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta f_{np}$ , кГц – полоса пропускания фильтра, согласованного с символом двоичной комбинации.

В случае многоуровневой манипуляции ( $m > 2$ ) длительность  $T$  сигнала оказывается равной  $T = T_c \cdot \log_2 m$ , что приводит к соответствующему сокращению в  $\log_2 m$  полосы занимаемых частот при передаче одного и того же объема данных [7].

Следовательно

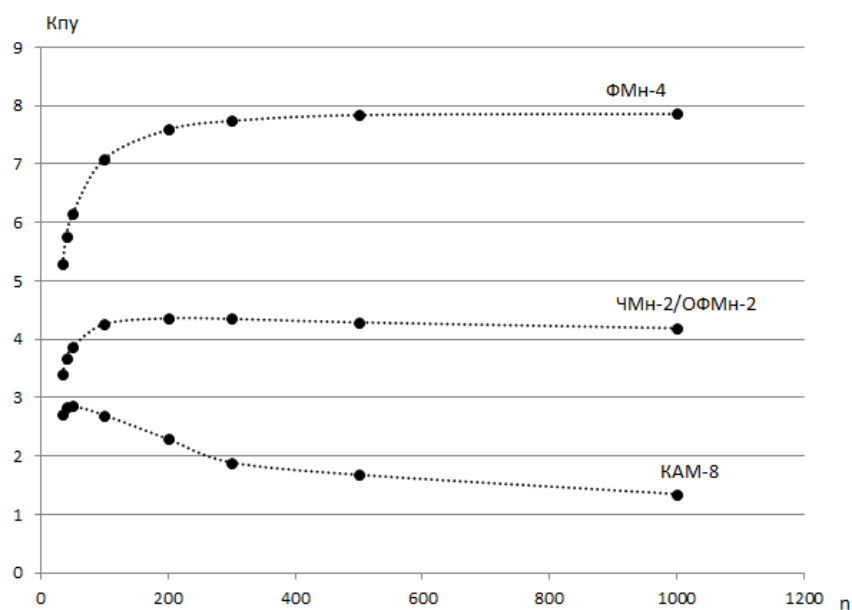
$$\Delta f_{np} = \frac{1}{\tau_s} = \frac{nN}{2T_k}.$$

где  $\tau_s$  – длительность символа двоичной комбинации.

При известной вероятности правильного приема символа по формулам (6), (8) и (10) определяется ОСШ в полосе согласованного фильтра, а далее по формуле (11) –  $K_{ny}$  радиолинии.

На рис. 1 и 2 приведены данные расчета коэффициентов помехоустойчивости  $K_{ny}$  в полосе согласованного фильтра в зависимости от разрядности кода одноблочных команд для сигналов ФМн-4, КАМ и ФМн-2/ЧМн-2 при следующих исходных данных:

- длительность команды управления  $T_k = 1$  с;
- допустимая вероятность ложного приема команды  $P_l = 10^{-5}$  за время  $T_{cl} = 1$  сут (86400 с.);
- вероятность правильного приема команды (надежность управления)  $P_k = 0.999$ .



**Рисунок 2. Коэффициенты помехоустойчивости одноблочных сигналов ФМн-4, ФМн-2/ЧМн-2, КАМ**

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что сигнал с ФМн-4 значительно превосходит в помехоустойчивости все типы модуляции.  $K_{ny}$  в данном случае монотонно увеличивается с ростом разрядности  $n$  и асимптотически приближается к значению  $K_{ny} = 8$ . Сигнал с КАМ-8 показывает худшие результаты по помехоустойчивости. Для поверхностно-сферического сигнала ФМн-2/ЧМн-2 и КАМ-8-сигнала характерно наличие пикового значения  $K_{ny}$ .

## Библиографический список

1. **Щельканцев, И.В.** Оценка радиуса зоны обслуживания систем телеуправления, работающих на земных радиоволнах / Щельканцев И.В., Семашко А.В., Белов Ю.Г., Скрипник И.В. // Системы управления и информационные технологии, №4(70), 2017. – с. 92-98
2. Передача телемеханической информации / Васильев Р.Р., Шастова Г.А....– М.: Госэнергоиздат, 1960. - 146 с.
3. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. – 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.
4. **Васильев, К.К.** Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. - 452 с.
5. Цифровая связь. Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800с.: ил.

**I.V. Shchelykantsev, A.V. Semashko**

### **THE INVESTIGATION OF NOISE IMMUNITY OF TELECONTROL SYSTEMS BY USING COMPLEX SIGNALS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

In the article the calculation of the noise immunity of telecontrol systems by using complex signals is given. The comparative analysis of a noise immunity with using the FSK-4, QAM- and FSK-2/PSK-2-signals for the defined probabilities of the false activation and the correct receiving of messages is presented.

**Keywords:** telecontrol, the Neumann-Pearson criterion, signal-to-noise ratio.

Е.О. Трубаков, А.О. Трубаков, О.Р. Трубакова

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ СОПОСТАВЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ АНАЛИЗА КОСМОСНИМКОВ

Брянский государственный технический университет, Брянск

Спутниковые дистанционные методы имеют особое значение для зондирования Земли [1]. Это связано с ростом качества, количества и доступностью спутниковых снимков. В силу большого количества данных, эффективный анализ спутниковых снимков требует применения методов машинного обучения. С их помощью производится обработка, анализ и формирование пригодных для дальнейшего анализа специалистом данных. Основным источником данных, для мониторинга местности являются цифровые изображения, полученные искусственными спутниками Земли.

Большой проблемой при исследовании поверхности Земли со снимков спутника являются облака, так как они часто могут покрывать довольно большую площадь поверхности. Существует несколько решений данной проблемы, например, использование облачной маски или детектирование облаков с помощью искусственных нейронных сетей, деревьев классификации, карт Кохонена и т. п.

В работе предлагается альтернативный подход к подбору пригодных для обработки космоснимков. Основная идея заключается в том, что предлагается исходить не из параметров облачности или искажений, а из параметров области интереса и её характерных точек. Для этого предлагается использовать ключевые точки на основе одного из известных дескрипторов. При этом изображение считается пригодным для дальнейшей обработки в том и только в том случае, если заранее заданный процент ключевых точек области интереса, вычисленный по эталонному снимку, найден на исследуемом изображении.

В статье проводится исследование работы методов сопоставления ключевых точек для детекторов с целью выявления лучших методов, работающих с космоснимками.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, детекторы ключевых точек, сопоставление объектов, вегетационный индекс.

### Введение

Ключевая точка – это такая точка, изображение которой можно устойчиво отличать от изображений всех соседних с ней точек. Сопоставление снимков с помощью ключевых точек заключается в нахождении ключевых точек на снимках, и последующем сравнении окрестностей ключевых точек.

Преимущества применения метода ключевых точек:

- 1) повышение вероятности распознавания местности в условиях неполной видимости. например, в условиях незначительной облачности, достаточно нескольких небольших, но характерных особенностей местности для успешного сопоставления;
- 2) повышение вероятности верного совпадения при умеренном изменении сцены и условий съемки;
- 3) найденные совпадения обладают пиксельной и даже субпиксельной точностью;



4) уменьшение количества вычислений и их оптимизация: сравниваются не полные изображения снимков, а только их фрагменты (окрестности характерных точек).

## Детектирование ключевых точек

### Метод ORB

Алгоритм метода ORB[6] заключается в следующем:

1. Ключевые точки обнаруживаются при помощи быстрого древовидного FAST на исходном изображении и на нескольких изображениях из пирамиды уменьшенных изображений.

2. Для обнаруженных точек вычисляется мера Harris. Кандидаты с низким значением меры Harris отбрасываются.

3. Вычисляется угол ориентации ключевой точки. Для этого, сначала вычисляются моменты яркости для окрестности ключевой точки:

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x, y),$$

где  $x, y$  – пиксельные координаты,  $I$  – яркость.

И затем вычисляется угол ориентации ключевой точки:

$$\theta = \text{atan2}(m_{01}, m_{10}).$$

В итоге получается некоторое направление для окрестности ключевой точки.

4. Имея угол ориентации ключевой точки, последовательность точек для бинарных сравнений в дескрипторе BRIEF поворачивается в соответствие с этим углом. Математически новые положения для точек бинарных тестов вычисляются так:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix} = R(\theta) * \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}.$$

5. По полученным точкам вычисляется бинарный дескриптор BRIEF.

### Метод BRISK

Авторы метода создали свой метод на основе детектора AGAST, который, по сути, является расширением метода FAST. Однако, для того, чтобы добиться инвариантности к изменению масштаба, нахождение максимумов происходит не только на исходном изображении, но и в масштабируемом пространстве. В методе BRISK [9] масштабируемое пространство состоит из  $n$  октав  $c_i$  и  $n$  внутренних октав  $d_i, i = \{0, 1, \dots, n - 1\}$  ( $n$  обычно выбирается равным 4). Октавы составляются путём уменьшения масштаба исходного изображения в два раза. Каждая внутренняя октава  $d_i$  располагается между октавами  $c_i$  и  $c_i + 1$ . Первая внутренняя октава получается путём уменьшения масштаба исходного изображения в 1,5 раза, а каждая последующая – путём уменьшения масштаба предыдущей внутренней октавы в два раза.

Метод FAST применяется к каждой из октав и каждой из внутренних октав по отдельности с одинаковым пороговым значением, с целью найти потенциально особые области. Затем среди точек, содержащихся в этих областях, производится поиск локальных максимумов во всём масштабируемом пространстве.

### Метод AKAZE

При разработке данного метода, представленного в 2013 году, старались добиться высокой скорости работы как детектора, так и дескриптора. При этом найденные особые точки и их дескрипторы должны были удовлетворять высоким показателям точности при сравнении изображений.

Применение алгоритма FED – Fast Explicit Diffusion [7] на пирамидальной схеме позволяет построить нелинейную многомасштабную пирамиду. Применение нелинейного коэффициента масштабирования позволяет увеличить скорость нахождения нужной особой точки по сравнению с Гауссовой пирамидой:

Вычисление данного коэффициента основано на изменении яркости изображения при масштабировании.

Для каждого в октаве пирамиды вычисляется определитель Гессииана:

$$L_{Hessian}^i = \sigma_{i,norm}^2 (L_{xx}^i L_{yy}^i - L_{xy}^i L_{yx}^i),$$

где  $\sigma_{i,norm} = \sigma_i / 2^{0i}$  – нормализованный относительно масштаба коэффициент, для вычисления  $L_{Hessian}^i$  с учетом размера октавы  $\sigma_i$ .

Производные второго порядка вычисляются с помощью фильтра Шарра с шагом  $\sigma_{i,norm}$ . Данный фильтр позволяет учитывать ориентацию особых точек. С помощью такого подхода ищем такие точки в октаве, значение фильтра которых выше заданного порога и является наибольшим из окрестности точки  $3 \times 3$  пикселей.

Далее, для каждой точки из потенциальных максимумов сравнивается её значение относительно результатов в соседних октавах  $i + 1$  и  $i - 1$  в окне размером  $\sigma_i \times \sigma_i$  соответственно. В итоге расположение особой точки оценивается с субпиксельной точностью, соответствующая квадратичной функции к определителю Гессииана в  $3 \times 3$  соседних пикселей для поиска максимума.

Дескриптор M-LDB [4]:

1. Окно дескриптора ориентируется по ориентации особой точки.
2. Инвариантность к масштабу получена с помощью выбора размера окна дескриптора в зависимости от размера октавы  $\sigma_i$  в которой найдена его особая точка.

В отличие от LDB в M-LDB тесты проводятся не между средним значением всех пикселей в области, а между заданным их количеством в зависимости от размера  $\sigma_i$ , что позволяет ускорить вычисление дескриптора.

## Сопоставление объектов

### Метод Brute-Forcematcher

Сопоставление объектов с помощью метода Brute-Forcematcher [2]. Данный метод принимает дескриптор одного объекта в первом наборе и сопоставляется со всеми другими объектами во втором наборе с использованием некоторого вычисления расстояния. И самый близкий возвращается.

Для работы с данным методом необходимо задать два параметра. Первый определяет измерение расстояния, которое будет использоваться. Наиболее часто этот параметр принимает значение равное четырем. Второй параметр – это логическая переменная, перекрестная проверка которой по умолчанию является ложной. Если это правда, то метод возвращает только те совпадения со значением  $(i, j)$ , где  $i$ -й дескриптор в наборе А имеет  $j$ -й дескриптор в наборе В как лучшее совпадение и наоборот. То есть два объекта в обоих наборах должны соответствовать друг другу. Этот метод обеспечивает последовательный результат.

## Метод Flann-Basedmatcher

Метод Flann-Basedmatcher наиболее часто встречается в библиотеках для быстрого поиска схожих ближайших соседей [2]. Этот метод оптимизирован для поиска ближайших соседей в больших наборах данных и для крупномасштабных объектов. Стоит отметить, что он работает быстрее, чем метод Brute-Forcematcher для больших наборов данных.

Данный метод рекурсивный и основан на древовидных структурах. Поэтому для его работы необходимо указать ряд параметров. Основным из них является параметр, указывающий количество рекурсивных проходов древовидных структур для поиска наиболее похожей ключевой точки на другом снимке. Чем больше этот параметр, тем более точно определяется ключевая точка. Однако, повторные поиски по структурам увеличивают время работы метода.

## Исследование результатов работы алгоритмов

Эксперименты были проведены на 100 снимках, полученных со спутника Sentinel-2 [3], с разной степенью облачности: малооблачные (<40% облачности), среднеоблачные (<50% облачности) и сильнооблачные (>50% облачности). В качестве основных объектов на снимках выбраны леса. Поэтому, для лучших результатов, снимки были переведены в вегетационный индекс NDVI [5].

## Результаты работы методов детектирования ключевых точек

На рис. 1 показано среднее значение числа ключевых точек, полученных с помощью детекторов и соответствующих дескрипторов.

На безоблачном изображении детектор ORB обнаружил в 5,5 раз больше ключевых точек, чем метод BRISK, и в 28 раз больше чем метод AKAZE. А BRISK, в свою очередь, в 5,2 раза нашёл больше ключевых точек, чем AKAZE.

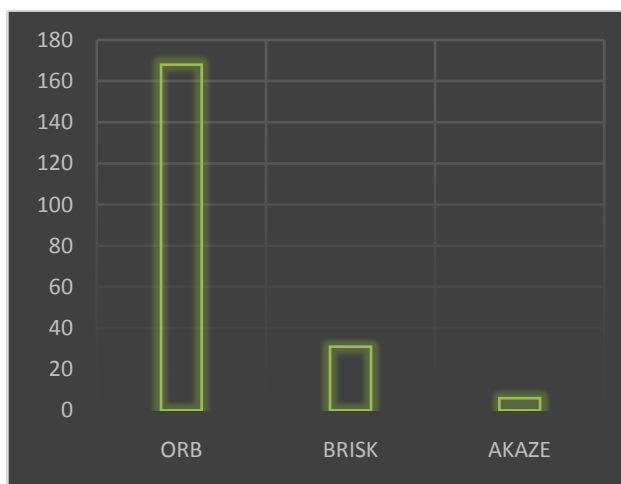


Рисунок 1. Среднее значение числа найденных ключевых точек

## Результаты работы метода Brute-Forcematcher

При поиске соответствий на малооблачных снимках метод Brute-Forcematcher с использованием детектора ORB потерял много ключевых точек, но результаты оказались достаточно точными, чтобы определить, что снимок почти безоблачный (рис. 2).

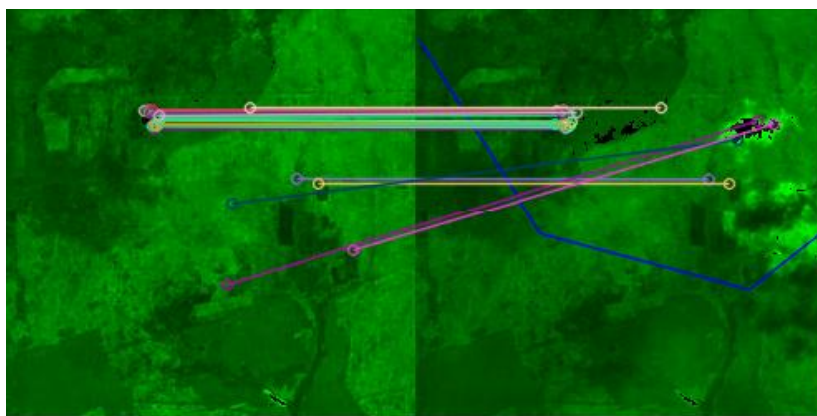


Рисунок 2. Результат работы метода Brute-Forcematcher на малооблачном снимке

Также видно, что метод не потерял ни единой точки на безоблачном снимке (рис. 3).

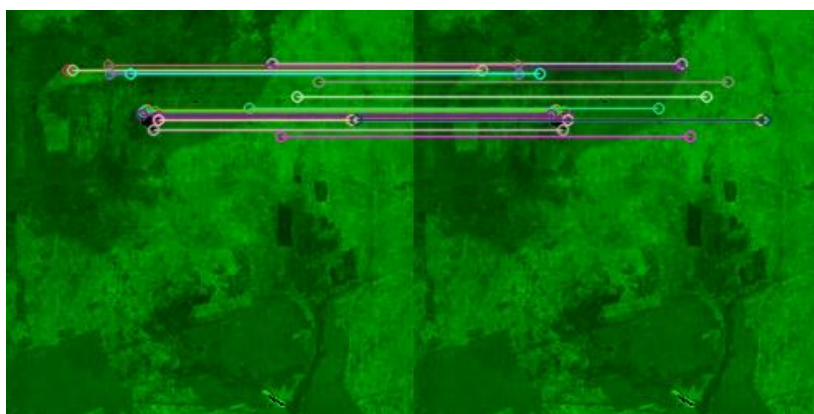


Рисунок 3. Результат работы метода Brute-Forcematcher на безоблачном снимке

Пример работы метода Brute-Forcematcher на сильнооблачном космоснимке с использованием детектора ORB представлен на рис. 4. Результат потерь ключевых точек составляет 54%, также обнаружено много выбросов, что дает возможность сделать вывод о том, что снимок в большей степени закрыт облаками или другими помехами.

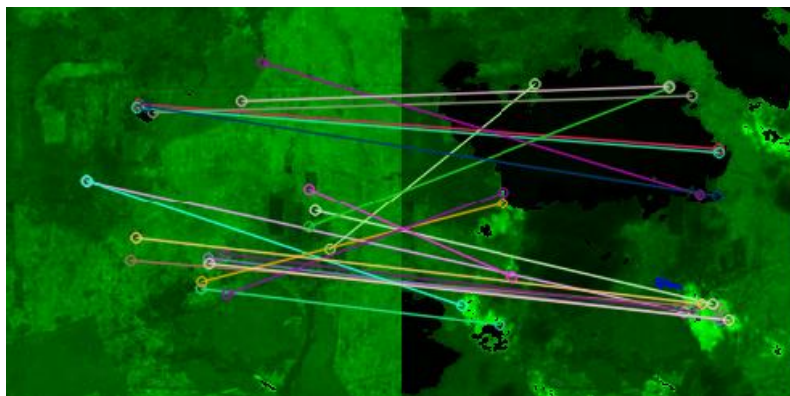


Рисунок 4. Результат работы метода Brute-Forcematcher на сильнооблачном снимке

Проценты потерь ключевых точек, обнаруженные методом Brute-Forcematcher, представлены в таблице и отображены на рис. 5.

#### Проценты потерь ключевых точек, обнаруженные методом Brute-Forcematcher

	Малооблачный снимок	Среднеоблачный снимок	Сильнооблачный снимок	Безоблачный снимок
<b>ORB</b>	36%	42%	54%	0%
<b>BRISK</b>	52%	52%	55%	0%
<b>AKAZE</b>	67%	67%	83%	0%

На графике видно, что метод ORB лучше всех отображает разницу между различным процентом облачности снимка и при этом меньше всех теряет ключевых точек.

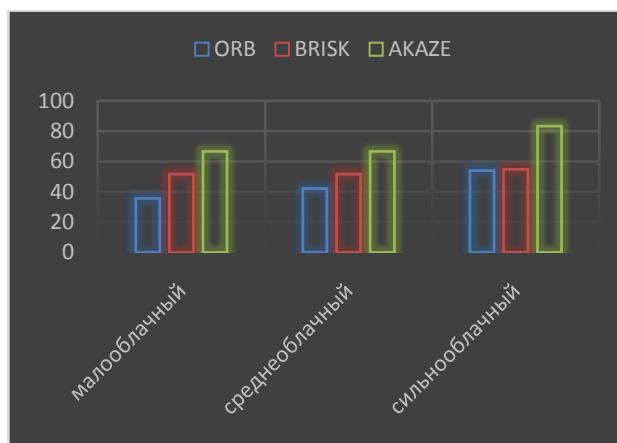


Рисунок 5. Результаты потерь ключевых точек, обнаруженные методом Brute-Forcematcher, в зависимости от процента облачности

#### Результаты работы метода Flann-Basedmatcher

Метод Flann-Basedmatcher хуже справился с задачей поиска. Так как метод намного лучше работает для больших наборов данных, то, применяя в качестве детектора ключевых точек метод AKAZE, который находит в среднем 5-6 точек, Flann-Basedmatcher не обнаружил никаких проблем на снимке. Также и для других методов детектирования Flann-Basedmatcher сопоставил ключевые точки со 100% точностью по числовому значению, но с большим количеством выбросов. Даже на безоблачном снимке метод Flann-Basedmatcher возвращает результат с большим количеством выбросов. Примерработы метода сопоставления Flann-Basedmatcher с использованием детектора ORB на малооблачном снимке представлены на рис. 6.

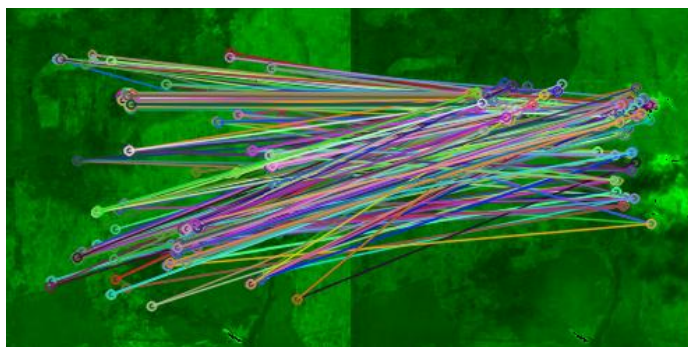


Рисунок 6. Результат работы метода Flann-Basedmatcher на космоснимке

## Заключение

Результатом исследования стал вывод о том, что для работы с ключевыми точками важным критерием является не количество найденных точек, а количество сопоставленных ключевых точек. Метод ORB и BRISK показали хорошие результаты в поиске ключевых точек, однако ORB находит больше точек и при поиске соответствующих им на заоблачном снимке теряет меньше точек. Метод AKAZE находит в несколько раз меньше ключевых точек, что плохо для задачи обнаружения облаков на снимках.

Результатом сопоставления двух изображений стал вывод о том, что некоторое количество точек теряется при поиске соответствующих им. Но при этом метод Brute-Forcematcher работает хорошо, находит правильные соответствующие точки, и процент потерь ключевых точек позволяет сделать вывод о степени закрытости снимка облаками или другими помехами, а метод Flann-Basedmatcher допускает большое количество ошибок на космоснимках.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00844.*

## Библиографический список

1. **Шовенгердт, Р.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М., 2010. 560 с.
2. Brute-Force matcher, Flann-Based matcher: [https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py\\_tutorials/py\\_feature2d/py\\_matcher/py\\_matcher.html](https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_feature2d/py_matcher/py_matcher.html)
3. Copernicus Open Access Hub. - Режимдоступа: <https://scihub.copernicus.eu>.
4. **Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool**, "SURF: Speeded Up Robust Features". Proceedings of the ninth European Conference on Computer Vision, pp. 404 – 417, 2006.
5. **Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker C. J., Stenseth N. C.** Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // Trends in Ecology and Evolution. 2005. Vol. 20. P. 503–510. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
6. **Rublee, E.** ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski // Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference on. IEEE. – 2011. – pp. 2564-2571.
7. **S. Grewenig, J. Weickert, C. Schroers, A. Bruhn**: "Cyclic Schemes for PDE-Based Image Analysis", In International Journal of Computer Vision, 2013.
8. **Stefan Leutenegger, Margarita Chli and Roland Siegwart**: BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. ICCV 2011: 2548-2555.

**E.O. TRUBAKOV, A.O. TRUBAKOV, O.R. TRUBAKOVA**

## **STUDY OF THE RESULTS OF MATCHING ALGORITHMS FOR SELECTING SUITABLE SPACE IMAGES FOR PROCESSING**

Bryansk state technical university Bryansk

Recently, satellite remote sensing methods have become increasingly important [1]. This is due to the increase in the quality, quantity and availability of satellite images. Due to the large amount

of data, effective analysis of satellite images requires the use of machine learning methods. They are used to process, analyze and generate data suitable for further analysis by a specialist. The main source of data for monitoring the area is digital images obtained by artificial Earth satellites.

A big problem when studying the Earth surface from satellite images is clouds, since they can often cover a fairly large surface area. There are several solutions to this problem, such as using a cloud mask or detecting clouds using artificial neural networks, classification trees, Kohonen maps, and so on.

The paper offers an alternative approach to the selection of space images suitable for processing. The main idea is that it is proposed to proceed not from the parameters of clouds or distortions, but from the parameters of the area of interest and its characteristic points and parameters. To do this, we suggest using key points based on one of the known descriptors. In this case, the image is considered suitable for a series of images if and only if a predetermined percentage of the key points of the area of interest, calculated from the reference image, is found on the studied image.

The article investigates the work of key point detection methods with comparison methods in order to identify the best methods for working with satellite images.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, key point detectors, object comparison, vegetation index.

С.М. Липкин, В.А. Заиграев, М.С. Соколова

## АНАЛИЗ МИКРОФОТОГРАФИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

**Цель работы:** Разработка алгоритмов, обеспечивающих нахождение кластеров частиц на микрофотографиях конструкционных материалов.

**Методология:** Для анализа микрофотографий были отобраны методы поиска объектов на изображении и их комбинации. Каждый метод был запущен на изображениях из тестовой выборки, результат их работы был проверен вручную.

**Результаты:** Проведен сравнительный анализ эффективности работы предложенных методов нахождения объектов на изображении.

**Выводы:** Отобранные методы нахождения объектов на изображении будут применены в задачах анализа микрофотографий конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, гранулометрический анализ, дисперсность порошков.

### Введение

Современное развитие производства характеризуется как совершенствованием существующих, так и появлением новых отраслей. Так, к перспективным отраслям могут быть отнесены аддитивные технологии, основным сырьем для которых являются порошковые материалы, в частности порошки металлов и сплавов. Указанные порошки, характеризуются, помимо химического и фазового составов, гранулометрическим составом - распределением количества частиц в единице объема по геометрическим размерам. Гранулометрический состав определяет как возможности применения материала в технологическом процессе, так и конечные характеристики получаемой продукции. Методы его определения могут быть разделены на механические и оптические. Механические методы являются косвенными, а, следовательно, менее точными и основаны на применении декантирования. Оптические методы предполагают получение микрофотографий материала и статистический анализ получаемых изображений. Несмотря на потенциально высокую точность применение оптических методов в настоящее время значительно ограничено трудоемкостью обработки микрофотографий ввиду недостаточности уровня автоматизации данного процесса. Так, ГОСТ 23402-78 предполагает ручную обработку микрофотографий. В настоящей работе предложена структура системы автоматического анализа микрофотографий и реализация начального этапа ее работы - выделение кластеров.

### Система анализа микрофотографий

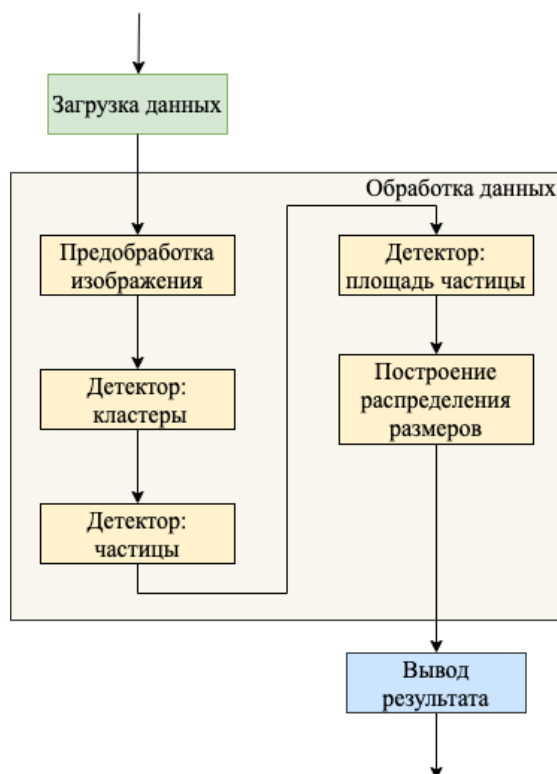
Исходными данными для указанной системы являются результаты работы электронного микроскопа - изображения частиц порошка. Данная система позволит на выходе получать информацию о распределении количества изображенных частиц по размерам в форме гистограммы и обнаруженных фрагментов изображения. Блок-схема процесса работы систе-



мы представлена на рис. 1. Согласно данной схеме работу системы можно разделить на несколько этапов, последовательно уточняющих результаты анализа:

- Локализация кластеров.
- Локализация частиц.
- Расчет площади.
- Расчет распределения размеров

Под кластерами при этом понимается фрагмент изображения, содержащий плотно расположенные частицы, вычисление площадей которых требует дополнительного анализа на этапе локализации частиц. Для каждой из локализованных частиц определяется площадь, которая используется при построении конечного распределения.



**Рисунок 1. Блок-схема автоматического гранулометрического анализа**

В рамках настоящей работы было рассмотрены методы компьютерного зрения, позволяющие наиболее эффективно решить задачу нахождения кластеров частиц на микрофотографии.

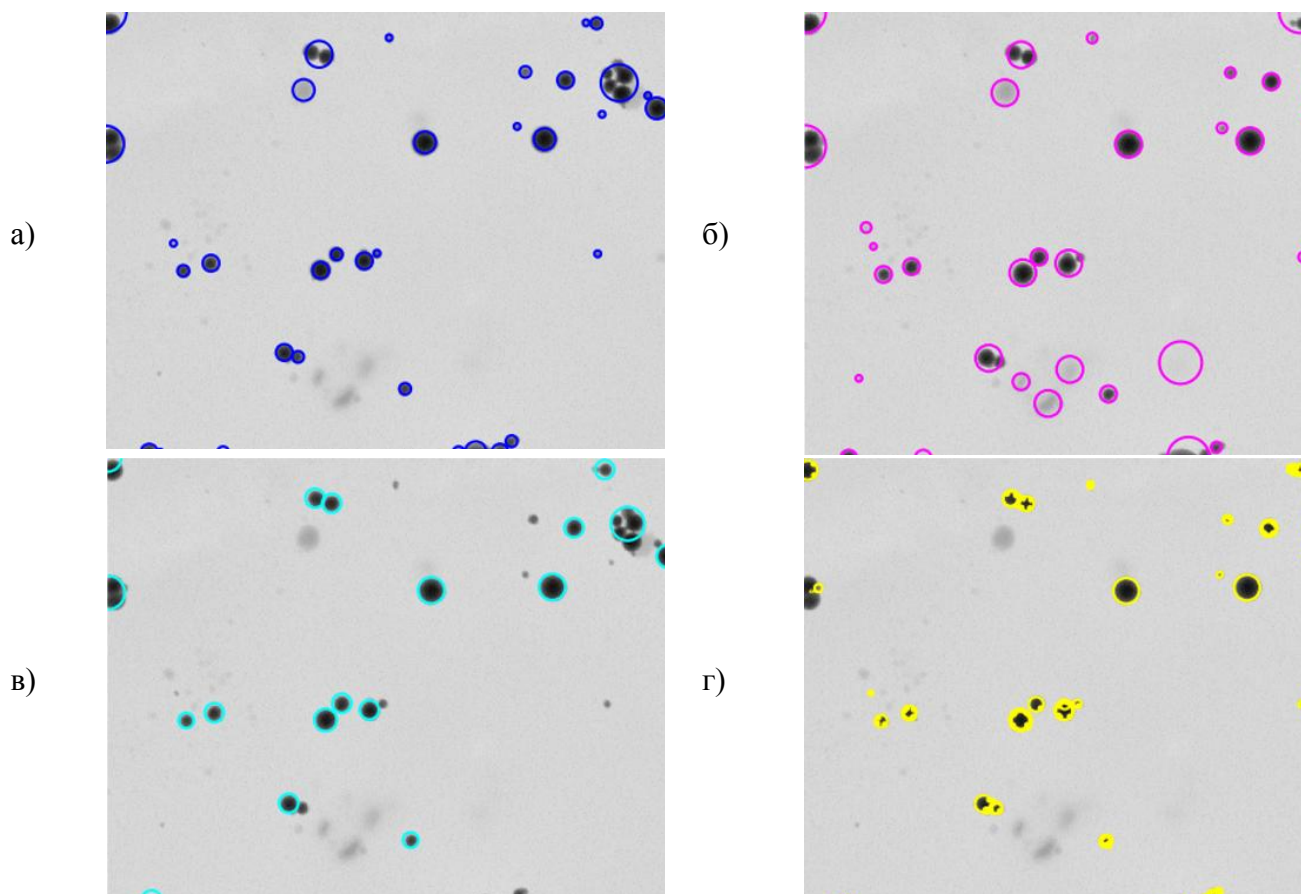
### **Методы выявления кластеров**

Рассмотренные методы можно условно разделить на два класса: методы, основанные на выделении границ (edgedetection), и методы, основанные на обнаружении пятен (blob detection).

В качестве метода, основанного на выделении границ, был выбран детектор границ Кэнни (Canny edge detector) с последующим выделением частиц с помощью преобразования Хафа (Circle Hough Transform) [1].

Среди алгоритмов, основанных на обнаружении пятен было выбрано 3 известных метода: Laplacian of Gaussian (LoG) [2], Difference of Gaussian (DoG) [3] и Determinant of Hessian (DoH) [4].

Для проверки качества работы алгоритмов был написан скрипт на языке Python с использованием инструментов библиотек OpenCV [5] и scikit-image [6]. Предоставленные для тестирования микрофотографии по очереди обрабатывались каждым алгоритмом, примеры работы каждого метода представлены на рис. 2. Полученные результаты сравнивались с ручной разметкой изображений, критерием качества было нахождение максимального количества существующих кластеров.



**Рисунок 1. Примеры результатов работы различных методов на тестовом изображении:**  
а - Laplacian of Gaussian, б – Difference of Gaussian, в – Determinant of Hessian, г – Hough transform

### Выводы

1. По результатам анализа 50 тестовых изображений, наилучший результат показал метод Laplacian of Gaussian, в большинстве случаев найдя наибольшее количество кластеров.
2. Близкие по качеству результаты могут быть получены с помощью преобразования Хафа для выделения отдельных частиц.
3. В дальнейшем возможно использование комбинаций методов, для того чтобы найти максимальное количество кластеров и минимизировать количество кластеров из нескольких частиц с неразличимой границей.
4. Также перспективным подходом является увеличение набора данных, с генерацией синтетических изображений. Это позволит применить более современные методы машинного обучения, в частности, нейронные сети, для поиска объектов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-00572.*

## Библиографический список

1. **Thurley, Matthew** (2014). "Measuring the visible particles for autoamted online particle size distribution estimation" IMPC 2014 - 27th International Mineral Processing Congress.
2. **Lowe, D. G.** (2004). "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". International Journal of Computer Vision. 60 (2): 91–110. Cite SeerX 10.1.1.73.2924. doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
3. **Lindeberg, T.** "Image matching using generalized scale-space interest points", Journal of Mathematical Imaging and Vision, volume 52, number 1, pages 3-36, 2015.
4. **Lindeberg, T.** (2013) "Image Matching Using Generalized Scale-Space Interest Points", Scale Space and Variational Methods in Computer Vision, Springer Lecture Notes in Computer Science Volume 7893, 2013, pp 355-367.
5. Документация scikit-image <https://scikit-image.org/docs/stable/>
6. Документация Open CV <https://docs.opencv.org/>

**S.M. Lipkin, V.A. Zaigraev, M.S. Sokolova**

### **ANALYSIS OF MICROPHOTOGRAPHIES OF STRUCTURAL MATERIALS BY METHODS OF COMPUTER VISION**

Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod

**Objective:** Development of algorithms for particle cluster detection in microphotography of structural materials.

**Methodology:** Several perspective object detections methods and their combinations were chosen. Each method has been tested on powder samples. Algorithm outputs were examined manually.

**Results:** The analysis of the efficiency of the proposed algorithms has been done.

**Conclusions:** Selected object detection methods may be used for solving problems of structural materials microphotography analysis.

**Keywords:** network models, evolutionary-genetic algorithms, multicriteria optimization, Pareto-optimal solutions.

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ  
ВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ И ВИДЕО**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В работе исследуется задача автоматического распознавания выражений лица по фотографиям. Предлагается метод, комбинирующий VIF признаки и ключевые точки лица для распознавания статических выражений лица (то есть по одной фотографии). VIF признаки приближенно моделируют схему работы зрительной коры головного мозга и представляют собой иерархический подход с двумя уровнями. На первом уровне изображение фильтруется с помощью фильтров Габора, на втором уровне вычисляются статистические признаки. Мы предлагаем использование ансамбля из двух моделей: одной, натренированной на основе VIF признаков, и другой, натренированной на ключевых точках лица. Также мы исследуем задачу определения динамических выражений по видео и предлагаем подход, использующий LBP-TOP описатели (описывающие изменения кадра во времени и обладающих свойством инвариантности к определенному типу глобальным вариациям яркости изображения) и Bag-of-Words модель (модель построения признаков на основе словаря). Предложенные подходы показали высокое качество работы на стандартном наборе данных ExtendedCohn-Kanade по сравнению с другими рассмотренными работами. В задаче определения статических выражений лица достигается средняя точность классификации 96.8%, а в задаче определения динамических выражений лица достигается средняя точность классификации 97.7%.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, распознавание эмоций, выражения лица, машинное обучение.

**Введение**

В последнее время наблюдается непрерывный рост интереса к задаче автоматического определения выражений лица (или эмоций) человека. Примером области, в которой автоматическое определение выражений лица находит непосредственное применение, являются маркетинговые исследования. Целью маркетинговых исследований является сбор информации об отклике аудитории на показываемое содержимое. Умение определять эмоции человека по фотографиям или видео, содержащим его лицо, также находит применение в следующих областях:

- создание человеко-машинных интерфейсов, в которых поведение системы подстраивается под пользователя,
- мониторинговые системы,
- биометрические системы,
- системы поиска изображений в больших базах данных.

В данной работе предлагаются два подхода к решению задачи автоматического определения эмоций. Один из подходов использует биологически-обусловленные признаки (bio-inspired features, VIF) для определения эмоций по выражениям лица на отдельно взятых фотографиях. До этого VIF описатели использовались в задаче автоматического определения возраста [1]. В работе мы исследуем их применимость в задаче определения эмоций и

показываем высокий результат по сравнению с другими известными методами, см. табл. 2.

Второй подход, предлагаемый в данной работе, отражает тот факт, что оценка эмоций человека по выражениям его лица, вообще говоря, могла бы выиграть от использования дополнительной информации о динамике выражения лица во времени. Вместо того, чтобы использовать выражение лица человека в конкретный момент времени, предлагается использовать видеопоследовательности, содержащие изменяющиеся выражения лица (от нейтрального до пикового проявления) одной эмоции. Мы сравниваем предложенный подход с другими известными методами (в том числе с первым подходом) и показываем высокое качество по сравнению с ними на стандартном наборе данных, см. табл. 2.

Для оценки качества работы методов мы использовали стандартный набор данных ExtendedCohn-Kanade (СК+) [12] который подробнее описан далее. В работе предложенных подходов используется разметка ключевых точки лица. В нашем случае мы использовали разметку, предоставляемую вместе с базой СК+. На практике разметка может быть получена в реальном времени с помощью, например, методов ASM, AAM [2,3].

### Автоматическое определение статических выражений лица

В данной секции мы рассматриваем задачу автоматического определения эмоций по отдельно взятым фотографиям, то есть *автоматическое определение статических выражений лица*.

Таблица 1

**Базовые классы эмоций, используемые в постановке задачи определения выражения лица. Приведено также количество последовательностей для каждой эмоции в базе СК+**

Номер	Эмоция	Количество последовательностей
0	Гнев	45
1	Смушение	18
2	Отвращение	59
3	Страх	25
4	Радость	69
5	Грусть	28
6	Удивление	83

Задача автоматического определения статического выражения лица человека по фотографии формулируется как задача машинного обучения, а именно как многоклассовая классификация. Пусть дан тренировочный набор данных, состоящий из  $m$  элементов:  $\langle (I_i, K_i, y_i^{\text{expr}}) \mid i=1..m \rangle$ , где  $I_i(x, y) \in \{0, 1, \dots, 255\}$  – это яркость пикселя  $x, y$  черно-белого изображения  $I_i$ ,  $(x_s, y_s) = K(s)$  –  $s$ -ая ключевая точка лица.  $X(I, K)$  – способ вычисления описателей по фотографии, а  $y_i^{\text{expr}} \in \{0, 1, \dots, 6\}$  – это истинный класс выражения лица (заданный номером), см. табл. 1. Цель заключается в том, чтобы по имеющимся данным построить модель  $y^{\text{expr}}(\cdot)$  и научиться определять выражение лица  $y^{\text{expr}}(X(I, K))$  для новых изображений, не представленных в базе (в том числе и для новых людей).

## Описание предложенного подхода

На первом этапе предлагаемого подхода осуществляется процедура нормализации лица. Цель этого шага заключается в том, чтобы нормализовать геометрию лица (размер, ориентацию, положение) и получить изображение фиксированного размера, а также выровнять яркость в изображении. Выравнивание яркости (фотометрическая нормализация) делается с целью обеспечения инвариантности описателей к изменениям условия освещения лица. Нормализация геометрии лица осуществляется за счет преобразования изображения таким образом, чтобы оба глаза оказались в заранее выбранных фиксированных точках выходного изображения размера  $66 \times 66$ . Более подробно процедура геометрической нормализации описана в работе [4]. Фотометрическая нормализация выполняется после корректировки геометрии лица. Для выравнивания яркости используется метод адаптивного выравнивания гистограммы [4, 5].

В работе [1] авторы предложили использование VIF признаков для решения задачи автоматического определения возраста. Мы используем VIF признаки для вычисления описателей изображения (после всех шагов нормализации) в задаче автоматического определения статических выражений лица. Шаг вычисления VIF описателей включает в себя применение нескольких линейных фильтров к нормализованному изображению и последующую нелинейную обработку. Подробнее данные два шага описаны далее. Размерность вектора описателей впоследствии понижается с помощью метода главных компонент [6].

Наконец для построения модели классификации по тренировочным данным используется метод опорных векторов с нелинейным ядром [8]. В качестве ядра мы используем радиальную базисную функцию  $RBF(x_1, x_2) = e^{-\gamma \|x_1 - x_2\|^2}$ , где параметр  $\gamma$  выбирается с помощью перекрестной проверки.

## Фильтрация изображений

Вычисление VIF признаков начинается с применения набора фильтров Габора к нормализованному черно-белому изображению. Фильтр Габора – это линейный фильтр, чье ядро можно рассматривать как двумерную функцию Гаусса модулированную косинусной волной в некотором направлении. Ядро задаётся следующим образом:

$$(x, y) = \exp\left(\frac{-\bar{x}^2 + \gamma^2 \bar{y}^2}{2 * \sigma^2}\right) \quad (1)$$

где  $\bar{x} = x \cos \theta + y \sin \theta$ ,  $\bar{y} = -x \sin \theta + y \cos \theta$ ,  $\theta$  – ориентация,  $s$  – размер фильтра,  $x, y \in \left\{-\frac{s}{2} \dots \frac{s}{2}\right\}$ ,  $\gamma$  – коэффициент сжатия,  $\sigma^2$  – дисперсия,  $\lambda$  – длина волны,  $\phi$  – сдвиг фазы волны.

Следующий шаг вычисления биологически обусловленных признаков, идущий после применения фильтров, заключается в попарном слиянии полученных на предыдущем шаге результатов фильтрации. Все отфильтрованные изображения разбиваются на пары: в каждой паре изображения соответствуют разным, но близким по параметрам  $s, \sigma, \lambda$  фильтрам Габора с одинаковыми ориентациями  $\theta$ . Далее в каждой паре изображения сливаются в одно, путём применения попиксельной операции взятия максимума:

$$F_k = \max(I * G_{2k}, I * G_{2k+1}), \quad (2)$$

где  $k$  – номер пары отфильтрованных изображений, знак  $*$  – означает операцию применения фильтра. Операция линейной фильтрации изображения  $I$  с фильтром  $G$  размера  $s \times s$  выполняется следующим образом:  $F(x, y) = \sum_{\substack{-s \leq i \leq s \\ -s \leq j \leq s}} I(x+i, y+j) G(i, j)$ , где  $F = I * G$  – это результат фильтрации.

Использование максимумов, а не непосредственно выходов от фильтров, повышает устойчивость признаков к незначительным двумерным трансформациям, таким как, например, изменение масштаба. Количество фильтров, а также их параметры приведены в работе [1].

### Статистические признаки

Данный шаг предполагает применение техники «скользящего окна» по изображениям  $F_k$ , полученным на предыдущем шаге слияния отфильтрованных изображений. В каждом окне с координатами верхнего левого угла  $(x_0, y_0)$ , и размером  $N_k \times N_k$ , мы вычисляем стандартное отклонение для значений элементов из окна:

$$C_{x_0, y_0, k} = \sqrt{\frac{1}{N_k^2} \sum_{(x, y) \in [1, N_k]^2} (F_{x_0, y_0, k}(x, y) - \bar{F}_{x_0, y_0, k})^2}, \quad (3)$$

где  $F_{x_0, y_0, k}(x, y)$  – элемент  $(x, y)$  текущего окна в изображении  $F_k$ ,  $\bar{F}_{x_0, y_0, k}$  – среднее значение элементов текущего окна. Конкретные значения размеров окон  $N_k$  для каждого  $k=1..8$  приводятся в работе [1]. Вычисленные значения стандартных отклонений формируют биологически обусловленные признаки. Чтобы уменьшить количество признаков используются не все позиции скользящего окна: окно перемещается с шагом, равным половине своего размера.

### Объединение моделей

Для того чтобы учесть информацию о геометрии лица, мы строим дополнительную модель. В ней в качестве описателей изображения используется 136-мерный вектор, содержащий координаты всех 68 ключевых точек лица (после применения преобразования подобия в шаге геометрической нормализации), идущих вместе с базой СК+. По описателям строится модель с помощью метода опорных векторов с RBF ядром.

Объединение результатов работы двух разных моделей: натренированной на ВІГ признаках и на геометрических признаках (ключевых точках) путем слияния оценок вероятностей. Пусть  $P_1\langle Y=y_i | X_1 \rangle$  – оценка вероятности, согласно первой модели, что объект (т.е. изображение) принадлежит классу  $c_i$ , соответственно  $P_2\langle Y=y_i | X_2 \rangle$  – то же самое, но для второй модели, а  $X_1, X_2$  – это признаки изображения, полученные в рамках первой и второй моделей соответственно. Рассматривается следующая эвристическая функция уверенности:  $S\langle Y=y_i | X_1, X_2 \rangle = P_1\langle Y=y_i | X_1 \rangle P_2\langle Y=y_i | X_2 \rangle$ , которая комбинирует оценки вероятностей принадлежности объекта к каждому классу для двух разных моделей. В итоге в качестве финальной оценки класса используется значение с максимальной уверенностью:  $y = \arg\max_{y=0..6} S\langle Y=y | X_1, X_2 \rangle$ . Данный подход объединяет две модели в одну, превосходящую по качеству каждую из входящих в ее состав по отдельности. Результаты работы метода приведены в табл. 2

### Автоматическое определение динамических выражений лица

Единственное отличие постановки задачи *автоматического определения динамических выражений лица* заключается в том, что вместо изображений работа осуществляется с видеопоследовательностями произвольной длины. Соответственно каждый элемент

тренировочного набора данных  $\langle (V_i, K_i, y_i^{\text{expr}}) | i=1, m \rangle$  представляет собой черно-белую видеопоследовательность  $V$ , где  $V(x, y, t)$  – это яркость пикселя  $(x, y)$  кадра  $t$ ,  $(x_{t,s}, y_{t,s}) = K(t, s)$  –  $s$ -ая ключевая точка лица в кадре  $t$ . Признаки вычисляются по видеопоследовательностям с помощью функции  $X(V, K)$ . Последовательности могут иметь произвольную длину, но описатель вычисленный по ней имеет фиксированную длину.

При решении задачи автоматического определения динамических выражений лица мы не выполняем шаги геометрической и фотометрической нормализаций. Вместо этого для построения описателей используется модель Bag-of-Words (BoW), использующая в качестве локальных описателей LBP-TOP признаки. Для построения модели классификации по тренировочным данным используется метод опорных векторов с нелинейным ядром, так же, как и в задаче автоматического определения статических выражений лица. Более подробно LBP-TOP описатели и BoW модель описаны далее.

### LBP-TOP описатели

Локальные бинарные [9] широко распространены в компьютерном зрении и используются в качестве признаков, описывающих текстуру изображения и обладающих свойством инвариантности к глобальным монотонным изменениям в яркости изображения.

Пусть дано черно-белое изображение  $I(x, y) \in \{0, 1, \dots, 255\}$  размера  $W \times H$ , где  $W$  и  $H$  – это ширина и высота изображения соответственно. Локальный бинарный оператор LBP применяется к исходному изображению, в результате чего получается преобразованное изображение  $LBP_I(x, y)$  того же размера. Преобразование осуществляется следующим образом:

$$LBP_I(x, y) = \sum_{p=0}^{P-1} 2^p H \left( I \left( x + R \cos \frac{2p\pi}{P}, y + R \sin \frac{2p\pi}{P} \right) - I(x, y) \right), \quad (4)$$

где  $P$  – это число точек на окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $(x, y)$ , используемых для сравнения с яркостью центрального пикселя  $I(x, y)$ , а  $H(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ 0, & \text{если } x \leq 0 \end{cases}$  – это пороговая функция.

В результате применения оператора на выходе получается изображение, значение яркости каждого пикселя которого является целым числом в отрезке  $[0, 2^P]$ . После применения оператора для получения LBP описателей изображения  $I$ , характеризующих его текстуру, строится гистограмма распределения значений в  $LBP_I(x, y)$ . Построенная гистограмма представляет собой вектор-признак размерности  $2^P$ .

LBP оператор может быть использован, в том числе, и для описания не только изображений, но и видео. В работе [10] был предложен описатель LBP-TOP. В процессе вычисления LBP-TOP описателя видео  $V(x, y, t)$  задача сводится к вычислению LBP описателей трех ортогональных сечений:  $V_{x=x_c}(y, t)$ ,  $V_{y=y_c}(x, t)$ ,  $V_{t=t_c}(x, y)$ , где  $(x_c, y_c, t_c)$  – это центр видео (по пространственным координатам и времени). Каждое такое сечение представляет собой двухмерное изображение, для которого LBP описатели вычисляются описанным выше способом. Полученные векторы-признаки затем объединяются в один описатель размерности  $3 * 2^P$ . В нашем случае  $R=3, P=8$ .



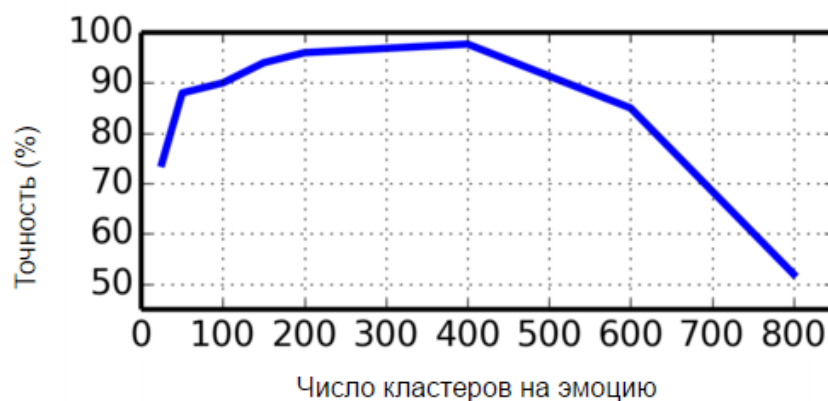
## Bag-of-Words модель

Модель BoW (Bag-of-Words) применяется в машинном обучении для классификации текстов на естественном языке, извлечение информации из документов, а также в компьютерном зрении [11]. Мы используем BoW модель для построения описателей фиксированной длины видеопоследовательностей, которые могут варьироваться по своей продолжительности (количеству кадров). Для построения описателей мы также предлагаем использование ключевых точек лица, в окрестности размера  $17 \times 17 \times 9$  которых вычисляются LBP-TOP описатели, и которые уже затем используются в BoW модели.

В процессе тренировки LBP-TOP описатели вычисляются для каждой ключевой точки каждого кадра всех тренировочных видеопоследовательностей. Собранные таким образом локальные описатели используются для построения словаря BoW модели: с помощью метода k-средних [7] во множестве локальных описателей находятся кластеры. Центры наибольших кластеров (их количество является параметром модели, см. рисунок) образуют словарь “визуальных слов” модели. После того как словарь подготовлен, любая видеопоследовательность может быть представлена с помощью вектора-описателя фиксированной размерности с помощью следующего алгоритма:

1. Для каждого кадра исходной видеопоследовательности вычислить LBP-TOP описатели (локальные описатели) в окрестности каждой ключевой точки.
2. Для каждого локального описателя найти ближайшее (в смысле L2 нормы) слово из словаря.
3. Составить гистограмму частот встречаемости слов из словаря в исходной видеопоследовательности. Получившая гистограмма, после нормировки суммы элементов, образует финальный описатель.

На стадии тренировки размер словаря подбирается с помощью процедуры перекрестной проверки (разбиение исходной выборки осуществляется по субъектам) [1].



### Зависимость средней точности классификации динамических выражений лица от числа кластеров (для каждой эмоции) выбранных для словаря

Размерность пространства признаков понижается с помощью метода главных компонент [6]. В методе главных компонент финальная размерность выбирается таким образом, чтобы след эмпирической ковариационной матрицы после перехода в пространство признаков меньшей размерности составлял не менее 95% от следа исходной эмпирической ковариационной матрицы. После понижения размерности векторы описатели используются в методе опорных векторов [8] с RBF ядром для классификации динамических выражений лица.

## Вычислительные эксперименты

В качестве тестового набора фотографий с разметкой базовых человеческих эмоций использовалась база Extended Cohn-Kanade (СК+) [12]. База содержит 593 последовательности фотографий, но только 327 из них имеют разметку выражения лица. Среди этих 327 последовательностей представлены 118 субъектов из 123. Каждая последовательность начинается с фотографии нейтрального лица, то есть без эмоций и заканчивается пиковым выражением эмоции. К базе изображений также прилагается разметка 68 ключевых точек лица для каждого кадра. Распределение эмоций в базе СК+ приведено в табл. 1.

В табл. 2 представлены экспериментальные результаты работы двух предложенных подходов на стандартном наборе данных СК+. В случае работы с отдельными изображениями, а не с видеопоследовательностями, использовались только пиковые (то есть последние) кадры последовательностей. Для оценки качества использовалась процедура перекрестной проверки. Средняя точность классификации определяется, как среднее значения точности классификации для каждого класса по отдельности – отношение числа правильно классифицированных экземпляров класса к числу истинных экземпляров данного класса.

**Таблица 2**

**Сравнение качества работы двух предложенных подходов (отмечены жирным) с другими известными работами на стандартном наборе данных СК+.**

Подход, год, статья	Средняя точность классификации (%)	Динамические выражения лица или нет
Baseline, 2010 [12]	83.3	Нет
Shape+SVM, 2011 [13]	84.06	Нет
CSPL, 2012 [14]	89.9	Нет
SVM+LBP, 2009 [15]	92.6	Нет
<b>Предложенный подход определения статических выражений лица</b>	96.8	Нет
ITBN, 2013 [16]	86.3	Да
Cov3D, 2013 [17]	92.3	Да
LDCRF, 2011 [18]	95.79	Да
BCSFMC, 2010 [19]	96.32	Да
<b>Предложенный подход определения динамических выражений лица</b>	97.7	Да

Из табл. 2 видно, что предложенные подходы показывают высокое качество работы по сравнению с другими рассмотренными работами. Алгоритм автоматического определения динамических выражений превосходит по средней точности классификации все другие рассмотренных подходы.

## Заключение

В работе были предложены два подхода к решению задачи автоматического определения эмоций (выражений лица). Один подход, распознающий статические выражения лица по отдельным взятым фотографиям, учитывающий не только внешний вид лица, но также и его геометрию. Новизна подхода заключается в использовании ВІF признаков применительно к задаче классификации выражения лиц, а также в объединении двух разных моделей: использующей непосредственно изображения и использующей ключевые точки лица. Другой предложенный подход распознает динамические выражения лица по видеопоследовательностям. Новизна подхода заключается в использовании LBP-ТОР описателей непосредственно в окрестностях ключевых точек лица для построения ВоW модели, что избавляет от необходимости использования сложных методов выравнивания геометрии и яркости лица. Вычислительные эксперименты показывают, что методы достигают высокого качества на стандартном наборе данных СК+ по сравнению с другими известными работами. Более того, второй подход превосходит все рассмотренные методы, достигая средней точности распознавания в 97.7%.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №18-41-520002, №19-31-90086, №19-01-00289.*

## Библиографический список

1. Guo, Guodong, GuowangMu, Yun Fu, and Thomas S. Huang. Human age estimation using bio-inspired features. // *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on.* 2009. 112-119.
2. Milborrow, Stephen, and Fred Nicolls. Locating facial features with an extended active shape model. // *Computer Vision–ECCV 2008. Springer Berlin Heidelberg.* 2008. 504-513.
3. Cootes, Timothy F., Gareth J. Edwards, and Christopher J. Taylor. Active appearance models. // *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 6. 2001. 681-685.
4. **Спижевой, А.С.** Автоматическое оценивание возраста человека с использованием адаптивного выравнивания яркости и биологически обусловленных признаков / А.С. Спижевой, А.И. Оголихина, А.В. Бовырин // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 1-1 (1). 2014.
5. Benitez-Garcia, G.; Olivares-Mercado, J.; Aguilar-Torres, G.; Sanchez-Perez, G.; Perez-Meana, H. Face Identification Based on Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). // *Image processing, computer vision, & pattern recognition. IPCV.* 2011.
6. H. Abdi and L. J. Williams. Principal component analysis. // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4). 2010. 433–459.
7. Jain, Anil K. Data clustering: 50 years beyond K-means. // *Pattern recognition letters* 31.8. 2010. 651-666.
8. Воронцов, К. В. Лекции по методу опорных векторов. // *ВЦ РАН, М.: URL: <http://www.ccas.ru/voron/download/SVM.pdf> (дата обращения: 03.03.12).*
9. Ojala, Timo, MattiPietikäinen, and TopiMäenpää. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 24.7. 2002. 971-987.
10. Zhao, Guoying, and MattiPietikainen. Dynamic texture recognition using local binary patterns with an application to facial expressions. // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 29.6. 2007. 915-928.
11. Yang, Jun, Yu-Gang Jiang, Alexander G. Hauptmann, and Chong-Wah Ngo. Evaluating bag-of-visual-words representations in scene classification. // *Proceedings of the international*

*workshop on Workshop on multimedia information retrieval. ACM, 2007.*

12. Lucey, Patrick, et al. The extended Cohn-Kanade dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression. // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2010.*

13. Jain, Suyog and Hu, Changbo and Aggarwal, Jake K. Facial expression recognition with temporal modeling of shapes. // *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on. 2011. 1642-1649.*

14. Zhong, Lin et al. Learning active facial patches for expression analysis. // *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. 2012. 2562-2569.*

15. Shan, Caifeng and Gong, Shaogang and McOwan, Peter W. Facial expression recognition based on local binary patterns: A comprehensive study. // *Image and Vision Computing. Elsevier. No. 6. 2009. 803-816.*

16. Wang, Ziheng and Wang, Shangfei and Ji, Qiang. Capturing Complex Spatio-Temporal Relations among Facial Muscles for Facial Expression Recognition. // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2013. 3422-3429*

17. Sanin, Andres et al. Spatio-temporal covariance descriptors for action and gesture recognition. // *arXiv preprint arXiv:1303.6021. 2013.*

18. Jain, Suyog and Hu, Changbo and Aggarwal, Jake K. Facial expression recognition with temporal modeling of shapes. // *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on. 2011. 1642-1649.*

19. Huang, Xiaohua et al. Dynamic facial expression recognition using boosted component-based spatiotemporal features and multi-classifier fusion. // *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Springer. 2010. 312-322.*

**A.S. Spizhevoy, D.V. Balandin**

## **AUTOMATIC STATIC AND DYNAMIC FACIAL EXPRESSION ESTIMATION BY IMAGES AND VIDEOS**

N. I. Lobachevskystate university of Nizhny Novgorod

**Purpose:** In this paper we address the problem of automatic static and dynamic facial expression estimation by face image.

**Design/methodology/approach:** We propose to use an ensemble of two models for estimating static facial expression. One uses biologically inspired features as face descriptors. Such features approximately model how visual cortex works and compute features in a hierarchical fashion. First a number of Gabor filters are applied to source image. Then statistical features are computed. The other one uses facial keypoints as descriptors. For dynamic facial expression estimation we propose using a combination of LBP-TOP descriptors that allows to capture change of image in time with Bag-of-Words model for building higher level descriptors.

**Findings:** The proposed static facial expression estimation approach achieves average classification accuracy of 96.8%. The dynamic facial expression estimation approach achieves average classification accuracy of 97.7%. Both outperform the other considered approaches on the standard Extended Cohn-Kanade dataset.

**Research limitations/implications:** The method assume that 68 facial keypoints are available for each frame. In practice they can be found using existing tools.

**Originality/value:** Compared automatic static and dynamic facial expression estimation approaches. The approaches can be used in practice in digital signage applications and for market analysis.

**Keywords:** static facial expression, dynamic facial expression, human emotions, biologically inspired features, machine learning.

А.С. Спижевой, Д.В.Баландин

**БИОЛОГИЧЕСКИ-ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПРИЗНАКИ В ЗАДАЧАХ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА И ВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В работе рассматриваются две задачи из области распознавания лиц: задачу автоматического определения возраста человека и задачу автоматического определения эмоций человека по фотографиям. Задача определения эмоций сводится к определению выражения лица по изображению. В данной работе рассматривается применимость одних и тех же биологически обусловленных признаков (BIF) в двух разных задачах. BIF признаки приближенно моделируют схему работы зрительной коры головного мозга и представляют собой иерархический подход с двумя уровнями. На первом уровне изображение фильтруется с помощью фильтров Габора, на втором уровне вычисляются статистические признаки. Для определения возраста используется метод, основанный на ранжировании. Для определения выражения лица используется ансамбль из двух моделей: основанной на биологически-обусловленных признаках и на ключевых точках лица. Одни и те же описатели, а также одни и те же процедуры геометрической и фотометрической нормализации лица, позволяют достичь на стандартной базе FG-NET средней ошибки определения возраста в 4.1 года, а на базе Extended Cohn-Kanade достигнуть средней точности классификации в 96.8%.

**Ключевые слова:** определение возраста, определение эмоций, определение выражений лица, машинное обучение.

**Введение**

В последнее время наблюдается непрерывный рост интереса к задаче из области распознавания лиц. Данное направление включает в себя такие задачи как автоматическое определение возраста человека, его эмоций (или выражений лица) и т.р. Примером одной из областей, где подобные решения находят непосредственное применение, являются маркетинговые исследования. Целью маркетинговых исследований является сбор информации об аудитории (например, статистика по возрастам) и ее отклике на показываемые содержимое (статистика по эмоциям).

Автоматическое оценивание возраста человека является достаточно сложной задачей. Изменение внешности человека во времени включает в себя два процесса: изменение геометрических параметров лица, то есть его формы и размеров, а также изменение текстуры кожи. Если первый процесс проходит с наибольшей интенсивностью в детстве, то интенсивность второго начинает преобладать по мере достижения зрелого возраста. И хотя интенсивность этих процессов варьируется в зависимости от времени, они всегда идут одновременно и для точного оценивания возраста необходимо учитывать в комплексе как геометрические, так и текстурные изменения лица.

Задача автоматического оценивания возраста заключается в определении возраста или возрастной группы по изображению лица. Существующие на данный момент подходы можно примерно разделить на два подкласса, в зависимости от используемого ими типа алгоритма машинного обучения: классификация [1,2] или регрессия [3,4]. Однако существуют и гибридные системы, составляющие меньшинство, которые используют оба

подхода, см. например [5].

Ввиду сложности процесса изменения лица по мере старения, самому человеку порой не под силу определить точный возраст по фотографии. Задачу осложняет также то, что изменение внешности с течением времени носит индивидуальный характер, зависит от многих факторов, таких как пол, условия окружающей среды, образ жизни, наследственность, этническое происхождение. Из-за влияния этих и других факторов внешность человека может не соответствовать его реальному возрасту, что осложняет задачу оценивания и приводит к увеличению ошибки. Положение головы, наличие макияжа, освещенность в момент фотографирования также могут приводить к ошибкам в определении возраста.

Также в данной работе предлагается подход к определению эмоций по выражениям лица. Или, иначе говоря, определению выражений лица по фотографии. Все сложности, возникающие в задаче определения возраста, справедливы и в случае определения выражения лица.

### Геометрическая нормализация

Геометрическая нормализация позволяет сделать описатели лица инвариантными к таким двумерным геометрическим трансформациям, как изменение масштаба, поворот и сдвиг. Суть прилагаемого подхода состоит в применении такого геометрического преобразования к исходному изображению, которое переводит центры глаз в две фиксированные и выбранные заранее точки. Таким способом масштаб лица, ориентация в плоскости изображения и сдвиг будут зафиксированы.

Пусть  $p_{le} = (x_{le}, y_{le})^T$  и  $p_{re} = (x_{re}, y_{re})^T$  – это координаты центров левого и правого глаз на исходном изображении  $I$ . Используя преобразование подобия, которое является комбинацией поворота, масштабирования и сдвига, точки  $p_{le}$  и  $p_{re}$  переводятся в фиксированные точки  $\bar{p}_{le} = (0.78W, 0.25H)^T$  и  $\bar{p}_{re} = (0.22W, 0.25H)^T$ , где  $W$  и  $H$  – это желаемые ширина и высота изображения после геометрической нормализации. Координаты фиксированных точек (новое положения глаз)  $\bar{p}_{le}$  и  $\bar{p}_{re}$  были подобраны экспериментально.

Информация об исходном расположении глаз бралась из данных базы FG-NET [6]. В реальных приложениях координаты глаз могут быть найдены при помощи заранее обученных детекторов признаков лица. Библиотека OpenCV [7], например, содержит обученные детекторы глаз.

### Нормализация яркости

Данный шаг позволяет исключить нежелательное влияние вариации освещенности в изображении на описатели лица. Без нормализации яркости неравномерность освещения, недостаточная или избыточная освещённость влияют на описатели, не несут никакой полезной информации и, следовательно, ухудшают точность оценивания возраста.

Мы применяем контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы (contrast-limited adaptive histogram equalization, CLAHE) [8, 9]. Обычное выравнивание гистограммы применяется к чёрно-белому изображению  $I$ , и преобразует его таким образом, чтобы гистограмма яркостей выходного изображения примерно отвечала равномерному закону распределения. Однако, если распределение яркостей на исходном изображении сильно геометрически неоднородно, например, одна половина лица намного ярче другой из-за падающей на лицо тени, то в таком случае обычный метод глобального выравнивания

гистограммы работает недостаточно хорошо, т.к. после нормализации одна половина лица все равно окажется ярче другой. В случае геометрически неоднородного распределения яркостей желательно получить в результате нормализации более однородное распределение на выходном изображении, т.к. это может улучшить точность оценивания возраста.

Адаптивное выравнивание гистограммы, в отличие от глобального, анализирует небольшие участки изображения и позволяет усилить локальный контраст, не делая предположений о распределении яркостей на всем изображении. Для каждого пикселя рассматривается только небольшая окрестность изображения, по которой строится функция преобразования, при этом все изображение, как таковое, не используется. Однако такой подход склонен к зашумлению однородных областей изображения. В таких областях интегральная кривая  $F(l)$ , вычисляемая на первом шаге работы алгоритма выравнивания гистограммы, будет иметь резкий наклон из-за того, что большое число пикселей имеют схожую яркость. Это приведёт к тому, что два близких значения яркости на изображении  $I$  будут отображены в сильно разные по значению яркости на изображении  $I'$ . Чем меньше размер окрестности, тем больше однородных областей и тем сильнее будет зашумление.

Добавление ограничения перепада яркости позволяет избавиться от эффекта зашумления. Алгоритм с такой модификацией называется контрастно-ограниченным адаптивным выравниванием гистограммы и включает в себя следующие шаги:

1. Для каждого пикселя с координатами  $p=(x,y)$  на изображении  $I$ :
  1. Вычислить гистограмму  $H_{p,k}(l)$  окрестности пикселя  $p$  размера  $k \times k$
  2. Обрезать гистограмму  $(H_{p,k}(l), T)$  по заданному порогу  $T$
  3. Перераспределить срезанные значения яркости гистограммы  $\tilde{H}_{p,k}(l)$  так, чтобы высота бинов не превосходила значения порога  $T$ , и получить новую гистограмму  $\bar{\bar{H}}_{p,k}(l)$
  4. По гистограмме вычислить интегральную функцию распределения  $F_{p,k}(l) = \sum_{i=0}^l \bar{\bar{H}}_{p,k}(i)$
  5. Вычислить яркость пикселя выходного изображения  $I'(x,y) = 255F_{p,k}(I(x,y))$
2. Для каждого пикселя с координатами  $p=(x,y)$  на изображении  $I$ :
  1. Вычислить гистограмму  $H_{p,k}(l)$  окрестности пикселя  $p$  размера  $k \times k$
  2. Обрезать гистограмму  $(H_{p,k}(l), T)$  по заданному порогу  $T$
  3. Перераспределить срезанные значения яркости гистограммы  $\tilde{H}_{p,k}(l)$  так, чтобы высота бинов не превосходила значения порога  $T$ , и получить новую гистограмму  $\bar{\bar{H}}_{p,k}(l)$
  4. По гистограмме вычислить интегральную функцию распределения  $F_{p,k}(l) = \sum_{i=0}^l \bar{\bar{H}}_{p,k}(i)$
  5. Вычислить яркость пикселя выходного изображения  $I'(x,y) = 255F_{p,k}(I(x,y))$ .
  - 6.

### Биологически обусловленные признаки

Биологически обусловленные признаки [1,2] были разработаны для приближенного моделирования процесса восприятия визуальной информации клетками зрительной коры головного мозга млекопитающего, см. [4]. Входной информацией для алгоритма является чёрно-белое изображение. Процесс вычисления признаков включает в себя следующие шаги:

1. Для каждого  $\theta$  из заранее выбранного множества углов:
  - 1.1. Применить множество фильтров Габора к исходному изображению  $I$
  - 1.2. Выполнить пост-обработку результатов работы фильтров
  - 1.3. Вычислить статистические признаки по обработанным результатам от фильтров

#### 1.4. Объединить все признаки в один вектор

Всего применяется 16 фильтров с разными параметрами для 8 разных ориентаций в диапазоне [0,180], итого 128 фильтров. Значения параметров для 16 фильтров приведены в [1].

### Автоматическое определение возраста

В качестве подхода, используемого для оценивания возраста по описателям лица, использует метод, основанный на ранжировании. Пусть имеется множество запросов  $Q$  и описателей  $D$ . Целью обучения ранжированию является построение такой модели  $f(q, d)$  которая на выходе даёт меру соответствия того, насколько хорошо объект  $d \in D$  соответствует данному запросу  $q \in Q$ . Предполагается, что мера соответствия принадлежит некоторому линейно упорядоченному множеству  $Y$ , см. [10]. После построения такой модели можно, например, ранжировать документы мере их соответствия некоторому запросу, как это делается в поисковых системах. Однако обучение ранжированию также оказывается удобным техникой для оценивания возраста, т.к. позволяет разбить исходную постановку задачи на множество подзадач, каждая из которых отвечает на вопрос “старше ли данный человек  $k$  лет?”. Такие вопросы составляют множество запросов  $Q$  в терминах постановки задачи обучения ранжированию. Главное преимущество такого подхода является моделирование важного свойства процесса старения – неоднородности для разных возрастных групп, т.е. закон старения может описываться по-разному в разные годы. Что действительно имеет место, потому что, как отмечалось ранее во введении, до определенного возраста при старении преобладает процесс изменения формы черепа, а только затем начинает преобладать старение кожи. Строя разные бинарные классификаторы для ответа на каждый вопрос описанного типа, мы явно учитываем временную неоднородность процесса старения.

Пусть  $X_i$  – это описатель  $i$ -го лица в тренировочной выборке, которому соответствует истинный возраст  $y_i, y_i \in \{0, \dots, K\}$ , где  $K$  – это максимально допустимый возраст (максимальный наблюдаемый возраст человека в обучающей выборке). Возрастная метка 0 означает возраст до одного года. Для каждого возможного возраста  $k$  мы разделяем тренировочный набор данных на две части следующим образом:

$$X_k^+ = \{(X_i, 1) | y_i > k\} X_k^- = \{(X_i, 0) | y_i \leq k\} \quad (1)$$

Два этих множества используются для тренировки множества бинарных классификаторов  $\{f_k\}$ , каждый из которых отвечает, соответственно, на вопрос: “старше ли данный человек, чем  $k$  лет или нет?”. Чтобы получить финальную оценку возраста к входному вектору признаков применяется все  $K$  бинарных классификаторов. Выходное значение равно числу классификаторов ответивших положительно на соответствующий вопрос, т.е.:

$$\hat{y}(X(I)) = \sum_{k=0}^{K-1} f_k(X(I)) \quad (2)$$

Для построения классификаторов использовался метод классификации с помощью машины опорных векторов (supportvectormachine, SVM, см. [11]) с RBF ядром, реализованный в библиотеке OpenCV.

### Автоматическое определение статических выражений лица

В данной секции мы рассматриваем задачу автоматического определения эмоций по отдельно взятым фотографиям, то есть *автоматическое определение статических*



выражений лица.

Задача автоматического определения статического выражения лица человека по фотографии формулируется как задача машинного обучения, а именно как многоклассовая классификация. Пусть дан тренировочный набор данных, состоящий из  $m$  элементов:  $\langle (I_i, K_i, y_i^{\text{expr}}) | i=1..m \rangle$ , где  $I_i(x, y) \in \{0, 1, \dots, 255\}$  – это яркость пикселя  $x, y$  черно-белого изображения  $I_i$ ,  $(x_s, y_s) = K(s)$  –  $s$ -ая ключевая точка лица.  $X(I, K)$  – способ вычисления описателей по фотографии, а  $y_i^{\text{expr}} \in \{0, 1, \dots, 6\}$  – это истинный класс выражения лица (заданный номером), см. табл. 1. Цель заключается в том, чтобы по имеющимся данным построить модель  $y^{\text{expr}}(\cdot)$  и научиться определять выражение лица  $y^{\text{expr}}(X(I, K))$  для новых изображений, не представленных в базе (в том числе и для новых людей).

**Таблица 1**

**Базовые классы эмоций, используемые в постановки задачи определения выражения лица.**

**Приведено также количество последовательностей для каждой эмоции в базе СК+**

Номер	Эмоция	Количество последовательностей
0	Гнев	45
1	Смушение	18
2	Отвращение	59
3	Страх	25
4	Радость	69
5	Грусть	28
6	Удивление	83

На первом этапе предлагаемого подхода осуществляется процедура нормализации лица (описана ранее). Далее мы используем VIF признаки для вычисления описателей изображения (после всех шагов нормализации). Наконец для построения модели классификации по тренировочным данным используется метод опорных векторов с нелинейным ядром [11]. В качестве ядра мы используем радиальную базисную функцию  $RBF(x_1, x_2) = e^{-\gamma \|x_1 - x_2\|^2}$ , где параметр  $\gamma$  выбирается с помощью перекрестной проверки.

### Объединение моделей

Для того чтобы учесть информацию о геометрии лица, мы строим дополнительную модель, где в качестве описателей изображения используется 136-мерный вектор, содержащий координаты всех 68 ключевых точек лица (после применения преобразования подобия в шаге геометрической нормализации), идущих вместе с базой СК+. По описателям строится модель с помощью метода опорных векторов с RBF ядром.

Объединение результатов работы двух разных моделей: натренированной на VIF признаках и на геометрических признаках (ключевых точках) путем сияния оценок вероятностей. Пусть  $P_1\langle Y=y_i | X_1 \rangle$  – оценка вероятности, согласно первой модели, что объект (т.е. изображение) принадлежит классу  $c_i$ , соответственно  $P_2\langle Y=y_i | X_2 \rangle$  – то же самое, но для второй модели, а  $X_1, X_2$  – это признаки изображения, полученные в рамках первой и второй моделей соответственно. Рассматривается следующая эвристическая функция уверенности:  $S\langle Y=y_i | X_1, X_2 \rangle = P_1\langle Y=y_i | X_1 \rangle P_2\langle Y=y_i | X_2 \rangle$ , которая комбинирует оценки вероятностей принадлежности объекта к каждому классу для двух разных моделей. В итоге в качестве финальной оценки класса используется значение с максимальной уверенностью:

$y = \operatorname{argmax}_{y=0..6} S\{Y=y|X_1, X_2\}$ . Данный подход объединяет две модели в одну, превосходящую по качеству каждую из входящих в ее состав по отдельности. Результаты работы метода приведены в табл. 3.

### Вычислительные эксперименты

Эксперименты проводились на стандартном тестовом наборе данных – базе изображений FG-NET [6]. Данная база содержит 1002 фотографии 82 различных людей, по несколько изображений на человека, в возрасте от младенчества до 69 лет. Вместе с фотографиями и возрастными метками в базе доступны 68 ключевых точек лица, из которых в нашей системе используются только центры глаз на шаге геометрической нормализации. Распределение возрастов в базе неравномерно, т.к. большая часть изображений (около 90%) соответствует возрастам до 30-ти лет.

Используются две широко распространенные меры качества работы алгоритмов оценивания возраста. Первая – это средняя абсолютная ошибка (mean absolute error, MAE), которая вычисляется следующим образом:  $MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\hat{y}_i - y_i|$ , где  $m$  – это общее число тестовых изображений,  $y_i$  – истинное значение возраста человека на  $i$ -й фотографии, а  $\hat{y}_i$  – оценка возраста для человека на  $i$ -й фотографии. Другой широко используемой характеристикой точности является интегральная функция распределения абсолютной ошибки (суммарный счет, cumulativescore, CS), которая отражает распределение абсолютных ошибок по годам и вычисляется следующим образом:  $CS(L) = \frac{m_{e \leq L}}{m} \times 100\%$ , где  $m_{e \leq L}$  – количество тестовых изображений с абсолютной ошибкой предсказания  $e \leq L$  лет. Чем меньше значение MAE, тем точнее метод, и чем выше значение CS для каждого года, тем лучше, т.к. это означает, что совершаются меньшие по абсолютному значению ошибки.

Таблица 2

Сравнение результатов работы предложенного метода с наилучшими известными подходами на стандартной базе FG-NET.

Метод	MAE	CS(L=5)
BIF+SVR [1]	4.77	≈ 69%
AAM+OHRank1 [2]	4.48	74.4%
AAM+OHRank2 [2]	4.56	74.7%
C-IsRCA+IsLPP [12]	4.38	≈ 74%
<b>Предложенный метод</b>	<b>4.1</b>	<b>76.4%</b>

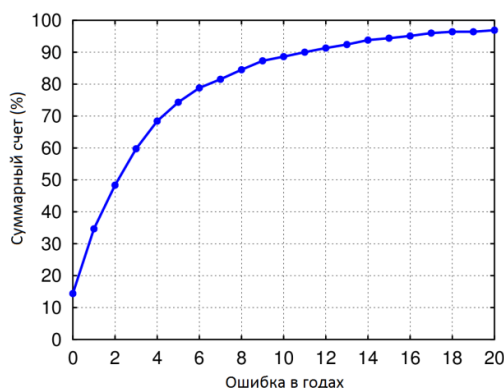


График зависимости меры  $CS(L)$  от уровня ошибки  $L$  на базе FG-NET

В качестве тестового набора фотографий с разметкой базовых человеческих эмоций использовалась база Extended Cohn-Kanade (СК+) [13]. База содержит 593 последовательности фотографий, но только 327 из них имеют разметку выражения лица. Среди этих 327 последовательностей представлены 118 субъектов из 123. Каждая последовательность начинается с фотографии нейтрального лица, то есть без эмоций и заканчивается пиковым выражением эмоции. К базе изображений также прилагается разметка 68 ключевых точек лица для каждого кадра. Распределение эмоций в базе СК+ приведено в табл. 1.

В табл. 3 представлены экспериментальные результаты работы двух предложенных подходов на стандартном наборе данных СК+. В случае работы с отдельными изображениями, а не с видеопоследовательностями, использовались только пиковые (то есть последние) кадры последовательностей. Для оценки качества использовалась процедура перекрестной проверки. Средняя точность классификации определяется, как среднее значения точности классификации для каждого класса по отдельности – отношение числа правильно классифицированных экземпляров класса к числу истинных экземпляров данного класса.

**Таблица 3.**

**Сравнение качества работы двух предложенных подходов (отмечены жирным) с другими известными работами на стандартном наборе данных СК+.**

Подход, год, статья	Средняя точность классификации (%)	Динамические выражения лица или нет
Baseline, 2010 [14]	83.3	Нет
Shape+SVM, 2011 [15]	84.06	Нет
CSPL, 2012 [16]	89.9	Нет
SVM+LBP, 2009 [17]	92.6	Нет
<b>Предложенный подход определения статических выражений лица</b>	96.8	Нет

### **Заключение**

В работе были рассмотрены две задачи из области распознавания лиц: задача автоматического определения возраста человека и задача автоматического определения эмоций человека по фотографиям. Задача определения эмоций сведена к определению выражения лица по изображению. В данной работе была рассмотрена применимость одних и тех же биологически обусловленных признаков (BIF) в двух разных задачах. Данное исследование мотивировано тем, что на практике часто возникает необходимость решать обе задачи (определение возраста и выражения лица) одновременно. Поэтому умение использовать одни и те же признаки в разных задачах представляет собой особенный интерес. BIF признаки приближенно моделируют схему работы зрительной коры головного мозга и представляют собой иерархический подход с двумя уровнями. На первом уровне изображение фильтруется с помощью фильтров Габора, на втором уровне вычисляются статистические признаки. Для определения возраста использовался метод, основанный на ранжировании. Каждый бинарный классификатор был натренирован с помощью машины опорных векторов. Для определения выражения лица использовался ансамбль из двух моделей: основанной на биологически-обусловленных признаках и на ключевых точках лица.

Одни и те же описатели, а также одни и те же процедуры геометрической и фотометрической нормализации лица, позволяют достичь на стандартной базе FG-NET средней ошибки определения возраста в 4.1 года, а на базе Extended Cohn-Kanade (СК+) достигнуть средней точности классификации в 96.8%. Таким образом оба подхода, используя одинаковы процедуры геометрической и фотометрической нормализаций, а также один и тот же подход для вычисления признаков, превзошли другие рассмотренные подходы на стандартных наборах данных по качеству.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №18-41-520002, №19-31-90086, №19-01-00289.*

### Библиографический список

1. **Guo, Guodong, Guowang Mu, Yun Fu, and Thomas S. Huang.** Human age estimation using bio-inspired features. // *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2009.
2. **Guo, Guodong, Yun Fu, Charles R. Dyer, and Thomas S. Huang.** Image-based human age estimation by manifold learning and locally adjusted robust regression. // *Image Processing, IEEE Transactions on* 17, no. 7. 2008. P. 1178-1188.
3. **Chang, Kuang-Yu, Chu-Song Chen, and Yi-Ping Hung.** Ordinal hyperplanes ranker with cost sensitivities for age estimation. // *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE Conference on. 2011. P. 585-592.
4. **Riesenhuber, Maximilian, and Tomaso Poggio.** Hierarchical models of object recognition in cortex. // *Nature neuroscience* 2, no. 11. 1999. P. 1019-1025.
5. **Guo, Guodong, Yun Fu, Thomas S. Huang, and Charles R. Dyer.** Locally adjusted robust regression for human age estimation. // *Applications of Computer Vision, 2008. WACV 2008. IEEE Workshop on*. 2008. P. 1-6.
6. The FG-NET Aging Database, URL: <http://www.fgnet.rsunit.com/>, URL: <http://www-prima.inrialpes.fr/FGnet/>.
7. Open Source Computer Vision Library, URL: <http://opencv.org/>.
8. **Pizer, Stephen M., et al.** Adaptive histogram equalization and its variations. // *Computer vision, graphics, and image processing* 39.3. 1987. P. 355-368.
9. **Benitez-Garcia, G.; Olivares-Mercado, J.; Aguilar-Torres, G.; Sanchez-Perez, G.; Perez-Meana, H.** Face Identification Based on Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). // *Image processing, computer vision, & pattern recognition. IPCV*. 2011.
10. **L. Hang.** A short introduction to learning to rank. // *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 94(10). 2011. P. 1854–1862.
11. **Cortes, Corinna, and Vladimir Vapnik.** Support-vector networks. // *Machine learning* 20.3. 1995. P. 273-297
12. **W.-L. Chao, J.-Z. Liu, and J.-J. Ding.** Facial age estimation based on label-sensitive learning and age-specific local regression. // *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE International Conference on. 2012. P. 1941–1944.
13. **Lucey, Patrick, et al.** The extended Cohn-Kanade dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression. // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on*. IEEE, 2010.
14. **Jain, Suyog and Hu, Changbo and Aggarwal, Jake K.** Facial expression recognition with temporal modeling of shapes. // *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on*. 2011. 1642-1649.
15. **Zhong, Lin et al.** Learning active facial patches for expression analysis. // *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*. 2012. 2562-2569.

16. **Shan, Caifeng and Gong, Shaogang and McOwan, Peter W.** Facial expression recognition based on local binary patterns: A comprehensive study. // *Image and Vision Computing*. Elsevier. No. 6. 2009. 803-816.

17. **Lucey, Patrick, et al.** The extended Cohn-Kanade dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression. // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on*. IEEE, 2010.

**A.S. Spizhevoy, D.V. Balandin**

## **BIO-INSPIRED FEATURES FOR HUMAN AGE ESTIMATION AND FACIAL EXPRESSION CLASSIFICATION**

N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

**Purpose:** We address two problems from face recognition field: human age and facial expression estimation.

**Design/methodology/approach:** We investigate applicability of biologically inspired features for both human age and facial expression estimation problems. For age estimation we combine BIF with ranking methods. We use an ensemble of two models for estimating static facial expression. One uses biologically inspired features as face descriptors. Such features approximately model how visual cortex works and compute features in a hierarchical fashion. First a number of Gabor filters are applied to source image. Then statistical features are computed. The other one uses facial keypoints as descriptors.

**Findings:** BIF descriptors can be used for both human age and facial expression estimation problems successfully. The proposed human age estimation approach achieves 4.1 average age estimation error. The facial expression estimation approach achieves average classification accuracy of 96.8%.

**Research limitations/implications:** The method assume that 68 facial keypoints are available for each frame in case of facial expression estimation. In practice they can be found using existing tools.

**Originality/value:** Investigated applicability of BIF for both human age estimation and facial expression estimation. It allows to solve both tasks simultaneously while spending less time on computing descriptors.

**Keywords:** human age estimation, human emotions recognition, facial expression classification, machine learning.

## Секция 6. Математическое моделирование геофизических процессов

УДК[530.12+530.145](082)+550.34+550.394

Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич

### ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ЧАСТОТАХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ И ГЛОБАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Владимирский государственный университет им. А.Г. Столетова и Н.Г. Столетова,  
Общество с ограниченной ответственностью «Собственный вектор»

Выявлены компоненты вертикальной составляющей электрического поля Земли, спектрально локализованные на гармониках частот обращения релятивистских двойных звездных систем из списка В.Дж. Джонстона. По временным рядам наблюдений на трех станциях вычислены соответствующие главные компоненты. Мощность компонент, спектрально локализованных на частотах гравитационных волн от указанных звездных систем, обнаруживает синхронные превышения над медианными значениями. Наблюдаемое коллективное поведение компонент вызвано наличием когерентной компоненты. Наблюдаемое явление и его корреляты – предмет дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** собственный вектор, электрическое поле Земли, спектральная локализация, релятивистская двойная звездная система, гравитационная волна, коллективное поведение, сильное землетрясение, когерентная компонента.

#### Введение

С использованием *спектроайгеноскопии* [1] — анализа амплитудных спектров собственных векторов матриц вторых начальных смешанных моментов на конечном интервале анализа (матриц плотности) многолетних временных рядов напряженности электрического поля Земли инфранизкочастотного диапазона (ИНЧ) на обширном экспериментальном материале выявлены значимые по амплитуде компоненты вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли, спектрально локализованные на частотах, кратных частотам обращения сорока трёх релятивистских двойных звездных систем из списка, составленного В.Дж. Джонстоном. Сформирована доказательная база [2], подтверждающая аномальное поведение выявленных компонент. На всех станциях наблюдения все выявленные спектрально локализованные на удвоенных частотах обращения РДЗС компоненты вертикальной составляющей напряженности электрического поля имеют действующее значение амплитуд, превышающее медианное значение. Полученные результаты, как показывают предварительные исследования, в равной степени относятся и к компонентам геомагнитного поля [3-6].

Обнаружен эффект синхронного изменения мощности компонент вертикальной составляющей электрического ИНЧ поля Земли, спектрально локализованных на частотах гравитационных волн релятивистских двойных звездных систем. Показано, что распределение интервалов времени, на которых наблюдается такое синхронное изменение, согласуется с распределением во времени сильных землетрясений. Это позволяет выдвинуть гипотезу о нали-

чие некоторого физического агента, синхронно влияющего на электрическое поле Земли на гравитационно-волновых частотах и на активизацию сейсмической активности, приводящего к заметному уменьшению коэффициента вариации компонент (появлению когерентных составляющих).

### Методика исследования

Анализ главных компонент велся на интервале 1000 часов для отрезков временных рядов длительностью 100000 часов на трех станциях наблюдения: Воейково, Душети, Верхнее Дуброво.

При анализе использовались ковариационные матрицы (КМ), которые строились по всему временному ряду. Эти КМ позаимствованы из триад, использованных в монографии [3].

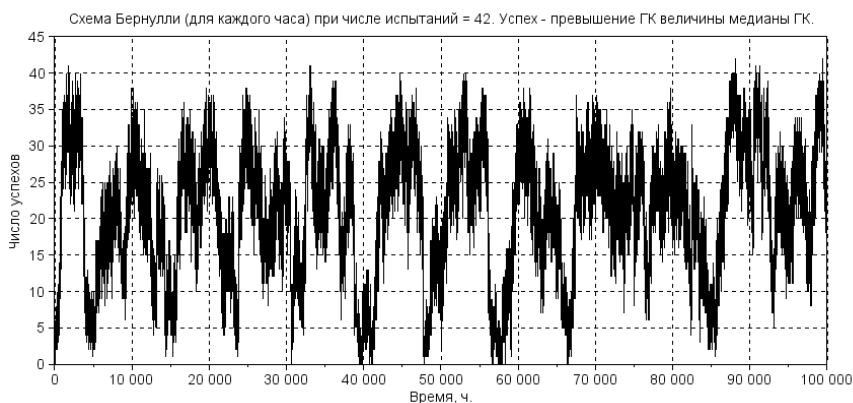
Анализ велся следующим образом:

1. Для КМ вычислялись собственные векторы (СВ) и собственные значения (СЗ).
2. Для набора СВ каждой КМ вычислялись амплитудные спектры СВ с использованием быстрого преобразования Фурье. Для повышения спектрального разрешения каждый собственный вектор дополнялся справа 15000 нулевых отсчетов.
3. Из списка Джонстона были отобраны 43 РДЗС с малым эксцентриситетом (те же, что и в вышеприведенной монографии). Для этих РДЗС вычислялись удвоенные частоты обращения — далее список гравитационно-волновых частот (СГВЧ-43).
4. Для наборов СВ каждой из КМ трех анализируемых временных рядов строился индекс, в который для каждой частоты СГВЧ-43 указывались номера СВ, спектрально локализованные на этой частоте. СВ считался спектрально локализованным на заданной частоте, если эта частота попадала в окрестность 0.707 от максимума нормированного амплитудного спектра СВ.
5. Для каждой частоты из СГВЧ-43 и 100000 часового отрезка каждого временного ряда вычислялись главные компоненты (ГК), соответствующие отобранному спектрально локализованному на этой частоте СВ. Так получались 100000-часовые ряды ГК. Временной ряд мощности ГК, спектрально локализованных на заданной частоте СГВЧ 43 получался путем суммирования квадратов временных рядов ГК.
6. Для каждого из сорока трех временных рядов мощностей спектрально локализованных (на частотах СГВЧ-43) компонент определялась медиана, с которой последовательно сравнивались значения отсчетов временного ряда. На основании такого сравнения формировались временные ряды, в которые в случае превышения отсчетом медианного значения записывался отсчет равный единице, а в случае непревышения — ноль. В результате были получены сорок три бинарных временных ряда — для каждого временного ряда мощности спектрально локализованной компоненты — свой бинарный ряд.
7. Бинарные ряды складывались и, таким образом, получался временной ряд общего числа превышений медианы, значение которого показывает (для каждого часа) число превышений мощностями спектрально локализованных компонент медианных значений.
8. Значения временного ряда общего числа превышений медианы сравнивались с заданным порогом; моменты времени, в которые наблюдались превышения, интерпретировались как моменты аномального поведения, случайное возникновение которых (в соответствии со схемой Бернулли) крайне маловероятно.
9. Выборки для аномальных моментов времени, в которые наблюдалось массовое синхронное превышение медианных значений (мощностями спектрально локализованных ком-

понент) подвергались дальнейшему анализу — с целью выявления причин наблюдаемого эффекта.

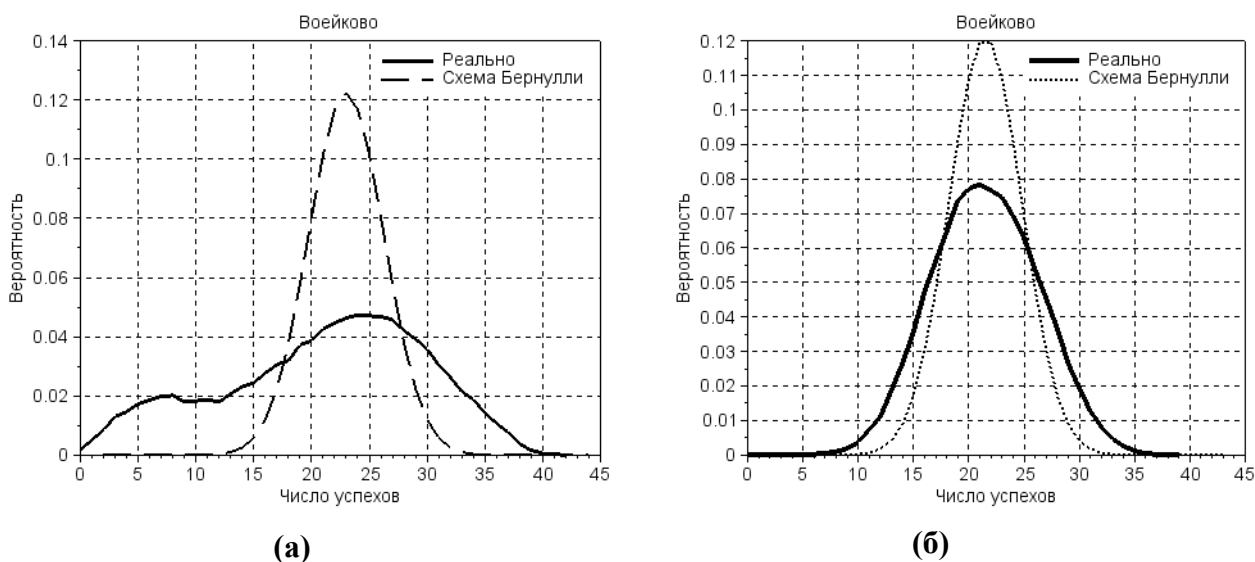
### Результаты исследования

Анализ числа синхронных превышений медианы мощности на основании схемы Бернулли показал аномально высокое число синхронных превышений мощностями компонент, спектрально локализованными на частотах из СГВЧ-43. Рис. 1 иллюстрирует это для станции Воейково. Аналогичное поведение наблюдалось и на станциях Душети и Верхнее Дуброво.



**Рисунок 1. Пример наблюдений числа превышений мощностями ГК медианных значений на станции Воейково**

На рис. 2, а приведено (в сравнении со схемой Бернулли) распределение числа успехов для ряда, показанного на рис. 1. Как видно из сравнения, число успехов значительно превышает ожидаемое в соответствии со схемой Бернулли.



**Рисунок 2. Число синхронного превышения медиан:** (а) — спектрально локализованными компонентами на станции Воейково (в сравнении с ожидаемым по схеме Бернулли), (б) — в вычислительном эксперименте, когда ГК подчинены хи-квадрат распределению с числом степеней свободы от 1 до 4 и мощностью, модулированной мощностью реального временного ряда



Несоответствие схеме Бернулли наблюдается и для данных по станциям Душети и Верхнее Дуброво. Приходится признать, что наблюдаемые на разных частотах СГВЧ-43 превышения взаимозависимы.

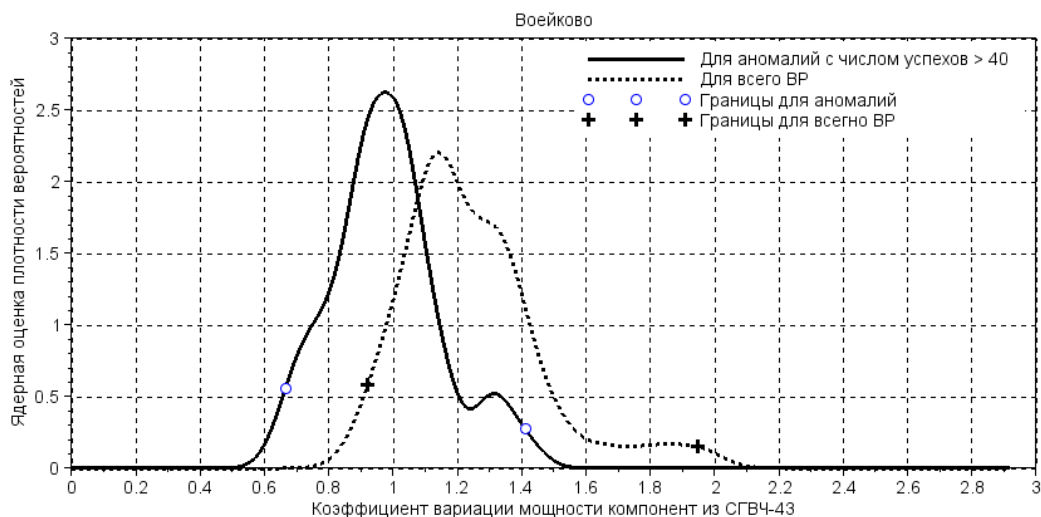
В качестве вероятной причины взаимозависимости была рассмотрена гипотеза о том, что наблюдаемые синхронные (практически на всех частотах ГВЧ-43) превышения обусловлены вариациями текущей мощности наблюдаемых временных рядов.

Тем не менее, гипотезу о том, что anomalно частые синхронные превышения медианами ГК их медианных значений полностью определяются вариациями мощности самого ряда, пришлось отвергнуть после проведения простейшего вычислительного эксперимента, в котором полагалось, что ГК распределены по нормальному закону с мощностью, совпадающей с текущей мощностью реального ВР. На рис. 2, б приведены результаты такого вычислительного эксперимента для станции Воейково и сравнение распределений числа успехов в вычислительном эксперименте и в реальности. Как показывает сравнение рис. 2, а и 2, б, число превышений медианы в реальности не может быть объяснено вариацией мощности ВР.

Усложнение вычислительного эксперимента показало, что наблюдаемые в реальности массовые синхронные превышения мощностями компонент, спектрально локализованными на частотах из СГВЧ-43, их медианных значений наблюдаются только в случае появления в ГК постоянной (когерентной) составляющей.

Действительно, сравнительный анализ вариабельности спектрально локализованных на частотах СГВЧ-43 в моменты аномалий и на всем ВР показывают массовое снижение коэффициента вариации ГК в моменты, соответствующие anomalному поведению.

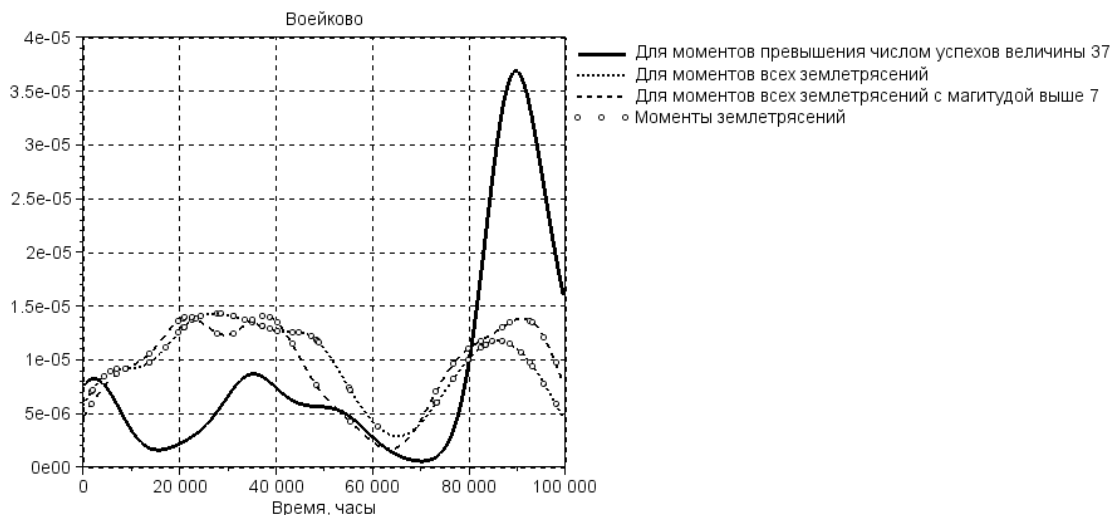
На рис. 3 приведены ядерные оценки коэффициента вариации мощности спектрально локализованных компонент из СГВЧ-43 на станции Воейково для anomalных моментов времени и для ряда в целом. Аналогичное поведение коэффициента вариации наблюдается на станциях Душети и Верхнее Дуброво.



**Рисунок 3. Сравнение ядерных оценок коэффициента вариации мощности спектрально локализованных компонент из СГВЧ-43 в anomalные моменты времени и для ВР станции Воейково в целом**

Было проведено сопоставление моментов возникновения наблюдаемых аномалий в поведении спектрально локализованных компонент из СГВЧ-43 на станции Воейково, Душети и Верхнее Дуброво и моментов фиксации сильных землетрясений [7] на одном и том же временном сегменте длительностью 100000 часов.

Рис. 4 демонстрируют сравнение оценок плотностей вероятностей моментов возникновения аномалий (на станции Воейково) и землетрясений из поведения во времени. Результаты для станций Душети и Верхнее Дуброво демонстрируют аналогичные взаимосвязанные тенденции в вероятностях возникновения аномалий и землетрясений.



**Рисунок 4. Сравнение оценок плотностей вероятностей моментов возникновения аномалий (больше 37 превышений медианы главных компонент на СГВЧ-43) и землетрясений из списка [http://en.m.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_20th-century\\_earthquakes#1981.E2.80.93199](http://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_20th-century_earthquakes#1981.E2.80.93199) на одном и том же временном сегменте длительностью 100000 часов. Параметр сглаживания 15 лет. Станция наблюдения — Воейково**

Можно показать, что если в качестве объекта, воспринимающего гравитационные волны от релятивистских двойных систем, рассмотреть наиболее массивный элемент солнечной системы — ядро Солнца, то ожидаемые вариации вертикальной составляющей электрического поля Земли  $\delta E_z$  будут иметь величину

$$\delta E_z \propto K_{yc} \cdot h \cdot f_{\text{грав}}^2,$$

где  $h$  — относительная амплитуда гравитационной волны,

$f_{\text{грав}}$  — частота гравитационной волны,

$K_{yc}$  — коэффициент усиления системы регистрации «Солнце – Земля – вертикальная составляющая электрического поля Земли».

Можно показать, что  $K_{yc} \propto 5 \cdot 10^{32}$ . Это означает, что при частотах гравитационной волны  $f_{\text{грав}} \propto 10^{-5}$  Гц и при  $h \propto 10^{-23}$  (что согласуется с параметрами релятивистских двойных звездных систем из списка Джонстона) ожидаемые  $\delta E_z$  будут составлять доли В/м, что согласуется с наблюдаемыми действующими значениями главных компонент, спектрально локализованных вблизи гравитационных частот.

## Предварительные выводы

1. На частотах СГВЧ-43 наблюдаются массовые синхронные превышения медианных значений мощностями главных компонент. Такие аномальные моменты времени сопровождаются появлением когерентных составляющих ГВЧ, проявляющихся в заметном уменьшении коэффициентов вариации главных компонент.

2. Распределение аномальных моментов времени (моментов времени появления в главных компонентах когерентных составляющих на ГВЧ) согласуется с моментами регистрации сильных землетрясений.

3. Причины наблюдаемого явления и его корреляты подлежат пристальному дополнительному исследованию. Можно высказать некоторые предположения относительно природы наблюдаемых эффектов. Гравитационно-волновое воздействие (ГВ-воздействие) — периодический и постоянно действующий фактор в природе, действующий на все уровни Земли (атмосфера, кора, ядро). В силу этих свойств, несмотря на недоминирующий характер гравитационных волн, они могут играть роль накапливающегося (так как их действие постоянно) и пускового механизма астро- и геофизических процессов, например, сейсмических. Обнаруживаемые нами аномалии в поведении амплитуды  $E_z$  Земли в приземном слое атмосферы на частотах ГВ-излучения 43-х РДЗС, совпадающие по времени с зонами повышенной сейсмической активности Земли, могут подтверждать накапливающийся и запускающий механизм воздействия гравитационных волн на напряжения в земной коре. Таким образом, ГВ-воздействие можно рассматривать как накапливающийся и пусковой механизм астро- и геофизических процессов.

## Библиографический список

1. **Исакевич, В.В., Исакевич Д.В.** Анализатор спектра собственных векторов и компонент сигнала. Патент на полезную модель RU 178399U1.
2. **Grunskaya, L.V., Isakevich, V.V., Isakevich, D.V.** Anomalous Behavior of the Terrestrial Electric Field Intensity at Multiple Frequencies of Relativistic Binary Star Systems // *Gravitation and Cosmology*. – 2018. – №4. – С.384-392.
3. **Грунская, Л.В.** Айгеноскопия многолетних временных рядов электромагнитного поля в приземном слое атмосферы крайне низкочастотного диапазона на частотах двойных звездных систем / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич. – Москва: ООО «Издательство «Перо», 2016. – 276 с.
4. **Грунская, Л.В.** О характеристиках анализатора собственных векторов и компонент сигнала при анализе квазипериодических временных рядов / Л.В. Грунская [и др.] // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. – 2016. – №16. – С.49-53.
5. **Isakevich, V.V., Isakevich, D.V., Grunskaya, L.V., Sushkova, L.T., Lukyanov, V.E.** On frequency properties of covariance matrix and its' eigenvectors applied to polyharmonic time series analysis // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. – 2013. – №11. – С.24.
6. Digital Data Service // Kakioka Geomagnetic Field. [2018]. – URL: <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/metadata/en/products/list/mag/kak>
7. List of 20th-century earthquakes // Wikipedia. [2019]. – URL: [http://en.m.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_20th-century\\_earthquakes#1981.E2.80.93199](http://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_20th-century_earthquakes#1981.E2.80.93199)

**L.V. Grunskaya, V.V. Isakevich, D.V. Isakevich**

**THE EARTH'S ELECTRIC FIELD BEHAVIOR AT RELATIVISTIC BINARY STARS'  
FREQUENCIES AND THE GLOBAL SEISMIC ACTIVITY**

The components of the Earth's electric field strength vertical projection are discovered which are spectrally localized at the harmonics of rotation frequencies of the relativistic binary star systems listed by W.J. Johnston. The principal components are computed and analysed for the time series observed at three stations. Capacity of the components which are spectrally localized at the gravitational waves' frequencies of the mentioned star systems manifest synchronous exceeds over median values. The observed collective behavior of the components is caused by appearance of a coherent component. The observed phenomenon and it's correlates are subject to a further investigation.

**Keywords:** Eigenvector; Earth's electric field; spectral localization; relativistic binary star system; gravitational wave; collective behavior; strong earthquake; coherent component.

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ КАТАЛОГ ВОЛН-УБИЙЦ ЗА 2006-2018 ГГ.**

Институт прикладной физики РАН,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Произведено объединение имеющихся каталогов аномально больших волн в океане («волн-убийц») за период с 2006 по 2018 год. Всего отмечено 318 случаев волн-убийц, повлекших разрушения, травмирование и смерть людей. Составлена статистика всех случаев по годам и месяцам; проанализирован ущерб, нанесенный волнами-убийцами. Отмечается, что наиболее часто эти волны возникают на берегу и в прибрежной зоне.

**Ключевые слова:** волны-убийцы, аномально большие волны, Мировой Океан, средства массовой информации, каталог

Факт существования «волн-убийц», которые внезапно возникают на морской поверхности, был признан научным сообществом относительно недавно, что повлекло значительное количество исследований [1-6]. Такие волны представляют недооцененную опасность, связанную со скудным знанием их специфической динамики. Необходимость обеспечения безопасной навигации и длительного использования нефтяных и газовых платформ неизбежно приводит к необходимости учитывать воздействие волн-убийц. Эти волны принадлежат к специфическому классу волн: их отличительной особенностью является аномально большая высота по сравнению с окружающими волнами, а также относительно короткое время жизни. Физические механизмы генерации волн-убийц на глубокой воде включают модуляционную неустойчивость, взаимодействие волн с течениями, взаимодействие волн с ветром и дисперсионную фокусировку. На мелководье становится важным взаимодействие с дном и берегом [1,3,7]. Волны-убийцы возникают как в спокойную, так и в штормовую погоду. Волны-убийцы умеренной амплитуды могут привести к человеческим потерям на побережье, и они становятся реальной опасностью для судов и морских сооружений в бурных морях.

Аномально большие волны хорошо регистрируются буями в различных точках мирового океана [8-11]. Несомненно, волны-убийцы случаются гораздо чаще, чем регистрируются. Статистическая обработка имеющихся данных не дает ответа о реальной вероятности появления этих волн и их природе.

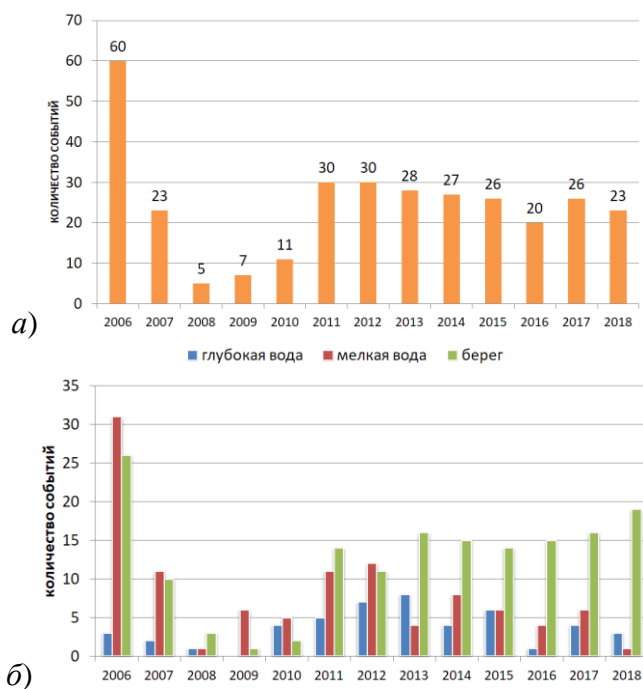
С ростом использования морей и океанов растет число наблюдений аномальных волн. Существует множество свидетельств экстремального воздействия волн-убийц на морские сооружения и суда, что приводит к повреждениям кораблей и человеческим жертвам. В частности, известны столкновения круизных лайнеров с волнами-убийцами: Explorer (2000), Grand Voyager (2005), Norwegian Dawn (2005), Louis Majesty (2010), Marco Polo (2014).

В связи с все более частыми случаями регистрации волн-убийц, а также с активными сообщениями об инцидентах с этими волнами в средствах массовой информации, естественно, возникла необходимость систематизировать эти данные и создать каталоги волн-убийц. В [12] автор собрал свидетельства очевидцев об аномально больших волнах в океане в 1498-2007 гг. Волны-убийцы, произошедшие в Мировом океане в 2005 году, собраны в [13] и в 2013 году – в [14]. Волны-убийцы, о которых сообщалось в средствах массовой информации в Мировом океане в течение 2006–2010 годов, собраны в [15-16]. Экстремальные волновые явления в Ирландии, включая волны-убийцы, обсуждаются в [17-18]. Недавно опубликованная статья [19] включает случаи волн-убийц, связанные с ущербом и человеческими жертва-

ми, произошедшими в Мировом океане в течение 2011–2018 годов. Эти исследования помогают оценить распространенность и характеристики проявления волн-убийц.

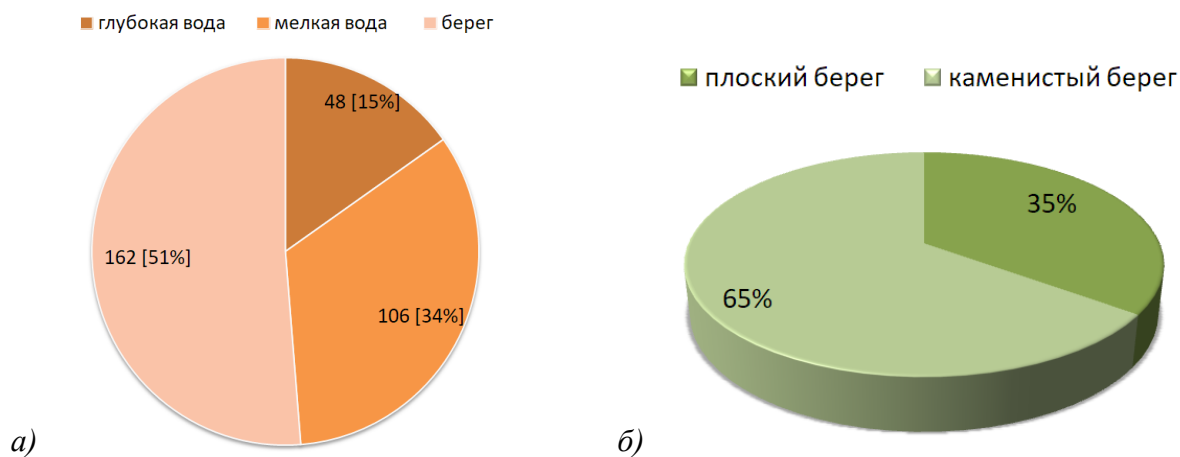
В данной работе объединены имеющиеся каталоги волн-убийц, начиная с 2006 года. Волны-убийцы из работы [12] с более ранними событиями не были включены в обобщенный каталог, поскольку они имеют в основном описательные характеристики без какой-либо конкретики, и эти свидетельства оказалось затруднительно соотнести с остальными случаями. Таким образом, для анализа использовались данные из следующих работ [15-19].

В общей сложности было объединено 318 случаев аномально больших волн, более или менее подходящих под определение волны-убийцы: неожиданно образовавшаяся волна (не имеющая видимых источников типа землетрясение или оползень), значительно превышающая фоновые волны вокруг, и повлекшая смерть/травмы людей, повреждение/затопление судна, или нанесшая другой ущерб. Обычно принято считать волной-убийцей ту, что подходит под амплитудный критерий: высота аномальной волны минимум в два раза должна превышать значительную высоту волн вокруг. Но в связи с тем, что собранная информация, как правило, не получена с помощью измерений, и очень часто количественные данные в описаниях очевидцев отсутствуют (как и можно ожидать), то мы руководствовались всеми перечисленными критериями, данные о которых были доступны. Количество людей в прибрежной зоне Мирового Океана очевидно значительно больше, чем в открытом море. Поэтому число наблюдений прибрежных волн-убийц гораздо больше. Районы, где наиболее часто встречались волны-убийцы, включают в себя Гавайи, западное и восточное побережье США, район Мексиканского залива, Карибское море, берега Ирландии и Испании, Средиземное море, а также южно-восточное побережье Австралии и северный остров Новой Зеландии. Распределение волн-убийц по годам представлено на рис. 1, а. Видно, что явным рекордсменом является 2006 год (60 событий). Меньше всего случаев приходится на 2008 (5 событий). Это может быть связано с параметрами поиска и тем, что один из сайтов по волнам-убийцам (<http://actionsbyt.wordpress.com/2007/11/29/freak-waves/>) работал до 2007 года. Тем не менее, процент различных типов волн-убийц ежегодно демонстрирует одинаковую тенденцию. Большинство из них образовались на мелководье и на побережье (рис. 1, б).

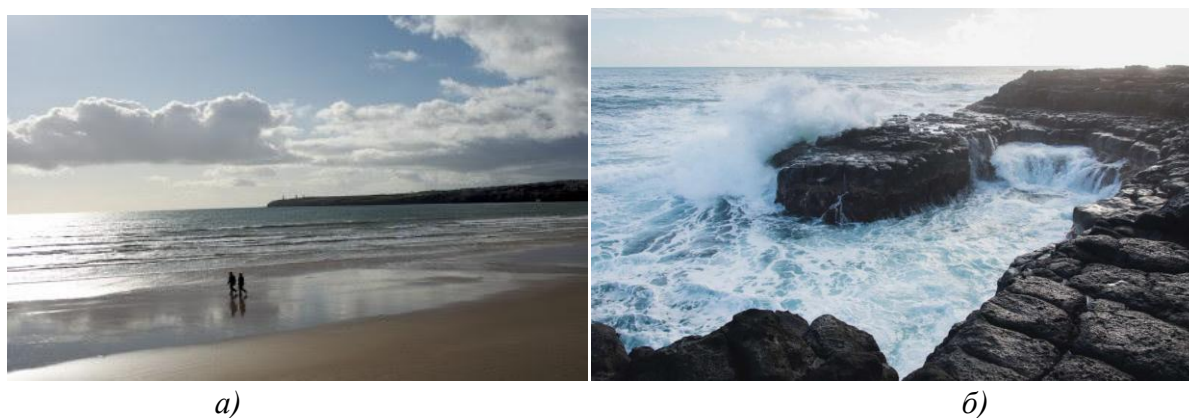


**Рисунок 1. Распределение волн-убийц по годам**

Все случаи волн-убийц были разделены на глубоководные (глубина воды более 50 м), мелководные (глубина до 50 м), а также случившиеся на берегу (песчаный плоский пляж или скалистый откос/волнолом). 48 случаев (15%) пришлось на глубокую воду, 106 (34%) – на мелкую, на берегу произошло в общей сложности 162 случаев – 51% (из них 35% - на плоском пляже, и 65% - на скалистом берегу). Примеры плоского и скалистого берегов, где произошли несчастные случаи с участием волн-убийц, представлены на рис. 3.



**Рисунок 2. Количество и доля волн-убийц:** а) произошедших на глубокой, мелкой воде и на побережье, и б) произошедших на побережье

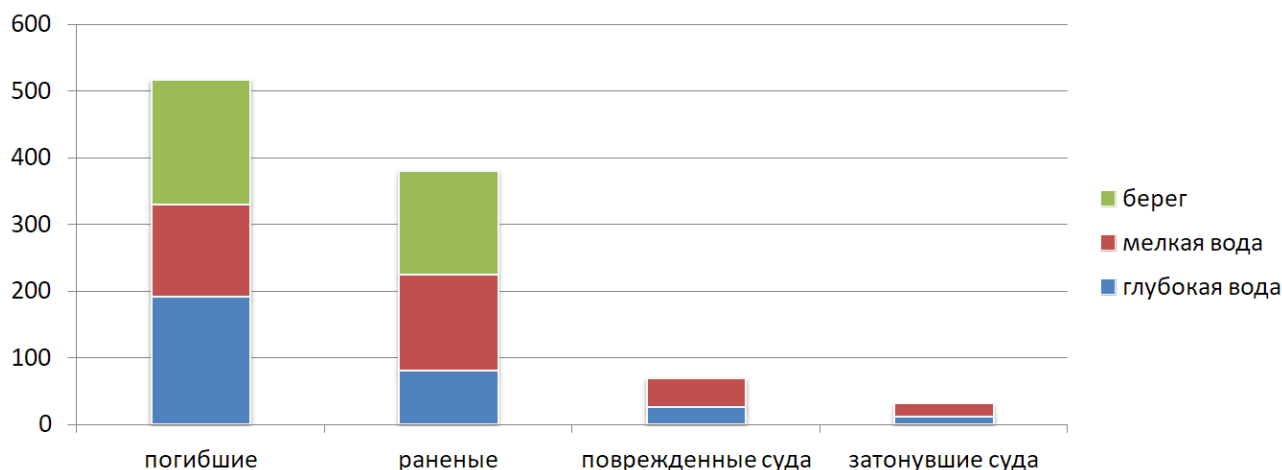


**Рисунок 3. Примеры плоского (а) и скалистого (б) берегов, где произошли инциденты с волнами-убийцами**

Согласно собранной статистике, в период с 2006 по 2018 год волны-убийцы привели к гибели 517 людей (192 – на глубокой воде, 138 – на мелкой, 187 – на берегу), к ранению 380 людей (80 – на глубокой воде, 144 – на мелкой, 156 – на берегу), повредили 69 судов (26 – на глубокой воде и 43 – на мелкой), а так же стали причиной затопления 31 судов (11 – на глубокой воде, 20 – на мелкой). Выделено несколько случаев, когда волны-убийцы смывали транспортные средства в море, повреждали прибрежную инфраструктуру и нефтяные платформы. Данная статистика представлена на гистограмме на рис. 4. Отдельно стоит отметить, почему количество погибших людей на глубокой воде так велико. Это связано, в первую

очередь, с гибелью судна “RabaulQueen”, повлекшей смерть 126 людей (недалеко от берегов Папуа-Новой Гвинеи).

Наиболее часто в описаниях очевидцев отмечалась одиночная волна-убийца (или стена воды). Гораздо реже встречались группы волн (так называемые «две и три сестры»). В ряде случаев информация о количестве волн была недоступна.



**Рисунок 4. Ущерб, нанесенный волнами-убийцами в 2006-2018 (по вертикальной оси - штуки)**

### Заключение

Составлен объединенный каталог аномально больших волн в океане (волн-убийц), произошедших в Мировом океане в период с 2006 по 2018 год. Он включил в себя все случаи волн-убийц, отмеченные в каталогах [15-19]. В общей сложности было объединено 318 случаев аномально больших волн, более или менее подходящих под определение волны-убийцы: неожиданно образовавшаяся волна (не имеющая видимых источников типа землетрясение или оползень), значительно превышающая фоновые волны вокруг, и повлекшая смерть/травмы людей, повреждение/затопление судна, или нанесящая другой ущерб. Большинство собранных волн получено не с помощью натуральных измерений, а с помощью свидетельств очевидцев. Иногда информация, представленная в интернете, неполна или может содержать недостоверную информацию. Поэтому, как правило, информация по каждому случаю собиралась из разных источников. Очевидно также, что данная статистика не отображает полную картину всех случаев волн-убийц. Это достаточно частое явление (как показывают многочисленные исследования), но морские просторы настолько велики, что вероятность, что кто-то станет свидетелем конкретной аномальной волны не так уж высока. Несмотря на это, составленный каталог демонстрирует широкую распространенность волн-убийц в мировом океане, а также большую частоту их возникновения.

В результате анализа данных были сделаны следующие выводы:

- наиболее часто волны-убийцы происходили на берегу (на камнях или клифах, когда людей смывала в море внезапно возникшая аномально большая волна);
- чаще всего волна-убийца была одиночной (иногда в виде стены воды), в редких случаях говорится двух или трех аномально больших волнах;



- наиболее часто волны-убийцы наблюдались на западном и восточном побережье США, у берегов Ирландии, на Гавайях, у берегов Новой Зеландии и на юго-восточном побережье Австралии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-77-00063.*

### Библиографический список

1. **Куркин, А.А.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование: монография / А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский // Нижегород. гос.техн. ун-т. - Нижний Новгород: НГТУ, 2004. 157 с.
2. **Dysthe, K.** Oceanic rogue waves / K. Dysthe, H.E. Krogstad, P. Muller // *Annu. Rev. Fluid. Mech.* – 2008. Vol.40. – P. 287–310.
3. **Kharif, C.** Rogue Waves in the Ocean / C. Kharif, E. Pelinovsky, A. Slunyaev // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 216p.
4. **Didenkulova, I., Pelinovsky, E.** Rogue waves in nonlinear hyperbolic systems (shallow-water framework) / I. Didenkulova, E. Pelinovsky // *Nonlinearity*. – 2011. – V.24. – P. R1-R18.
5. **Slunyaev, A., Didenkulova, I., Pelinovsky, E.** Rogue Waters / A. Slunyaev, I. Didenkulova, E. Pelinovsky // *Contemporary Physics*. 2011. – V.52. – P. 571-590.
6. **Onorato, M., Resitori, S., Baronio, F.** Rogue and Shock Waves in Nonlinear Dispersive Media / M. Onorato, S. Resitori, F. Baronio // *Lecture Notes in Physics*. Springer International Publishing, New York, 2016.
7. **Soomere, T., Engelbrecht, J.** Weakly two-dimensional interaction of solitons in shallow water / T. Soomere, J. Engelbrecht // *Eur J Mech B-Fluid*. – 2006. V. 25. – P. 636-648.
8. **Дивинский, Б.В.** Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование / Б.В. Дивинский, Б.В. Левин, Л.И. Лопатухин, Е.Н. Пелиновский, А.В. Слюняев // *Доклады РАН*. – 2004. – Т.395. – №5. – С. 690–695.
9. **Candella, R.N.** Rogue waves off the south/southeastern Brazilian coast / R.N. Candella // *Nat Hazards*. 2016. – Vol.83. – №1. – P. 211–232.
10. **Baschek, B.** Rogue wave observations off the US West Coast / B. Baschek, J. Imai // *Oceanography*. 2011. – Vol. 24. – №2. – P. 158–165.
11. **Didenkulova, I.** Shapes of freak waves in the coastal zone of the Baltic Sea (Tallinn Bay) / I. Didenkulova // *Boreal Environ. Res.* – 2011. – Vol. 16. – P. 138-148.
12. **Liu, P.C.** A chronology of freak wave encounters / Liu, P.C. // *Geofiz.* – 2007. – Vol. 24. – P. 57–70.
13. **Didenkulova, I.** Freak waves in 2005 / I. Didenkulova, A. Slunyaev, E. Pelinovsky, Ch. Kharif // *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* – 2006. Vol.6. – P. 1007-1015.
14. **Liu, P.C.** Brief Communication: Freak wave occurrences in 2013 / P.C. Liu // *Nat Hazards Earth SystSci Discuss.* – 2014. Vol.2. – P. 7017-7025.
15. **Nikolkina, I.** Catalogue of rogue waves reported in media in 2006-2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // *Nat. Haz.* 2012. – Vol.61. – P. 989-1006.
16. **Nikolkina, I.** Rogue waves in 2006 – 2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2011. – Vol.11. – P. 2913–2924.
17. **O'Brien, L.** Extreme wave events in Ireland: 2012 – 2016 / L. O'Brien, E. Renzi, J.M. Dudley, C. Clancy, F. Dias // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. – P. 729–758.

18. **O'Brien, L.** Extreme wave events in Ireland: 14 680 BP–2012 / L. O'Brien, J. M. Dudley, F. Dias // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. – Vol.13. – P. 625–648.

19. **Didenkulova (Shurgalina), E.** Catalogue of rogue waves occurred in the World Ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources / E.Didenkulova (Shurgalina) // Ocean and coastal management. 2020 (in print).

**E.G. Didenkulova<sup>1,2)</sup>**

## **UNIFIED CATALOGUE OF ROGUE WAVES IN 2006-2018**

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The purpose of the present article is to get the statistics of rogue waves reported in mass media during 2006-2018 and highlight the most dangerous in terms of freakwaveswater areas in the World Ocean.

**Design/methodology/approach:** Search for information in the mass media: the Internet and scientific articles.

**Findings:** The largest number of freak events was recorded in 2006. Half of the registered events occurred on the shore. Most often, these waves were observed near Ireland and the United Kingdom (north-eastern Atlantic), Australia (South-West Pacific), USA (eastern Pacific and western Atlantic).

**Research limitations/implications:** This catalogue may contain incomplete data due to limited access to information.

**Originality/value:** This study allows to study in more detail the characteristics of the freak waves to prevent people loses and the damage of economy.

**Key words:** Rogue waves, abnormally large waves, World Ocean, mass media, catalogue

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Сопоставлены результаты синхронного лабораторного измерения гравитационных волн на поверхности воды и давления на разных горизонтах под волнами. Исследована прямая задача (расчет давления по данным смещения поверхности) и обратная задача реконструкции смещений волновой поверхности по полю давления в рамках линейной теории и теории Диста, учитывающей слабую нелинейность и дисперсию волн. Полученные амплитуды и формы волн, а также усредненные характеристики – асимметрия и эксцесс – сопоставлены с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** гравитационные волны на поверхности воды, давление под волнами, нелинейные волны, лабораторный эксперимент, численное моделирование, экстремальные волны.

### Введение

Измерение вариаций давления под взволнованной водной поверхностью является чрезвычайно удобным способом регистрации морских волн. Сегодня к этому способу относится значительная доля имеющихся натуральных измерений волн, особенно в прибрежной зоне. В то же время задача восстановления характеристик волнения по данным давления на дне (обратная задача) нетривиальна (и неоднозначна). Наиболее часто для этого используются гидростатические формулы связи, реже – линейные формулы; известны примеры, когда такая реконструкция поверхностных волн приводит к большим ошибкам в определении их высот. В этой работе мы кратко обсуждаем результаты обработки данных синхронных измерений смещения поверхности во время прохождения волн и измерения вариаций давления на различных горизонтах под волнами [1] в сопоставлении с решением прямой и обратной задач в рамках различных теорий.

Полное давление под волной,  $P_{tot}$ , определяется суммой давления столба жидкости, отсчитываемого от невозмущенного уровня поверхности, и динамического давления,  $p$ , связанного с движением волн. Нормированное на плотность динамическое давление может быть записано через уравнение Бернулли

$$p \equiv \frac{1}{\rho} P_{tot} + gz = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (1)$$

и требует знания поля потенциала скорости  $\varphi(x, z, t)$  в толще воды. Здесь  $z$  – вертикальная координата, растущая вверх,  $x$  – горизонтальная координата (рассматривается плоская задача),  $\rho$  – постоянная плотность жидкости, а  $g$  – гравитационная постоянная. Потенциал скорости определяется решением уравнения Лапласа в толще воды  $-h \leq z \leq \eta$ , где  $\eta(x, t)$  свободная поверхность, а на дне  $z = -h$  выполняется граничное условие непротекания

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

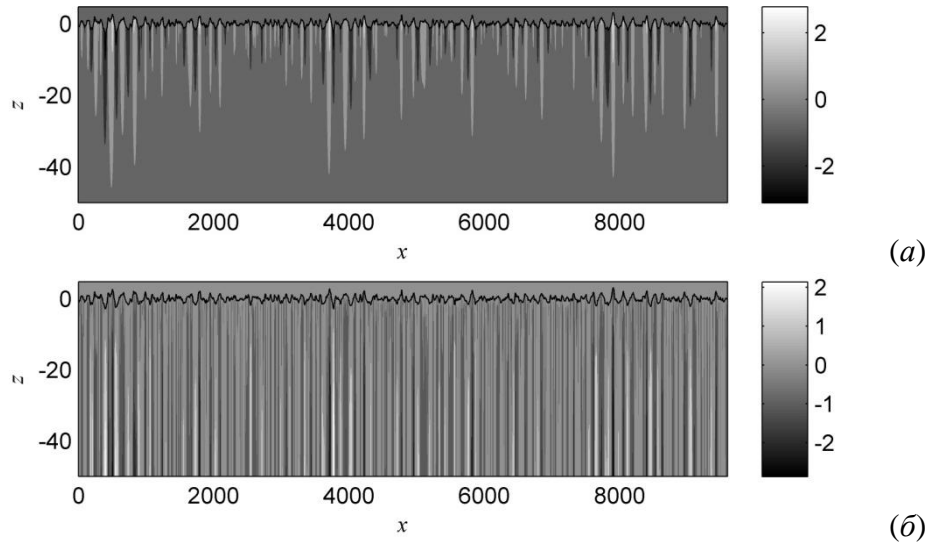
$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0. \quad (3)$$

Потенциал скорости связан с профилем смещения свободной поверхности нелинейным образом через граничные условия на поверхности  $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad z = \eta, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 = 0, \quad z = \eta. \quad (5)$$

На рис.1 показан пример расчета полей давления по формуле (1) под интенсивными нерегулярными волнами, динамика которых рассчитывается согласно системе уравнений (2)-(5). Динамическое давление (рис.1, а) спадает с глубиной, что не может быть описано гидростатическим приближением. Соответственно, учет негидростатических эффектов становится с глубиной всё более важным (рис.1, б).



**Рис. 1.** Динамическое давление (а) и негидростатическое давление (б) под нелинейными волнами на глубокой воде – расчет уравнений Эйлера с учетом сильной нелинейности для условий: спектр JONSWAP, пиковый период  $T_p = 10$ с, значительная высота  $H_s = 3.5$  м. Оттенками серого показано давление, нормированное на  $\rho g$

Система (2)-(3) имеет точное решение, которое с использованием преобразования Фурье может быть представлено следующим в следующем виде

$$\varphi(x, z, t) = \hat{F}^{-1} \left\{ \hat{\phi}(k, t) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \right\},$$

$$\hat{\phi}(k, t) = \hat{F} \{ \phi(x, t) \}, \quad \hat{\phi}_t(k, t) = \hat{F} \left\{ \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} \right\}, \quad (6)$$

где  $\phi(x, t) = \varphi(x, z=0, t)$  – потенциал скорости на невозмущенном уровне поверхности, а операторы  $\hat{F}\{\cdot\}$  и  $\hat{F}^{-1}\{\cdot\}$  являются прямым и обратным преобразованиями Фурье по пространственной координате  $x$  и волновому числу  $k$  соответственно,

$$\hat{F}^{-1}\{\hat{r}\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \hat{r}(k) e^{-ikx} dk, \quad \hat{F}\{r\} \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(x) e^{ikx} dx. \quad (7)$$

В реальности временные записи смещения поверхности в одной точке чаще всего являются единственной информацией о волнах, которой недостаточно для определения функции поверхностного потенциала скорости. В предположении однонаправленных волн линейное приближение (4)-(5) дает связь между смещением поверхности и потенциалом. Хорошо известно, что в линейной теории однонаправленных волн для одной гармонике  $k_0$  поле давления связано с полем смещения следующим соотношением

$$p = g\eta \frac{\cosh(k_0(z+h))}{\cosh(k_0h)}, \quad (8)$$

которое описывает спадание динамического давления с глубиной. Для анализа временных записей переход осуществляется согласно линейному дисперсионному соотношению

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh}, \quad (9)$$

где  $\omega$  – циклическая частота.

Линейное решение (6)-(8) может быть модифицировано с учетом слабо нелинейных поправок, ограничиваясь длинными модуляциями волн (то есть, предполагая, что спектр волн достаточно узок с волновым числом доминирующих волн  $k_0$ ), что составляет развитие модели Диста [2, 3]. В настоящей работе для построения теоретических полей давления использовались линейная теория и слабонелинейная теория модулированных волн.

### Давление под нерегулярными волнами (прямая задача)

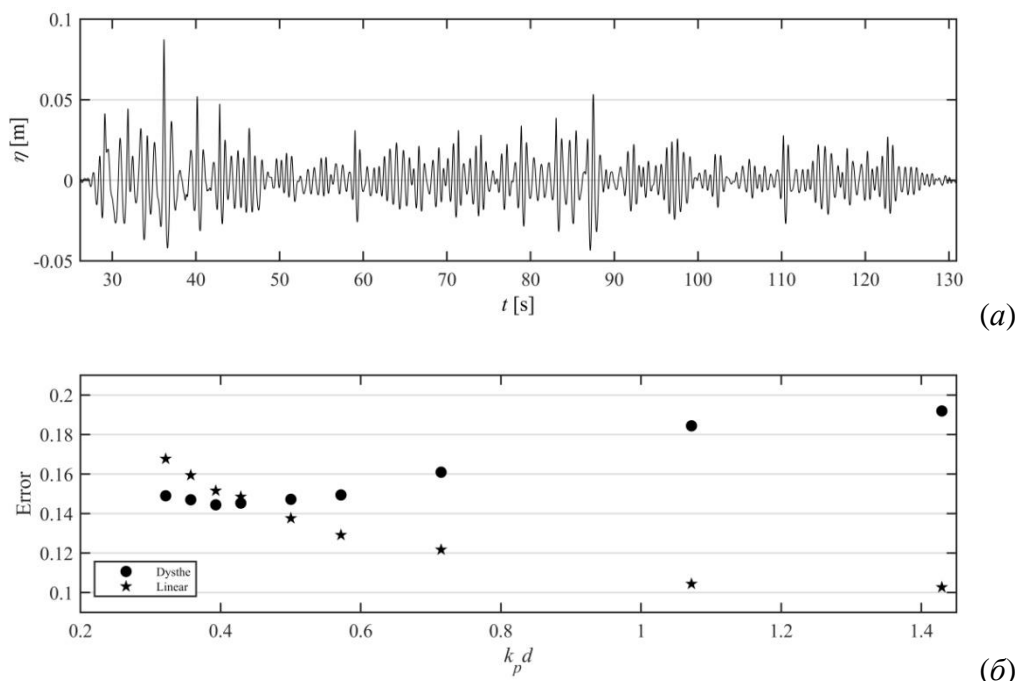
Лабораторные эксперименты по синхронному измерению смещения поверхности воды и полей давления при прохождении цугов регулярных волн и нерегулярных волн проводились в волновом лотке Технического университета Берлина длиной 15 м, шириной 0.3 м и глубиной 0.4 м [1]. Характерные параметры нерегулярного волнения, запись которого анализируется в этой работе, пиковый период  $T_p = 0.7$  с, соответствующая ему циклическая частота  $\omega_p = 2\pi/T_p = 9$  рад/с, средняя крутизна  $\eta_{rms} k_p = 0.05$  и безразмерная глубина  $k_p h = 3.3$ , где пиковая частота и волновое число  $k_p$  связаны через дисперсионное соотношение (9), и  $\eta_{rms}$  – среднеквадратическое отклонение смещения поверхности,  $k_p h$ . Давление под волнами измерялось на разных горизонтах  $z = -d$  в интервале  $k_p d = 0.3 \div 1.4$ .

Исследуемая временная запись нерегулярных волн длительностью 100 с (Рис. 2а) представляет собой несколько волновых групп и содержит аномально высокую волну. Для расчета полей давления на разных глубинах была применена линейная теория и теория Диста. Результат представлен на Рис. 2б как среднеквадратическое отклонение,  $Err$ , расчетных значений,  $p$ , от лабораторных данных,  $p_0$

$$Err = \sqrt{\frac{\langle (p - p_0)^2 \rangle}{\langle p_0^2 \rangle}}. \quad (10)$$

В рамках теории Диста ошибка расчета давления составляет около 15% прямо под волнами и увеличивается с глубиной до 20%. Линейная теория демонстрирует лучшие результаты на большой глубине, чем теория Диста: ошибка составляет около 10% на самом глубоком датчике и увеличивается до 17% ближе к поверхности воды. Применение теории Диста оказалось удивительно неэффективным, хотя она учитывает нелинейность поверхностных волн,

которая значительна в рассматриваемом случае. Такой результат может быть связан с нарушением иерархии асимптотических членов в решении для давления в рамках модели Диста.



**Рис. 2.** Запись поверхностных волн (а) и ошибка относительно лабораторных данных расчета полей давления по линейной теории (звезды) и модели Диста (кружки) (б)

### Восстановление смещения поверхности по давлению (обратная задача)

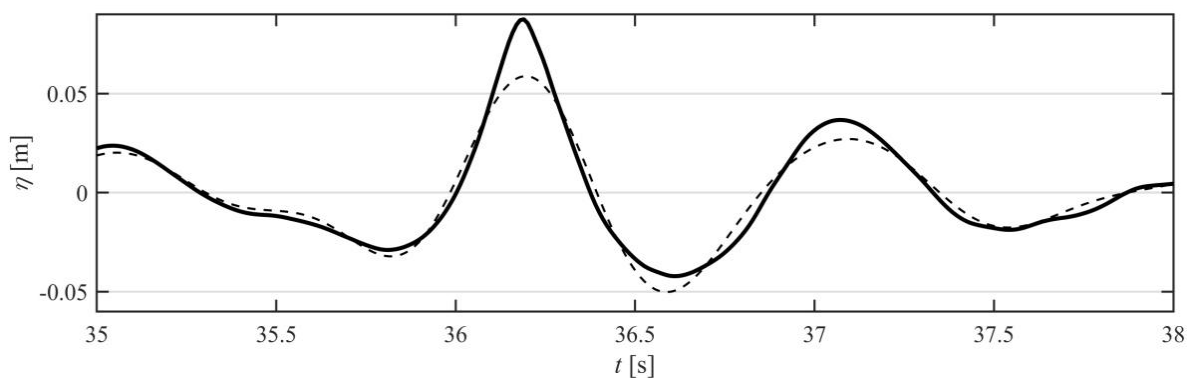
Реконструкция смещения поверхности по данным измерения давления на глубине выполнена с использованием линейной теории. Для восстановления использовалась только часть 100-секундной записи с отфильтрованными нелинейными гармониками 2-го порядка и выше. Порог фильтрации был выбран на основании рассмотрения различных измерений таким образом, чтобы в реконструированной записи не происходило роста амплитуды «хвоста» Фурье преобразования на высоких частотах. Примеры восстановления экстремальной волны из записи с глубин  $k_p d = 0.37$  и  $k_p d = 1.65$  представлены на рис. 3, а и рис. 3, б соответственно. Видно, что при восстановлении с измерения на горизонте вблизи поверхности результат оказывается значительно лучше, чем по данным измерения давления даже на не слишком большой глубине. В то же время экстремальная волна восстановлена довольно плохо в обоих случаях, что можно объяснить вырезанием высокочастотной части спектра давления, определяющей заостренность гребня волны. Смещение, восстановленное со значительной глубины (рис. 3, б), отличается от измеренного фазами и амплитудами волн.

По измеренным и восстановленным данным смещения поверхности были рассчитаны 3-й и 4-й статистические моменты волнового поля – асимметрия  $M_3$  и эксцесс  $M_4$

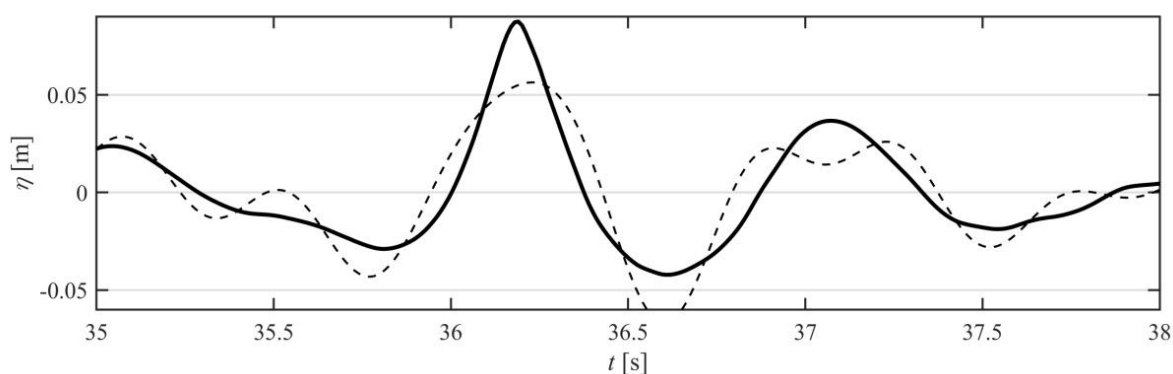
$$M_n = \frac{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^n \rangle}{\eta_{rms}^n}, \quad \eta_{rms} = \sqrt{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^2 \rangle} \quad (11)$$

с целью посмотреть, нельзя ли делать выводы о статистических свойствах смещения поверхности по статистическим моментам полей давления, не прибегая к процедурам восстановления поверхности. Для рассмотренного примера асимметрии давления и реконструированного

смещения хорошо коррелируют между собой, но значения для реконструированного смещения существенно отличаются от данных прямого измерения смещения (из-за примененной спектральной фильтрации). Экссесс смещения реконструируется удовлетворительно со всех глубин и близок по значению к данным прямым измерениям.



(a)



(б)

**Рис. 3. Экстремальная волна:** измерение смещения поверхности (сплошная линия) и реконструкция по данным давления (пунктирная линия), измеренным на горизонте  $k_p d = 0.37$  (a) и  $k_p d = 1.65$  (б)

### Заключение

Исследование прямой задачи построения полей давления по измеренной вариации смещения поверхности в точке на примере нерегулярных интенсивных волн не показало явного преимущества использования слабо нелинейной модели Диста для волн с узким спектром по отношению к линейной теории. Основным источником ошибок модели Диста предположительно является ограничение по узости спектра, используемое при описании вертикальной изменчивости полей. Как следует из результатов численного расчета уравнений Эйлера, учет негидростатичности давления играет большую роль. Решение обратной задачи восстановления смещения поверхности по данным давления показало значительные ошибки при использовании линейной теории. Мы ожидаем, что использование модели Диста для решения обратной задачи может оказаться более эффективным в этом случае.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 18-05-80019 и 19-55-15005.*

## Библиографический список

1. **Kokorina, A., Slunyaev, A., Klein, M.** Simultaneous measurements of gravity water waves at the surface and in the water bulk: analysis of the experimental record // *Geophys. Res. Abstracts*. 2019. V. 21. P. EGU2019-6014.
2. **Dysthe, K.B.** Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves // *Proc. Roy. Soc. London A*. 1979. V. 369. P. 105-114.
3. **Slunyaev, A., Pelinovsky, E., Hsu, H.-C.** The pressure field beneath intense surface water wave groups // *Eur. J. Mech. B / Fluids*. 2018. V. 67. P. 25-34.

A.V. Kokorina<sup>1,2</sup>, A.V. Slunyaev<sup>1,2</sup>

## RECONSTRUCTION OF EXTREME SEA WAVES USING PRESSURE RECORDS

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics RAS

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The research aims at studying the methods of reconstruction of surface sea waves through pressure data.

**Design/methodology/approach:** The sea surface was reconstructed using pressure records within linear theory and the Dysthe theory using data of laboratory experiments and numerical simulations.

**Findings:** The results of simultaneous laboratory measurement of gravity surface waves and pressure at different horizons under the waves are compared. The direct problem (calculation of pressure according to the surface displacement data) and the inverse problem of reconstructing the displacements of the wave surface using the pressure data fields within linear theory and the Dysthe theory are investigated. The obtained amplitudes and wave shapes, as well as the statistical characteristics — asymmetry and kurtosis — are compared with experimental data.

**Research limitations/implications:** The application of employed methods is limited to weakly nonlinear and weakly dispersive case.

**Originality/value:** The research aims at solving one of the most important problems of oceanography – registration of the surface sea waves.

**Key words:** gravity surface waves, pressure under the waves, nonlinear waves, laboratory experiment, numerical modeling, extreme sea wave.



А.С. Козелков<sup>1,2)</sup>, И.О. Маношина<sup>1)</sup>, В.В. Курулин<sup>1)</sup>,  
Ю.А. Циберева<sup>1)</sup>, Д.А. Уткин<sup>1)</sup>, А.А. Куркин<sup>2)</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БРИЗЕРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАМКАХ ПОЛНОНЕЛИНЕЙНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

<sup>1</sup>ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ ИТМФ,

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматриваются особенности применения пристеночных функций для моделирования гидродинамических течений с вращением. Приведены формулировки метода пристеночных функций, реализованного в пакете программ ЛОГОС. Описаны «улучшенные» пристеночные функции для более точного расчета трения на стенках вращающихся объектов.

Исследование применимости данных функций проводится на задаче вращения кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве. Моделирование осуществляется с помощью RANS модели SST с использованием рассматриваемых пристеночных функций в пакете программ ЛОГОС. С «улучшенными» пристеночными функциями получены результаты более близкие к экспериментальным данным.

**Ключевые слова:** модель турбулентности, пристеночные функции, вращение, вращающийся диск, пакет программ ЛОГОС.

### Введение

Гидродинамические течения с вращением являются одним из наиболее сложных классов задач вычислительной гидродинамики. Задачи этого класса встречаются во многих инженерных и научных задачах и играют большую роль в природе и технике, особенно в задачах судостроения.

При моделировании гидродинамических течений наиболее применимыми на практике в настоящее время являются RANS модели турбулентности [1], которые характеризуются устойчивым итерационным процессом и приемлемыми результатами для большинства практически важных течений. В связи с сильным изменением слагаемых, описывающих турбулентный перенос вблизи стенки, и отсутствием общего подхода к моделированию турбулентности в переходной области RANS модели делят на два подкласса – низкорейнольдсовые и высокорейнольдсовые. В низкорейнольдсовых моделях пристеночная ячейка располагается непосредственно в вязком подслое. В высокорейнольдсовых – пристеночная ячейка формирует практически всю область логарифмического профиля скорости, а распределение скорости в этой ячейке вычисляется с помощью специально сконструированных пристеночных функций.

В настоящее время метод пристеночных функций получил широкое распространение при решении практических задач [2]. Однако, при расчетах течений вплоть до стенки примене-

ние метода «стандартных» пристеночных функций, используемых совместно с высокорейнольдсовыми моделями, может вызывать определенные проблемы. Это связано с тем, что данный метод отражает только свойства равновесной «логарифмической» зоны пристенного течения. Для устранения этого недостатка используют метод «обобщенных» пристеночных функций, согласно которому пристеночная функция применяется в сочетании с низкорейнольдсовой моделью турбулентности и происходит автоматическое определение зоны пограничного слоя - вязкого подслоя или развитого пограничного слоя [3].

Однако и применение метода «обобщенных» пристеночных функций наталкивается на определенные трудности при применении их для моделирования вращающихся объектов в вязкой несжимаемой жидкости. Это связано с необходимостью снижения чувствительности численного решения к густоте расчетной сетки у стенки и учета пространственного характера течения вблизи поверхности вращающихся объектов.

В докладе приведены формулировки и основные принципы использования метода «обобщенных» пристеночных функций [4], реализованного в пакете программ ЛОГОС [5] разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Рассмотрены специальные «улучшенные» пристеночные функции более точного расчета трения на стенках вращающихся объектов [4].

Исследование пристеночных функций для моделирования гидродинамических течений с вращением осуществляется на задаче вращения кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве [6]. Проведено сравнение физических характеристик, полученных по результатам численного моделирования с использованием рассматриваемых пристеночных функций, с экспериментальными данными.

#### **Метод пристеночных функций, реализованный в пакете программ ЛОГОС**

В пакете ЛОГОС реализован метод «обобщенных» пристеночных функций [4]. Согласно предлагаемой формулировке, «обобщенные» пристеночные функции – это некие аппроксимации, которые моделируют универсальные закономерности, присущие пристенной области турбулентных потоков. Эти обобщенные аппроксимации строятся путем «смешивания» решений для вязкого подслоя (индекс  $vis$ ) и для «логарифмической» области (индекс  $log$ ) пристенного течения:

$$U_1 = (U_{vis}^{-4} + U_{log}^{-4})^{-1/4}, U_{vis} = u_\tau y^+, U_{log} = \frac{u_\tau}{k} \log(Ey^+), \quad (1a)$$

$$k_1 = (k_{vis}^{-1} + k_{log}^{-1})^{-1}, k_{vis} = u_\tau^2 \cdot 0.002(y^+)^{3.5}, k_{log} = \frac{u_\tau^2}{0.3}, \quad (1б)$$

$$\omega_1 = [(\alpha_{vis} \omega_{vis})^2 + \omega_{log}^2]^{1/2}, \omega_{vis} = \frac{80\nu}{d^2}, \omega_{log} = \frac{u_\tau}{0.3kd} \quad (1в)$$

Здесь  $U$  – касательная составляющая скорости потока относительно стенки,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – скорость ее диссипации,  $\omega$  – относительная скорость диссипации. Значения указанных величин выражаются через пристеночный масштаб скоростей  $u_\tau$  (так называемая динамическая скорость или «скорость трения») и нормированное расстояние до стенки  $y^+$ :

$$u_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, y^+ \equiv \frac{u_\tau d}{\nu},$$

где  $\tau_w$  – напряжение трения на стенке,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $d$  – расстояние до стенки. Константы:  $k = 0.41$  (константа Кармана),  $E = 9$ ,  $C_m = \beta^* = 0.09$ .

В формулировке (1) в вязком подслое для скорости потока  $U$  и относительной диссипации  $\omega$  используются известные аналитические решения. Аппроксимация (1а) заимствована из работы [7]; в выражении (1в) множитель  $\alpha_{vis} = 0.7$  способствует снижению чувствительности результатов расчета к значению  $y^+$ . Выражение (1а) аппроксимирует численное решение модельной задачи о течении Куэтта в плоском канале с одной движущейся стенкой, полученное на достаточно мелкой сетке ( $y^+ < 0.1$ ) по модели турбулентности  $k - \omega$  SST с использованием «низкорейнольдсовых» граничных условий. Соотношения (1а) используются для определения трения на стенке  $\tau_w$  в зависимости от текущего значения скорости  $U_1$  в первой (ближайшей к стенке) расчетной точке. Соотношения (1б, 1в) задают значения параметров турбулентности в этой точке.

«Обобщенные» пристеночные функции (1) рассматриваются как отправная точка для разработки усовершенствованного варианта пристеночных функций, ориентированных на расчет гидродинамических характеристик вращающихся объектов [4].

Доработка «обобщенных» пристеночных функций необходима для снижения чувствительности численного решения к густоте расчетной сетки у стенки и учета пространственного характера течения вблизи поверхности вращающихся объектов. Все это можно оптимально учесть, настроив пристеночную функцию  $\omega_1(y^+)$ . Настройку данной функции можно провести также на модельной задаче о течении Куэтта в плоском канале с одной движущейся стенкой [4]. Для этого проводится серия расчетов на сгущающихся сетках с разными значениями относительной диссипации  $\omega_1$  в первой расчетной точке и определяется то «оптимальное» значение  $\omega_1$ , при котором рассчитанный коэффициент трения совпадает с его предельным (при  $y^+ \rightarrow 0$ ) значением.

Здесь приведем итоговую формулировку «улучшенных» пристеночных функций:

$$U_1 = (U_{vis}^{-4} + U_{log}^{-4})^{-1/4}, \quad (2a)$$

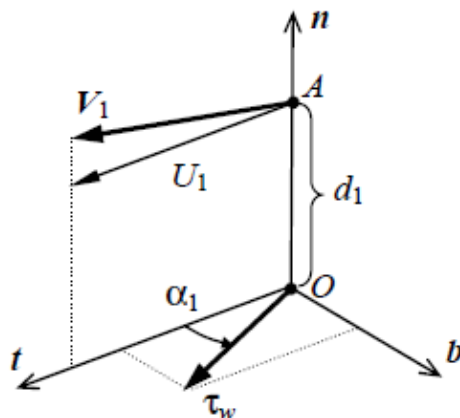
$$k_1 = (k_{vis}^{-1} + k_{log}^{-1})^{-1}, \quad (2б)$$

$$\omega_1 = \left[ \eta \cdot (0.22 + 0.137 y^+) \omega_{vis} + (1 - \eta) \cdot 0.855 \omega_{log} \right] \cdot F_\omega,$$

$$\eta = \left[ 1 + \left( \frac{y^+}{12} \right)^3 \right]^{-1}, \quad F_\omega = 1 + \max \left\{ 0; \min \left[ 0.4 \ln \left( \frac{y^+}{2.4} \right); 0.16 \ln \left( \frac{18}{y^+} \right) \right] \right\}. \quad (2в)$$

Разработанные пристеночные функции (2) предназначены для обеспечения хорошей точности определения величины трения на стенке  $\tau_w$  на разных по густоте сетках, но испытывают сложности с обеспечением сеточной независимости направления вектора трения  $\tau_w$ , что может приводить к искажению структуры потока. Поэтому необходимо провести вычисления угла отклонения  $\alpha_1$  вектора трения на стенке  $\tau_w$  от направления вектора скорости  $V_1$ , так как вблизи поверхности вращающегося тела (как и при любом другом трехмерном обтекании) вектор относительной скорости может менять свое направление при приближении к стенке, а не параллелен направлению вектора трения, как зачастую принимается «по умолчанию».

Представим здесь общие этапы методики учета пространственного характера течения вблизи поверхности вращающихся объектов. Пусть  $O$  – точка на поверхности, в которой определяется трение,  $n$  – орт нормали к поверхности,  $V_1$  – вектор скорости потока относительно стенки в первой расчетной точке  $A$ . Тангенциальный орт  $t$  лежит в плоскости, задаваемой пересечением векторов  $V_1$  и  $n$ ; орт бинормали  $b$  перпендикулярен этой плоскости (рис.1).



**Рисунок 1. Схема к определению направления вектора трения на стенке**

Приведем полную формулировку процедуры коррекции направления вектора трения для учета пространственного характера течения в рамках метода «обобщенных» пристеночных функций:

$$\bar{\tau}_w = \tau_w [t \cdot \cos(\alpha_1) + b \cdot \sin(\alpha_1)], \bar{t} = \bar{b} \times \bar{n}, \bar{b} = \bar{n} \times \bar{V}_1 / V_1 \quad (3a)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = -\frac{d_1}{U_1} \left( \frac{\partial V_b}{\partial n} \right)_1 F_\alpha(y^+), \left( \frac{\partial V_b}{\partial n} \right)_1 = \bar{n} \cdot (\nabla V)_1 \cdot \bar{b} \quad (3b)$$

$$F_\alpha = \frac{f_1}{\sqrt{1 + (f_1 / f_2)^2}}, f_1 = \max \left[ 0, \left( \frac{y^+}{6} \right)^4 - \frac{1}{16} \right], f_2 = \sqrt{\left( \frac{1050}{y^+} \right)^2 + 25} \quad (3в)$$

Здесь  $\left( \frac{\partial V_b}{\partial n} \right)_1$  – производная по нормали к поверхности от бинормальной компоненты вектора скорости, вычисленная в первой расчетной точке  $A$  (рис. 1),  $d_1$  – расстояние от этой точки до стенки,  $U_1$  – касательная составляющая вектора скорости потока относительно стенки,  $F_\alpha(y^+)$  – весовой множитель, определяемый в ходе калибровки метода.

В данной формулировке вектор нормали  $n$  считается направленным внутрь жидкости, а направление вектора  $\tau_w$  отвечает силе трения, действующей со стороны жидкости на стенку. При  $\alpha_1 = 0$  выражения (3) переходят в обычную «скалярную» формулировку «обобщенных» пристеночных функций (без поправки на скос потока).

### **Вращение кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве**

Для тестирования описанных выше пристеночных функций (1) и (2), а также методики (3) рассматривается задача вращения кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве [6]. В данной задаче жидкость вблизи поверхности диска благодаря трению вовлекается во вращательное движение; возникающие при этом центробежные силы

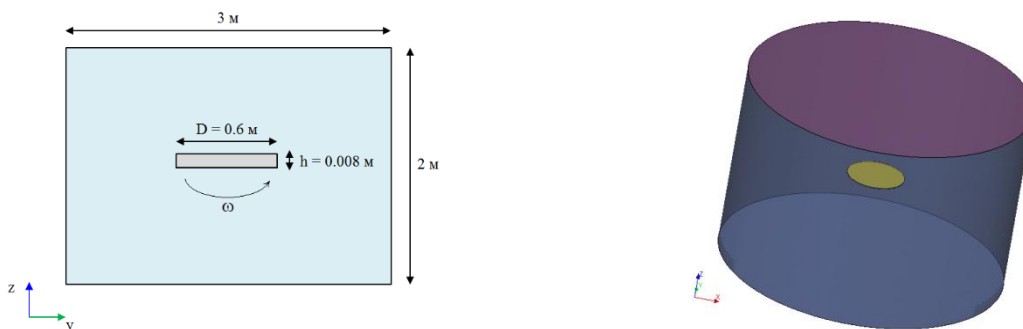
порождают движение жидкости на периферию. Наличие большого числа взаимовлияющих факторов, формирующих движение жидкости у поверхности вращающегося диска, делает численное решение данной задачи весьма чувствительным к точности моделирования и качеству разрешения тонкой структуры потока.

Диск вращается в вязкой несжимаемой жидкости с заданными параметрами среды [6]: плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , вязкость  $\mu = 0,00114 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ . Рассматриваются различные режимы вращения диска (табл. 1) для оценки работоспособности рассматриваемых пристеночных функций.

**Таблица 1. Режимы вращения диска**

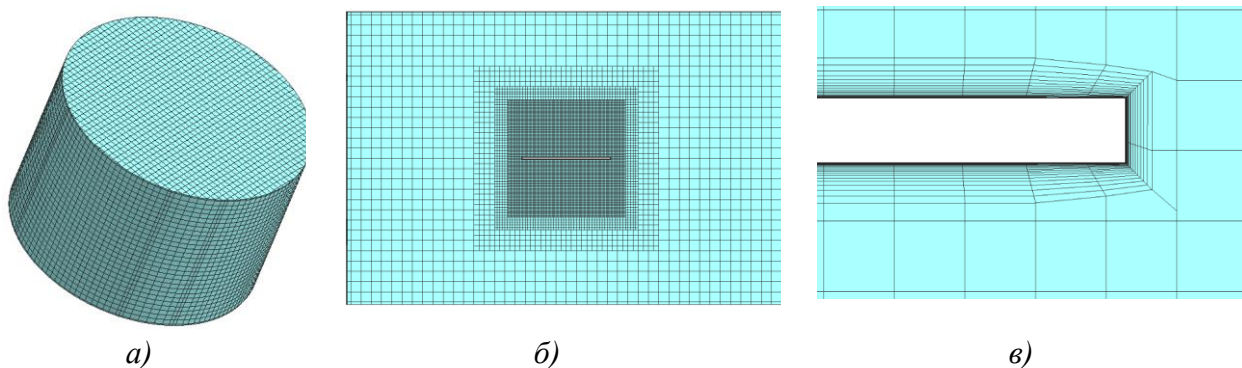
Режим	об/сек	рад/сек	Re	LOG <sub>10</sub> (Re)
1	1,01037	6,34837	501187,23363	5,7
2	2,01596	12,66667	1000000,00000	6
3	4,02237	25,27332	1995262,31497	6,3
4	8,02569	50,42691	3981071,70553	6,6
5	20,15963	126,66667	10000000,00000	7

Геометрия задачи и пример расчетной сеточной модели представлены на рис. 2. Высота вращающегося цилиндра 0,008 м, диаметр 0,6 м.



**Рисунок 2. Схема эксперимента (слева) и расчетная модель (справа)**

Построена гексагональная сетка с измельчением в области диска, содержащая 1 174 544 ячеек. На диске задан пограничный слой толщиной 0,005 м. На рис. 3 показаны сечение расчетной сетки и сетка вблизи диска.



**Рисунок 3. Расчетная сетка: а) общий вид; б) сечение расчетной сетки; в) расчетная сетка вблизи диска**

Проведена серия расчетов для различных режимов вращения диска. Данные расчеты проводились как с использованием «улучшенных» пристеночных функций (2) с учетом (3), так и с «обобщенными» пристеночными функциями (1).

Оценивается коэффициент момента инерции вращающегося цилиндра:

$$C_m = \frac{M}{\frac{\rho}{2} \omega^2 R^5},$$

где  $M$  – момент действующей на цилиндр силы трения,  $\omega$  – число оборотов,  $R$  – радиус цилиндра. Результаты данных расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 4 в сравнении с экспериментальными данными.

Таблица 2. Значения расчетных величин

Режим	lg(Re)	$Y^+$	$C_{m\text{эксп.}}$	$C_m$ ЛОГОС улучш. пристен. ф-ии	delta, %	$C_m$ ЛОГОС обобщ. пристен. ф-ии	delta, %
1	5,7	0,94	0,011152	0,011321	1,51	0,010736	3,73
2	6	1,7	0,009879	0,0099703	0,92	0,009428	4,56
3	6,3	3,2	0,008765	0,0088962	1,50	0,008923	1,81
4	6,6	6,1	0,00779	0,0079524	2,08	0,008236	5,72
5	7	14,1	0,006705	0,0068028	1,46	0,006802	1,44

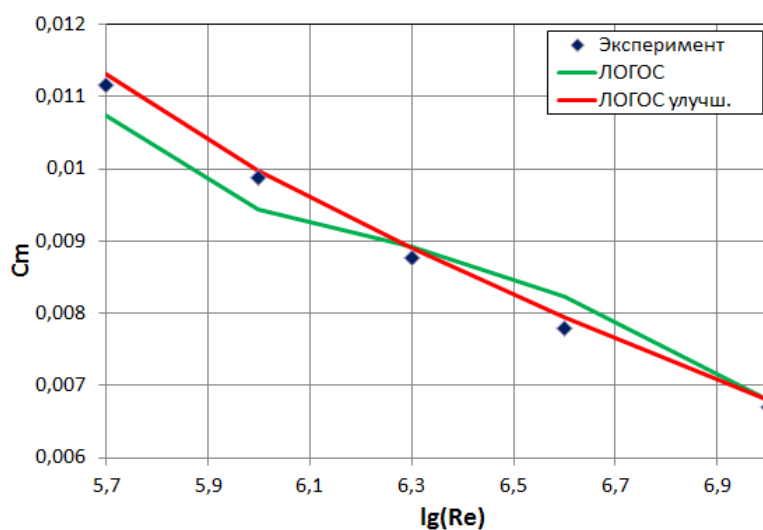


Рисунок 4. График зависимости коэффициента момента инерции от числа Рейнольдса для расчета с «улучшенными» и «обобщенными» пристеночными функциями

Из табл. 2 и рис. 4 видно, что расчеты лучше всего согласуются с экспериментальными данными для режимов течения с  $y^+ \sim 1$  и  $y^+ \sim 14$ . При этом на всех режимах кроме  $y^+ \sim 14$  результаты расчетов с «улучшенными» пристеночными функциями дают результат, более близкий к эксперименту. Отклонение от эксперимента для различных режимов вращения диска не превышает 6%.

## Заключение

В работе представлена формулировка метода «обобщенных» пристеночных функций для модели турбулентности  $k-\omega$  SST, ориентированная на численное моделирование гидродинамических характеристик вращающихся объектов. Метод включает в себя «улучшенные» пристеночные функции для модели  $k-\omega$  SST, обеспечивающие снижение чувствительности расчетного значения напряжения трения на стенке к густоте сетки и независимую методику коррекции направления вектора трения на стенке для учета пространственного характера течения вблизи поверхности вращающихся объектов.

*Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2485.2020.5, а также гранта РФФИ № 18-05-800619.*

## Библиографический список

1. **Снегирев, А. Ю.** Высокопроизводительные вычисления в физике. Численное моделирование турбулентных течений. Учебное пособие / А.Ю. Снегирев. - Санкт-Петербург, Издательство Политехнического Университета, 2009.
2. **Launder B.E., Spalding D.B.** "The numerical computation of turbulent flows", Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1974. – Vol. 3. – P. 269-289.
3. **Grotjans, H., and Menter, F.R.** "Wall functions for industrial applications". In K.D. Papailiou, Editor, Computational Fluid Dynamics'98, 1998, Volume 1, Part 2, pp 1112-1117, Chichester. ECCOMAS, John Wiley Sons.
4. **Zaitsev D.K.** Numerical modeling of steam-gas flow in NPP containment with VVER and passive heat removal / D.K. Zaitsev, E.M. Smirnov, A.A. Smirnovskii, V.V. Bezlepkin, M.A. Zatevakhin, O.I. Simakova, S.E. Semashko, R.A. Sharapov // Atomic Energy. – 2014. – Vol. 115, No. 4. – P. 246-252.
5. **Deryugin Yu.N., Zhuchkov R.N., Zelenskiy D.K., Kozelkov A.S., Sarazov A.V., Kudimov N. F., Lipnickiy Yu. M., Panasenko A. V. and Safronov A. V.** Validation Results for the LOGOS Multifunction Software Package in Solving Problems of Aerodynamics and Gas Dynamics for the Lift-Off and Injection of Launch Vehicles // Mathematical Models and Computer Simulations, 2015, v. 7, №2, p. 144–153.
6. **Дорфман, Л.А.** Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел / Л.А. Дорфман. – М.: Физматлит, 1960. – 260 с.
7. **Смирнов, Е.М.** Разработка математических моделей и алгоритмов для численного моделирования задач аэродинамики с использованием современных моделей турбулентности / Е.М. Смирнов, М.Х. Стрелец // Отчет о НИР. Санкт-Петербург, СПбГПУ. – Декабрь 2010. – 155 с.

**A.S.Kozelkov<sup>1,2)</sup>, I.O. Manoshina<sup>1,2)</sup>, V.V. Kurulin<sup>1)</sup>, Yu.A. Tsibereva<sup>1)</sup>,  
D.A. Utkin<sup>1)</sup>, A.A. Kurkin<sup>2)</sup>**

**APPLICATION OF WALL FUNCTIONS FOR NUMERICAL SIMULATION  
OF HYDRODYNAMIC FLOWS WITH ROTATION**

<sup>1</sup> FSUE “RFNC-VNIIEF”, Nizhny Novgorod Region, Sarov

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

The aspects of application of wall functions for simulation of hydrodynamic flows with rotation are considered. The formulas of the wall functions implemented in LOGOS software package are given. The advanced wall functions for more accurate prediction of wall friction properties on the rotating bodies are presented. The wall functions are investigated on the problem of the steady rotating disk using SST turbulence model in LOGOS software package. It is demonstrated that advanced wall functions give the results which are closer to the experimental data.

**Keywords:** turbulence model, wall functions, rotation, rotating disk, LOGOS software package.



Д.А. Уткин<sup>1)</sup>, Е.С. Тятюшкина<sup>1,2)</sup>, А.С. Козелков<sup>1,2)</sup>, В.В.Курулин<sup>1)</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕОТРАЖАЮЩИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

<sup>1</sup>ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ ИТМФ

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена реализация неотражающих граничных условий для математической модели, основанной на решении трёхмерных уравнений Навье-Стокса и методики VOF. Рассматриваются два численных алгоритма. Первый алгоритм основан на использовании предопределённых выражений для открытых границ, полученных с помощью метода характеристик. Второй подход основан на применении демпфирующей пористой зоны для обеспечения затухания волны. Проведено исследование определения параметров пористой зоны для метода зоны демпфирования. Эффективность реализованных алгоритмов демонстрируется на задачах со свободной поверхностью.

**Ключевые слова:** неотражающие граничные условия, метод VOF, уравнения Навье-Стокса, течение со свободной поверхностью.

### Введение

Задачи вычислительной гидродинамики зачастую требуют использования неотражающих граничных условий, имитирующих бесконечное пространство за пределами расчетной области. Типичная задача со свободной поверхностью, где необходимо применение неотражающих граничных условий – распространение волн в акваториях с открытыми границами. Построение неотражающих граничных условий для задач подобного типа – нетривиальная процедура.

Обзор литературы показывает, что существующие подходы реализации неотражающих граничных условий в задачах со свободной поверхностью можно условно разбить на два класса – использование предопределённых выражений для открытых границ [1-5] и применение демпфирующего пористого слоя [6-9]. Методика первого подхода требует, чтобы расчётная область была разбита на структурированные счётные ячейки, поэтому обобщение этого метода на трёхмерные случаи осложняется за счёт этих требований [2]. Что касается второго метода – в литературе его часто именуют «пористым слоем» (spongelaye) [9], и он доступен в современных коммерческих пакетах для решения задач со свободной поверхностью по методике VOF.

### Описание подходов реализации открытых границ

Первый подход связан с получением характеристических граничных условий для нелинейных гиперболических систем уравнений [1,2]. Граничные условия, в таком случае, представляют собой формульные выражения, аппроксимирующие значения вектора скорости и объемной доли в области при неотражающей границе:

$$\begin{aligned}
h_1^n &= \frac{\int_{\Omega} \alpha_1^n d\Omega}{\Omega} & u_{1,i}^{n*} &= \frac{\int_{\Omega} (\alpha_1^n u_{1,i}^n) d\Omega}{\Omega} & (1) \\
h_b^n &= \frac{1}{16|g|} \left( 2\sqrt{|g|} h_{\infty} - u_1^n + 2\sqrt{|g|} h_1^n \right)^2 \\
u_{b,i}^n &= \frac{1}{2} \left( 2\sqrt{|g|} h_{\infty} + u_1^n - 2\sqrt{|g|} h_1^n \right) \\
\alpha_b^n &= \begin{cases} 0 & z \geq h_b^n \\ 1 & z < h_b^n \end{cases}
\end{aligned}$$

где  $\Omega$  – область интегрирования, являющаяся частью неотражающей границы,  $\alpha_1^n$  – объёмная доля воды в слое ячеек, примыкающем к области  $\Omega$ ,  $u_{1,i}^n$  – компонента скорости в слое ячеек, примыкающем к области  $\Omega$ ,  $h_1^n$  и  $u_{1,i}^{n*}$  – значение глубины и скорости, вычисленные при области  $\Omega$ ,  $h_b^n$  и  $u_{b,i}^n$  – значения глубины и скорости, вычисленные на непосредственной границе,  $\alpha_b^n$  – объёмная доля на неотражающей границе.

Оценки эффективности, а также способы применения данного подхода для произвольной конфигурации донной поверхности и неструктурированной расчетной сетки в литературе не встречаются. Реализация данного алгоритма требует, чтобы расчётная сетка удовлетворяла конкретным требованиям. Во-первых, область ячеек при неотражающей границе должна разбиваться на относительно небольшие вертикальные подобласти  $\Omega$  для повышения точности вычисления интегралов (1). Во-вторых, алгоритму необходимо знать значение глубины воды за пределами расчётной области  $h_{m,\infty}$ , которая также может отличаться при каждой отдельной подобласти  $\Omega$ .

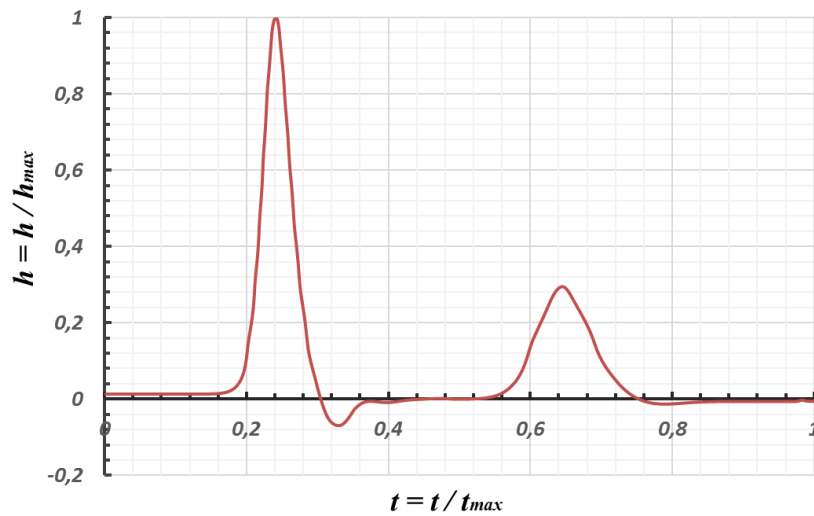
Второй подход связан с формированием специального демпфирующего пограничного слоя – в расчетной области выделяется приграничный участок со свойствами пористой среды, и волны, прибывающие в него, плавно теряют свою кинетическую энергию. Данный эффект реализуется за счет источника в уравнении сохранения импульса с заданными свойствами демпфирования: ширины области демпфирования и коэффициента пористости. Данный подход удобен в реализации на неструктурированной расчетной сетке. Его главный недостаток – оптимальные свойства области демпфирования зависят от параметров поверхностных волн и в общем случае неизвестны.

Программная реализация рассматриваемых подходов сделана на базе пакета программ ЛОГОС [10], где в качестве методики моделирования задач со свободной поверхностью используется метод VOF [11,12], широко апробированный для решения практических задач [13]. Численный алгоритм основан на конечно-объемной дискретизации и алгоритме совмещенного решения уравнений Навье-Стокса [12].

### Решение тестовых задач

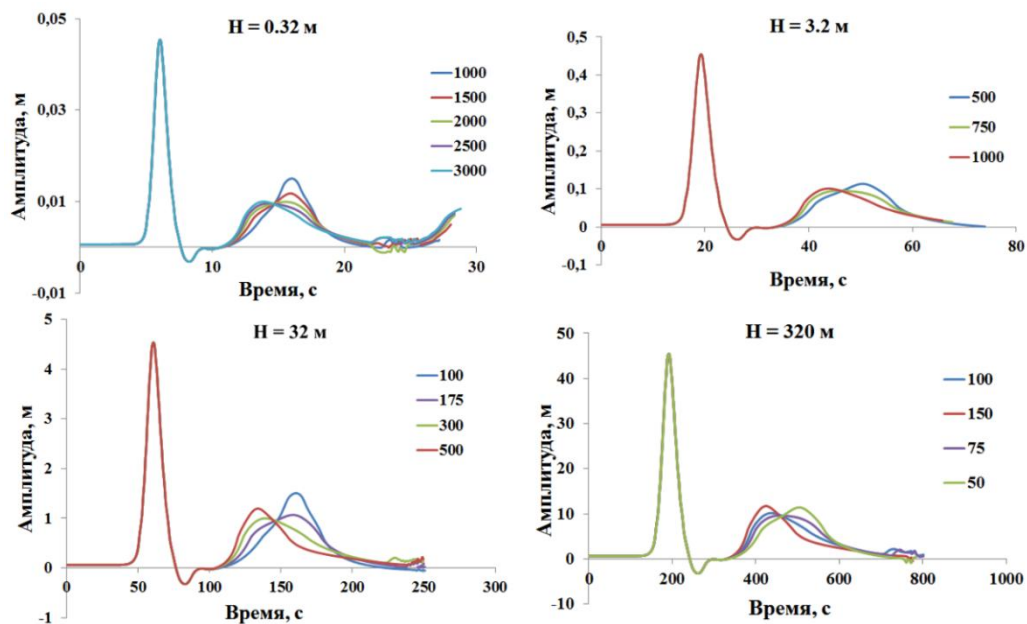
Для первого подхода получен алгоритм его применения для произвольной конфигурации донной поверхности через разбиение границы на одномерные сегменты и нахождения для каждого сегмента интегральных выражений. Для тестирования первого подхода была выбра-

на задача распространения одиночной волны высотой  $H$  в водном бассейне. Волна с заданными параметрами распространяется от левой границы к правой неотражающей. Показания мареографа, размещённого на расстоянии одной ширины волны от неотражающей границы, представлены на рис. 1. Отразившаяся волна наблюдается при  $t > 0.5$ , где показано, что высота исходной волны уменьшилась в 3.44 раз.



**Рисунок 1. Показания мареографа**

Для тестирования решалась та же самая задача, однако в правой части канала расположен пористый регион. На первом этапе моделировалось распространение волны в каналах разной глубины для выбора оптимального коэффициента пористости, при котором амплитуда отраженной волны наименьшая. Затем при постоянной глубине канала варьировалась ширина пористого региона для одной длины волны при фиксированной глубине канала. На рис. 2 представлены графики сравнения амплитуды отраженной волны при различных коэффициентах пористости для каналов разной глубины.



**Рисунок 2. Показания мареографа**

Таким образом, получили, что оптимальный коэффициент пористости для глубины канала 0.32 м равен 2000, для глубины 3.2 м – 750, для глубины 32 м – 175, для глубины 320 м – 75.

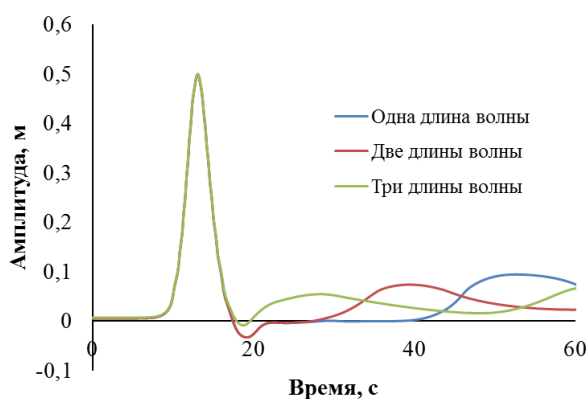
Исходя из полученных данных, была подобрана зависимость коэффициента пористости от глубины канала, выражаемая формулой:

$$K = \frac{1130}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

где  $d$  – глубина канала.

На втором этапе исследований был выбран канал глубиной 3.2 м, длина волны 40.24 м, а варьировалась ширина зоны пористости. Ширина зоны пористости бралась равной одной, двум и трем длинам волн. Коэффициент пористости  $K = 750$ .

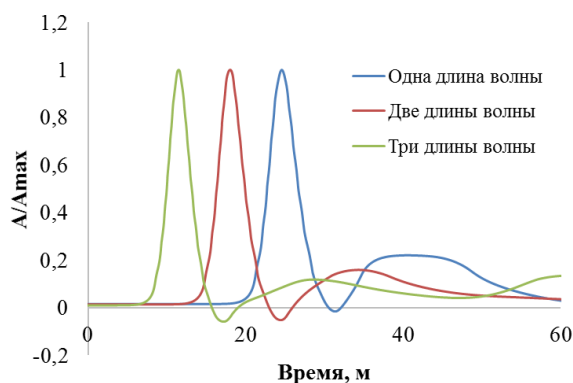
Сначала мареограф был установлен в точке  $x = 100$  м для всех трех постановок. На рис. 3 представлено сравнение амплитуды приходящих в мареограф волн с амплитудой отраженных волн для трех вариантов постановок.



**Рисунок 3. Сравнение амплитуды приходящих волн с амплитудой отраженных волн**

Как видно из рисунка, при ширине пористого региона, равном трем длинам волн, амплитуда отраженной волны наименьшая. Амплитуда отраженной волны составляет 18.9% от амплитуды приходящей волны для первой постановки, 14.4% и 10% – для второй и третьей соответственно.

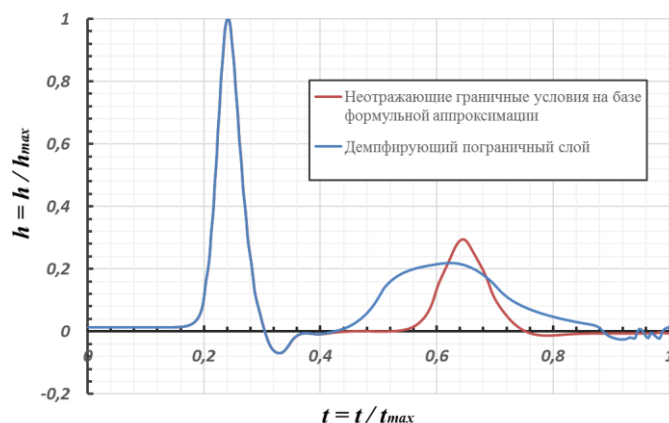
Затем мареографы ставились за 20 метров до пористого региона. На рис. 4 представлено сравнение амплитуды приходящих в мареограф волн с амплитудой отраженных волн для трех вариантов постановок.



**Рисунок 4. Сравнение амплитуды приходящих волн с амплитудой отраженных волн**

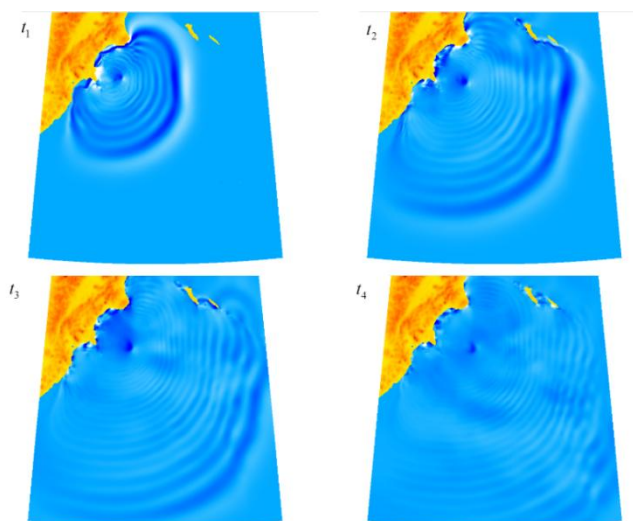
Амплитуда отраженной волны составляет 22.3% от амплитуды проходящей волны для первой постановки, 16% и 12% – для второй и третьей соответственно. При таком положении мареографа также видно, что при ширине пористого региона, равному трем длинам волн, амплитуда отраженной волны наименьшая.

На рис. 5 представлен график сравнения показаний мареографа на рассмотренной задаче, где результаты были получены для двух подходов, направленных на уменьшение отражений волн при границах. Оправданность применения того или иного подхода определяется сложностью решаемой задачи.



**Рисунок 5. Сравнение амплитуды проходящих волн с амплитудой отраженных волн**

В качестве примера практического использования методики избавления от отражённых волн рассмотрена задача распространения волн в акватории Тихого океана вблизи полуострова Камчатка. В представленной задаче применялась методика демпфирующего пограничного слоя, поскольку по причине неструктурированности применяемой расчётной сетки обеспечивать удовлетворение требований алгоритма, основанного на формульной аппроксимации, к расчётной сетке является затруднительным. На рис. 6 представлена визуальная картина распространения волн в акватории, где ширина области демпфирования составляет две длины волны. Наблюдается, что волны, по мере приближения к границам расчётной области, плавно затухают.



**Рисунок 6. Визуальная картина распространения волн в акватории п-ва Камчатка**

## Заключение

В рамках настоящей работы рассмотрены методики реализации свободных границ для задач со свободной поверхностью. Описана реализация алгоритма неотражающих граничных условий, основанная на методе характеристик, первоначально применяемая для уравнений мелкой воды и обобщённая на методику VOF. Рассмотрена методика поглощения волн за счёт формирования пористой зоны демпфирования. Проведено исследование определения параметров пористой зоны для метода зоны демпфирования, выявлена эмпирическая зависимость значения коэффициента пористости от глубины моделируемого канала.

*Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2485.2020.5, а также гранта РФФИ № 18-05-800619.*

## Библиографический список

1. **Jackson, Дородницын Л.В.** Неотражающие граничные условия для систем уравнений газовой динамики // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2002. – т.42, №4, 522-549.
2. **Fürst J., Musil J.** Development of non-reflective boundary conditions for free-surface flows // Topical problems of fluid mechanics. – 2018. – Prague. – pp.97-104.
3. **Sajal K. Kar, Richard P.** Turco Formulation of a Lateral Sponge Layer for Limited-Area Shallow-Water Models and an Extension for the Vertically Stratified Case // Mon. Wea. Rev., vol.123, pp. 1542-1559.
4. **Dan Givoli, BenyNeta** High-order nonreflecting boundary conditions for the dispersive shallow water equations // Journal of Computational and Applied Mathematics 158 (2003) 49-60.
5. **Овчарова, А.С.** Метод расчёта стационарных течений вязкой жидкости со свободной границей в переменных вихрь-функция тока // Прикладная механика и техническая физика, 1998, т.39, №2, 59-66 с.
6. Chandra Shekhar Pant, Amitabh Bhattacharya A viscous sponge layer formulation for robust large eddy simulation of thermal plumes // Computers and Fluids 134–135 (2016) 177–189
7. **Yanxu Wang, Zegao Yin, Yong Liu, Ning Yu, Wei Zou** Numerical investigation on combined wave damping effect of pneumatic breakwater and submerged breakwater // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 11 (2019) 314-328
8. **Junwoo Choi, Sung Bum Yoon** Numerical simulations using momentum source wave-maker applied to RANS equation model // Coastal Engineering 56 (2009) 1043–1060
9. **A. Colombo, A. Crivellini** Assessment of a sponge layer non-reflecting boundary treatment for high-order CAA/CFD computations // Computers and Fluids 140 (2016) 478–499
10. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков [и др.] // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – т.56. № 8. 1524-1535.
11. **Ubbink O.** Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces // PhD thesis, Imperial College, University of London. – 1997.

12. **Козелков, А.С.** Полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью / А.С. Козелков [и др.] // Вычислительные технологии. – 2016. – т. 21. № 5. 54-76.

13. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью / А.С. Козелков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). 49-69.

**D.A.Utkin<sup>1</sup>, E.S. Tyatyushkina<sup>1,2</sup>, A.S.Kozelkov<sup>1,2</sup>, V.V. Kurulin<sup>1</sup>**

### **APPLICATION OF NONREFLECTING BOUNDARY CONDITIONS FOR SIMULATION OF FREE-SURFACE PROBLEMS**

<sup>1</sup> FSUE “RFNC-VNIIEF”, Nizhny Novgorod Region, Sarov

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Implementation of nonreflecting boundary conditions for VOF-based numerical model is presented. Two numerical algorithms are considered. The first algorithm of prescribed boundary conditions is based on the method of characteristics. The second one is a sponge layer method for wave damping effect. An investigation of the optimal parameters for wave damping zone was conducted. The performance of the implemented algorithms is demonstrated.

**Keywords:** nonreflecting boundary conditions, wave damping, volume of fluid method, Navier-Stokes equations

Е.Н.Пелиновский<sup>1-3</sup>, Т.Г.Галипова<sup>1,2</sup>, Е.Г. Диденкулова<sup>1-3</sup>, Е. Тобиш<sup>4</sup>

## АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ТИПА КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА С ИНТЕГРАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский технический университет им. Р. Е. Алексеева

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>Университет Кеплера, Линц, Австрия

Найдены автомодельные решения линеаризованного уравнения Кортевега-де Вриза с интегральной дисперсией, Фурье-спектр которой является степенной функцией волнового числа. Показано, что в зависимости от величины степени реализуются два вида решений: волновой пакет с нарастающей или убывающей амплитудой. Обсуждается роль этих решений в анализе дисперсионного механизма формирования волн-убийц.

**Ключевые слова:** уравнение типа Кортевега-де Вриза, автомодельные решения, механика жидкости, волны-убийцы.

### Введение

Уравнения типа Кортевега-де Вриза играют важную роль в динамике длинных волн в различных средах [1-4]. Для математики эти уравнения представляют интерес с точки зрения интегрируемости нелинейных эволюционных уравнений. Для физиков важны процессы взаимодействия солитонов и их устойчивости. Наконец, стоит отметить эффекты модуляционной неустойчивости и нелинейно-дисперсионной фокусировки волновых пакетов, важные для понимания генерации аномально больших волн, получивших название «волн-убийц» [5-6].

Здесь мы получим автомодельные решения линеаризованных уравнений типа Кортевега-де Вриза которые важны для понимания эволюции импульсных возмущений и формирования волн-убийц.

### Эволюционные уравнения и дисперсионные характеристики

В приближении длинных волн, распространяющихся в одном направлении, дисперсионная характеристика аппроксимируется первыми двумя членами

$$\omega = ck - \beta_m |k|^m k \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число и  $\omega$  - ее частота,  $c$  – скорость линейных длинных волн,  $\beta_m$  - численный коэффициент, размерность которого видна из уравнения (1), и его знак может быть любым. Показатель степени предполагается не равным нулю  $m \neq 0$  (в противном случае среда не имеет дисперсии), и он может быть как положительным, так и отрицательным. Знак модуля в (1) включен, чтобы рассматривать волновые числа и частоты в отрицательном диапазоне



не, что удобно для комплексного Фурье-анализа волновых процессов. В частности, от дисперсионного уравнения (1) можно перейти к эволюционному уравнению

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_m \frac{\partial}{\partial x} D_m \{u\} = 0, \quad (2)$$

где оператор  $D\{u\}$  в Фурье-представлении имеет следующий вид

$$D_m \{u\} = -|k|^m S(k, t). \quad (3)$$

Здесь  $S(k, t)$  – пространственный, в общем случае комплексный, Фурье спектр

$$S(k, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) \exp(ikx) dx. \quad (4)$$

Для нечетных положительных значений показателя  $m$  уравнение (2) становится уравнением в частных производных, для четных положительных  $m$  в последнем слагаемом появляется оператор Гильберта, и для отрицательных  $m$  – оно становится интегральным. Мы не приводим здесь эти частные случаи.

Дисперсионная характеристика (1) и соответствующее ей эволюционное уравнение (2) встречаются во многих моделях поверхностных и внутренних волн в океане [4]. В частности, если  $m = 2$ , то уравнение (2) сводится к известному уравнению Кортевега-де Вриза (КдВ) в линейном приближении [1]; при  $m = 1$  – к уравнению Бенджамина-Оно (БО) также в линейном приближении [7-8]; при  $m = -2$  – к редуцированному уравнению Островского [9]. Отметим, что при  $c = 0$ , и при  $m = -1/2$  дисперсионная характеристика (1) описывает волны на глубокой воде, а при  $c = 0$  и  $m = 1/2$  – короткие капиллярные волны [1], так что в общем случае мы можем не ограничиваться только длинными волнами.

Наконец, важно подчеркнуть, что можно перейти в систему отсчета, двигающуюся со скоростью линейных длинных волн,  $c$ , так что без ограничения общности далее положим  $c = 0$ .

### **Приближенное описание процесса распространения частотно-модулированных сигналов**

Наиболее просто изучить дисперсионные эффекты в рамках кинематического уравнения Уизема для локального значения волнового числа  $k(x, t)$  – для определенности здесь рассматриваются только положительные значения волнового числа [1]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + c_{gr}(k) \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

где групповая скорость волнового пакета находится из (1)

$$c_{gr} = \frac{d\omega}{dk} = -(m+1)\beta_m k^m. \quad (6)$$

Легко показать, что уравнение (5) имеет автомодельное решение [6]

$$c_{gr}(k) = \frac{x - x_f}{t_f - t}. \quad (7)$$

Здесь  $x_f$  и  $t_f$  – указывают положение так называемой фокальной точки, когда все волновые пакеты соберутся в один момент времени, образуя волну большой амплитуды («идеальная» волна-убийца). Учитывая (6), начальное распределение волнового числа в цуге есть ( $x < x_f$ )

$$k(x, 0) = \left[ \frac{x_f - x}{(m+1)\beta_m t_f} \right]^{1/m}. \quad (8)$$

В общем случае это выражение описывает дисперсионное сжатие волновых пакетов (при  $t < t_f$ ) и их последующее расхождение в пространстве (при  $t > t_f$ ).

Автомодельное решение (7) очень наглядное, однако оно не работает в окрестности фокуса и не позволяет предсказать форму возникающей волны-убийцы.

### Автомодельное решение уравнения (2)

Для анализа волнового процесса в окрестности фокуса (момент образования волны-убийцы) необходимо решать уравнение (2) с заранее неясными начальными условиями, ведь только некоторые из них приведут к образованию больших волн. Между тем, можно воспользоваться свойством инвертированности уравнения (2) относительно знака времени и координаты, задать начальное условие в виде ожидаемой волны убийцы и посмотреть ее превращение в волновой пакет малой амплитуды. Инвертируя тогда полученное решение, мы сможем быть уверенным в ее трансформацию в волну-убийцу заданной формы. Этот способ был применен в [10] для анализа волн-убийц в рамках нелинейного уравнения Кортевега-де Вриза. Позднее этот прием в иностранной литературе был назван как “time-reversing” [11].

«Идеальным» образом волны-убийцы является дельта-функция

$$u_0(x) = A_0 \delta\left(\frac{x}{l}\right). \quad (9)$$

где параметры  $A_0$  и  $l$  выбраны только для масштабирования, и в принципе, могут быть опущены. Это же начальное условие используется для получения функции Грина и автомодельных решений. Тогда общее решение уравнения (2) с начальным условием (9) сводится к интегралу [12-13]

$$u(x, t) = \frac{A_0 l}{\pi} \int_0^{+\infty} \cos[\omega(k)t - kx] dk, \quad (10)$$

который представим в виде

$$u(x, t) = \frac{A_0 l}{2^{m+1} \sqrt{3} |\beta_m| t} \Phi \left[ \frac{x \operatorname{sgn} \beta_m}{m+1 \sqrt{3} |\beta_m| t} \right], \quad (11)$$

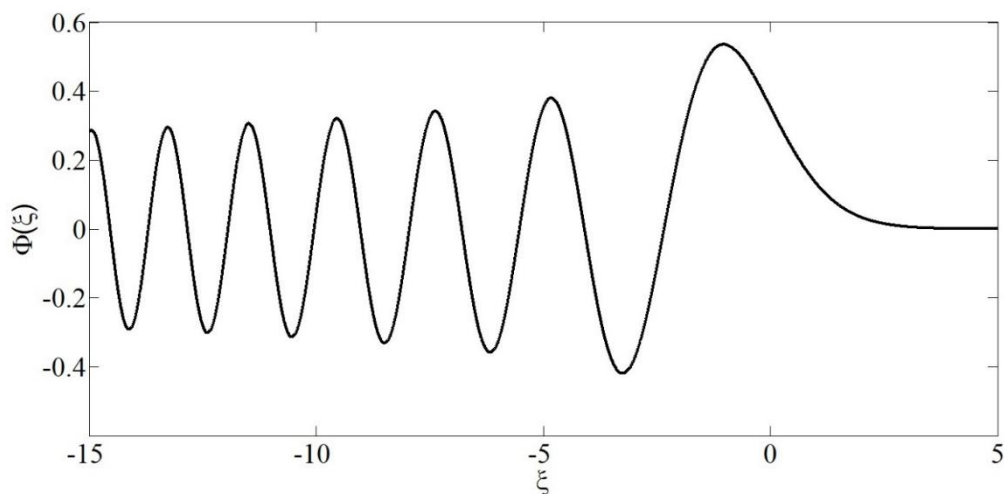
$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \left[ \xi z + \frac{z^{m+1}}{3} \right] dz. \quad (12)$$

Данное решение является автомодельным (зависит только от одной функции и описывает расплывание волнового пакета в пространстве). В частности, при  $m = 2$ , когда уравнение (2) сводится к линеаризованному уравнению Кортевега-де Вриза, функция  $\Phi(\xi)$  выражается через известную функцию Эйри первого рода  $\Phi(\xi) = \operatorname{Ai}(\xi)$  [14]. Функция Эйри описывает затухающий (как  $t^{-1/3}$ ) пук с максимальной головной волной, расплывающейся в пространстве пропорционально  $t^{1/3}$  (рис. 1).

В общем же случае амплитуда волны убывает как  $t^{-1/(m+1)}$ , а ее длина как  $t^{1/(m+1)}$ . Интеграл (12) также вычисляется для значений  $m = 1/2$  и  $m = 1$  через специальные функции<sup>1</sup>, но мы не

<sup>1</sup> Мы благодарны А.В. Слюняеву, указавшему на это.

будем их приводить в силу громоздкости окончательных выражений. В общем случае, не удастся аналитически вычислить интеграл (12) и свести функцию  $\Phi(\xi)$  к известным. Поэтому здесь изучим асимптотику автомодельного решения (11) на больших временах в области  $\beta_m x < 0$  с помощью метода стационарной фазы [3,15].



**Рис. 1. Функция Эйри – автомодельное решение линеаризованного уравнения Кортевега-де Вриза**

Волновое поле представимо в виде

$$u(x, t) = A(x, k_*; t) \cos [\Psi(x, k_*; t)] , \quad (13)$$

$$\text{где } c_{gr}(k_*) = \frac{d\omega}{dk} = -(m+1)\beta_m k_*^m = \frac{x}{t} . \quad (14)$$

Огибающая волнового пакета имеет простой вид

$$A(x, t) = A_0 l \sqrt{\frac{2}{m}} \frac{(-x \operatorname{sgn} \beta_m)^{\frac{1-m}{2m}}}{\sqrt{(m+1)|\beta_m|t}} . \quad (15)$$

а фаза

$$\Psi(x, k_*; t) = \omega(k_*)t - k_*x - \pi/4 = -\frac{m}{m+1} k_*x - \pi/4 = -\frac{mx}{m+1} \left[ \frac{-x \operatorname{sgn} \beta_m}{\beta_m(m+1)t} \right]^{1/m} - \pi/4 . \quad (16)$$

Как и ожидалось, со временем амплитуда волны падает, а вот в пространстве мы получаем два качественно разных режима. При  $m > 1$  амплитуда волны затухает с удалением от головной волны (как в функции Эйри), а при  $m < 1$  амплитуда волны с удалением от головной волны растет неограниченно. В пограничном случае  $m = 1$  амплитуда волны неизменна в пространстве; этот случай подробно изучен в [13]. Длина волны во всех случаях уменьшается с удалением от головной волны. Формально, решение (13) не работает в окрестности головной волны (малые значения волнового числа), однако сейчас нас больше интересует волновой пакет в целом, а не несколько первых волн, тем более, что при  $m < 1$  они имеют малую амплитуду по сравнению с остальными.

Итак, мы получили точное решение и его асимптотическое представление в случае, когда начальное условие представляет собой дельта-функцию. Инвертируя полученное автомодельное решение в пространстве

$$u(x,t) = \frac{A_0 l}{2^{m+1} \sqrt{3|\beta_m|(t_f - t)}} \Phi \left[ \frac{-x \operatorname{sgn} \beta_m}{m+1 \sqrt{3|\beta_m|(t_f - t)}} \right], \quad (17)$$

мы можем утверждать, что в момент времени  $t_f$  волновой пакет (17) трансформируется в дельта-функцию, а затем снова расплывается.

Математически автомодельное решение представлено выше. Однако физическая интерпретация полученного решения не является однозначной. При  $m \geq 1$  волновой пакет малой амплитуды преобразуется в одиночную волну неограниченной амплитуды («идеальную» волну-убийцу). В противоположном случае волновой пакет уже имеет неограниченную амплитуду на одном из своих концов, и его схлопывание в дельта-функцию не ведет к появлению волны с еще большей амплитудой. Поэтому дисперсионный сценарий формирования «идеальной» волны-убийцы не работает в этом случае, и такая волна не может возникнуть из малоамплитудного возмущения. Тем не менее, волна-убийца (но не идеальная) может возникнуть, если в волновом пакете обрезать высокоамплитудные хвосты. Этот сценарий будет исследован позднее. Расчеты подобных сценариев могут быть сделаны с использованием автомодельных решений (11), задаваясь начальным условием в виде ожидаемой волны-убийцы  $u_{fr}(x)$ ; это решение записывается в интегральной форме

$$u(x,t) = \frac{A_0 l}{2^{m+1} \sqrt{3|\beta_m|t}} \int_{-\infty}^{+\infty} u_{fr}(y) \Phi \left[ \frac{x \operatorname{sgn} \beta_m - y}{m+1 \sqrt{3|\beta_m|t}} \right] dy. \quad (18)$$

### Заключение

Найдено интегральное представление для автомодельного решения линеаризованного уравнения Кортевега-де Вриза с интегральной дисперсией и изучена структура решения вдали от головной волны. На этой основе рассмотрен процесс дисперсионного сжатия волновых пакетов в средах с полиномиальной дисперсионной характеристикой и сформулированы условия оптимальной фокусировки волнового пакета. Автомодельное решение позволяет понять формирование «идеальной» волны-убийцы (в виде дельта-функции). Демонстрируется, что «идеальная» волна-убийца возможна только при  $m \geq 1$ . В противоположном случае волна-убийца возможна, но ее форма отлична от «идеальной».

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-0016 и № 19-02-00111.*

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-12-00253 «Нелинейные механизмы генерации волн-убийц».*

### Библиографический список

1. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем - М.: Мир, 1977. 624 с.
2. Drazin, P.G., Johnson, R.S. Solitons: an introduction / P.G.Drazin, R.S.Johnson - Cambridge University Press. 1999. 226 p.
3. Ablowitz, M.J. Nonlinear dispersive waves. Asymptotic analysis and solitons / Ablowitz, M.J. - Cambridge University Press, 2011. 345 p.

4. **Пелиновский, Е.Н.** Семейство уравнений типа Кортевега - де Вриза в приложениях / Е.Н. Пелиновский [и др.] // Труды НГТУ им. Р. Алексеева. 2018. № 4. С. 41-47.
5. **Kharif, Ch., Pelinovsky, E., Slunyaev, A.** Rogue Waves in the Ocean / Ch.Kharif, E.Pelinovsky, A.Slunyaev - Springer, 2009. 216 p.
6. **Куркин, А.А., Пелиновский, Е.Н.** Волны убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский - 2-е издание. Direct-Media, Москва-Берлин, 2016. 178 с.
7. **Benjamin, T.B.** Internal waves of permanent form in fluids of great depth / T.B. Benjamin // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. № 3. P. 559 - 592.
8. **Ono, H.** Algebraic solitary waves in stratified fluid / H.Ono // J. Phys. Soc. Japan. 1975. V. 39. № 4. P. 1082 - 1091.
9. **Geyer, A., Pelinovsky, D.E.** Spectral stability of periodic waves in the generalized reduced Ostrovsky equation / A. Geyer, D.E. Pelinovsky // Lett. Math. Phys. 2017. V. 107. P. 1293–1314.
10. **Pelinovsky, E., Talipova, T., Kharif, C.** Nonlinear dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water / E.Pelinovsky, T.Talipova, C. Kharif //Physica D. 2000. V. 147. № 1-2. P. 83-94.
11. **Chabchoub, A., Fink, M.** Time-reversal generation of rogue waves / A.Chabchoub, M.Fink // Physical Review Letters. 2014. V.112. P. 124101.
12. **Sidi, A., Sulem, C., Sulem, P.L.** On the long time behaviour of a generalized KdV equation / A.Sidi, C.Sulem, P.L. Sulem//Acta Applicandae Mathematicae. 1986. V.7. P. 35-47.
13. **Saut, J.C.** Benjamin-Ono and Intermediate Long Wave Equations: Modeling, IST and PDE / J.C. Saut// In: Miller P., Perry P., Saut J.C., Sulem C. (eds) Nonlinear Dispersive Partial Differential Equations and Inverse Scattering. Fields Institute Communications. Springer, New York 2019. V. 83. P. 95-160.
14. **Абрамовиц, М., Стиган, И.** Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. - М.:Наука, 1979. 830 стр.
15. **Федорюк, М.В.** Метод перевала / М.В. Федорюк - М.:Наука, 1977. — С. 366.

**Pelinovsky E.N., Talipova T.G., Didenkulova E.G., Tobish E.**

### **AUTOMODEL SOLUTIONS OF THE LINEARIZED EQUATION OF KORTEWEG - DE VRIES TYPE WITH INTEGRAL DISPERSION**

Self-similar solutions of the linearized Korteweg-de Vries equation with integral dispersion, the Fourier spectrum of which is a power function of the wave number, are found. It is shown that, depending on the magnitude of the degree, two types of solutions are realized: a wave packet with increasing or decreasing amplitude. The role of these solutions in the analysis of the dispersion mechanism of the formation of freak waves is discussed.

**Key-words:** Korteweg-de Vries equation, self-similar solutions, fluid mechanics, freak waves.

Е.Н. Пелиновский<sup>1-3</sup>, Т.Г. Талипова<sup>1,2</sup>, Е.Г. Диденкулова<sup>1-3</sup>

## ПРОСТРАНСТВЕННО ЭВОЛЮЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ УИЗЕМА И БУССИНЕСКА В ТЕОРИИ ВОЛН НА ВОДЕ

<sup>1</sup>Сектор моделирования экстремальных волновых явлений в океане, Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Лаборатория моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>3</sup>Лаборатория динамических систем и приложений, Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики

Известные уравнения Буссинеска и Уизема описывают эволюцию волн во времени и плохо «приспособлены» для решения граничных задач. Здесь выведены аналогичные уравнения, в которых эволюционной переменной является координата. Отмечается главная трудность всех преобразований, связанная с неразрешимостью дисперсионного соотношения для волн на воде относительно волнового числа, и предлагается ряд аппроксимационных зависимостей.

**Ключевые слова:** волны на воде, уравнения Буссинеска, уравнение Уизема, граничная задача.

### Введение

Нелинейные эволюционные уравнения играют важную роль в математике и физике. Уравнения Кортевега-де Вриза, нелинейное уравнение Шредингера и уравнение синус-Гордона стали основными модельными явлениями волновых процессов в самых разнообразных приложениях [1]. Именно на этих уравнениях впервые была продемонстрирована важнейшая роль солитонов, которые не деформируются в нелинейных диспергирующих средах и могут переносить информацию на большие расстояния, что и используется, например, в современных оптических линиях связи. Будучи уравнениями в частных производных с «минимальным» порядком производных по времени (один-два), они позволили легко проводить численное моделирование, на котором отработывались новые методы нелинейной теории волн и демонстрировалась роль новых нелинейных эффектов. Особняком здесь стоит уравнение Бенджамина-Оно [2-3], которое является интегро-дифференциальным, но, тем не менее, полностью интегрируемым. В той или иной мере, известные эволюционные уравнения выведены в приближениях слабой нелинейности и слабой дисперсии, так что понятна их ограниченность в практических приложениях.

Именно поэтому стали появляться уравнения, в которых попытались избавиться от ограничения слабой нелинейности и/или дисперсии. В частности, были предложены уравнения Уизема [4] для поверхностных волн и Джозефа [5] для волн в двухслойном потоке, которые точно учитывают линейное дисперсионное соотношение. Эти уравнения – интегро-дифференциальные с «плохими» ядрами, так что их исследование представляет собой весьма трудную задачу. Тем не менее, и здесь за последние годы получены интересные результаты,

касающиеся структуры бегущих волн, модуляционной неустойчивости и характера обрушения; мы приводим здесь соответствующие ссылки на уравнение Уизема [6-13].

Обычно эволюционные уравнения определяют развитие волнового процесса во времени. Между тем, на практике, как правило, возмущения генерируются на границе исследуемого участка (волнопродуктор в лабораторной лотке, запись сигнала на буре в море), и развитие волны происходит в пространстве по мере удаления от границы. В случае длинных волн при малой нелинейности и дисперсии переход от эволюции во времени к эволюции в пространстве делается относительно тривиально при сохранении нужного порядка теории возмущений, см., например, [14-15]. Если, однако, малого параметра нет, то такая процедура не работает. В данной статье мы получим пространственно эволюционные уравнения Уизема и Буссинеска для гравитационных волн на поверхности жидкости конечной глубины.

### Уравнение Уизема

Запишем здесь уравнение Уизема в его первоначальном виде [1,4]

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} + \frac{3c_0 \eta}{2h} \frac{\partial \eta}{\partial z} + c_0 \int_{-\infty}^{+\infty} D(z-y) \frac{\partial \eta(y,t)}{\partial y} dy = 0, \quad (1)$$

$$D(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk \sqrt{\frac{\tanh(kh)}{kh}} \exp(ik\xi). \quad (2)$$

Здесь  $\eta(\tau, z)$ - возвышение свободной поверхности,  $h$  – глубина бассейна, предполагаемая постоянной,  $c_0 = \sqrt{gh}$  - скорость длинных волн,  $\tau$  - время и  $z$  - координата. Удобно перейти к безразмерным параметрам

$$u = \eta / h, \quad K = kh, \quad x = z / h, \quad t = c_0 \tau / h, \quad (3)$$

так что уравнение (1) становится безразмерным

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{3u}{2} \frac{\partial u}{\partial x} + \int_{-\infty}^{+\infty} D(x-y) \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} dy = 0, \quad (4)$$

$$D(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dk \sqrt{\frac{\tanh(K)}{K}} \exp(iK\xi) / \quad (5)$$

В формулу (5) входит точное выражение для фазовой скорости волн на поверхности жидкости конечной глубины

$$c(K) = \frac{\Omega}{K} = \sqrt{\frac{\tanh K}{K}}, \quad (6)$$

где  $\Omega$  - безразмерная частота волны. Заметим, что в уравнении (1) нелинейность входит приближенно, через известное соотношение для длинных волн малой, но конечной амплитуды, в то время как линейная дисперсия описывается точно. Поэтому уравнение Уизема рассматривается как феноменологическое, и оно не имеет строго вывода.

Обратим внимание, что в приближении длинных волн ( $K \rightarrow 0$ ) скорость распространения волн становится постоянной, и уравнение (4) сводится к уравнению простой волны [1]. Если же учесть следующий член разложения ( $c \approx 1 - K^2 / 6$ ), то уравнение (4) сводится к известному уравнению Кортевега-де Вриза. При учете следующего члена разложения в дисперсионном соотношении возникнет член с пятой производной и т.д. Однако при этом свойства дисперсионной кривой начинают меняться кардинально. Если в точном дисперсионном соотношении скорость всегда падает с ростом волнового числа, то в уравнении с пятой произ-

водной она будет расти в пределе больших значений волнового числа. Это приводит к нефизическим следствиям, в частности, нарушению принципа причинности. Поэтому использование рядов Тейлора для получения дифференциальных эволюционных уравнений, на наш взгляд, бесперспективно.

Более правильным является использование Паде-аппроксимации дисперсионного соотношения. В частности, в работе [16] используются Паде-аппроксимации не для самой скорости, а для ее квадрата

$$c^2 = \frac{1 + \frac{1}{6} K^2 + \frac{1}{120} K^4}{1 + \frac{1}{2} K^2 + \frac{1}{24} K^4}. \quad (7)$$

Это позволило вывести дифференциальные уравнения Буссинеска для волн на воде, которые более удобны для практических целей, поскольку описывают волны, распространяющиеся в обе стороны и взаимодействующие между собой в бассейне переменной глубины. Точность подобного рода аппроксимации очень велика ( $K < 10-20$ ), поскольку включает диапазон волн на глубокой воде. За недостатком места мы не будем здесь приводить получаемые уравнения Буссинеска, отсылая читателя к статье [16], где эта процедура представлена в наиболее общей форме

### Пространственно эволюционные уравнения Буссинеска

Для многих практических целей необходимо иметь уравнения, описывающие пространственную эволюцию волнового поля, заданного на какой-нибудь границе в любой момент времени. Очевидно, что соответствующие уравнения должны быть похожи на (4) с заменой времени на координату. Но тогда вместо зависимости скорости распространения волн от волнового числа мы должны иметь зависимость скорости от частоты. Из точного дисперсионного соотношения (6) выразить в явном виде такую зависимость не удастся. Однако можно попробовать опять применить Паде-аппроксимации дисперсионного соотношения. Такая задача решалась 60 лет назад с другими целями, мы приводим здесь эту зависимость [17]

$$K^2 = \frac{\Omega^2}{1 + P_n(\Omega^2)} + \Omega^4, \quad (8)$$

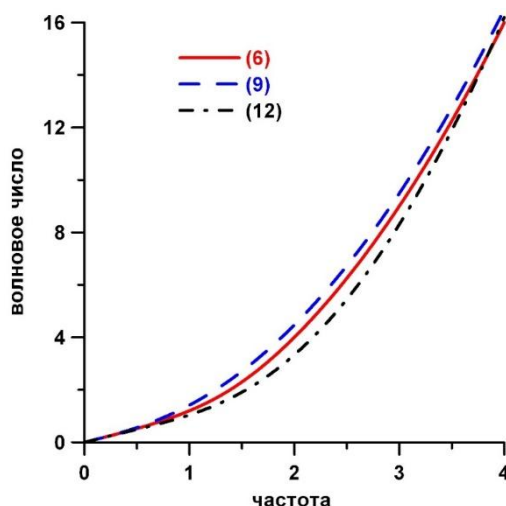
В этой работе вычислены коэффициенты полиномов  $P_n$  в случае, когда ограничиваются пятью или шестью членами, и точность аппроксимации (8) не превышает 0.1%. Для экономии места мы опустим полиномы в (8) и запишем простую форму данного уравнения

$$K^2 \approx \Omega^2 + \Omega^4, \quad (9)$$

которое, в сущности, представляет собой сумму двух дисперсионных соотношений для мелкой и глубокой воды. Оно неплохо описывает точное дисперсионное соотношение, и ошибка не превышает 10%, см. рисунок (штриховая линия). Тогда легко показать, что данное дисперсионное соотношение приводит к следующему линейному пространственно - эволюционному уравнению Буссинеска

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial t^4} = 0. \quad (10)$$





**Аппроксимации зависимости волнового числа от частоты.** Сплошная линия – точная зависимость (6), штриховая – (9) и штрих-пунктирная – (12)

Это линейное уравнение уже выводилось в работе [18] с помощью эвристической процедуры для волн в бассейне переменной глубины и использовалось в линейной теории набегающих волн на берег. Учет нелинейности в рамках теории длинных волн в случае малой нелинейности может быть проведен более строго (здесь его вывод опущен), и окончательное пространственно - эволюционное уравнение Буссинеска выглядит следующим образом

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{3}{2} \frac{\partial^2 u^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial t^4} = 0. \quad (11)$$

Учет полиномов в дисперсионном соотношении (8) ведет к появлению дополнительных членов типа  $\partial^{n+2} u / \partial x^2 \partial t^n$ , которые не меняют дифференциального характера нелинейного эволюционного уравнения.

### Пространственно - эволюционное уравнение Уизема

Для вывода этого уравнения нам понадобится полиномиальная аппроксимация зависимости волнового числа от частоты, которая не вытекает из (8). В качестве первого шага мы подобрали следующую аппроксимацию

$$K \approx \Omega \frac{1 + \frac{1}{4} \Omega^3}{1 + \frac{1}{5} \Omega^2}, \quad (12)$$

которая достаточно хорошо совпадает с точным дисперсионным соотношением в области  $K < 16$ , штрих-пунктирная линия на рисунке. Теперь уже мы можем «обратить» дисперсионное соотношение в эволюционное уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{5} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} + \frac{1}{4} H \left\{ \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} \right\} = 0, \quad (13)$$

где оператор Гильберта

$$H(V) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(s, x)}{t - s} ds. \quad (14)$$

К сожалению, уравнение (13) осталось интегро-дифференциальным, однако ядро преобразования стало существенно проще и выражается через известное преобразование Гильберта. Чтобы избавиться от интегрального члена, необходимо иметь четные степени частоты в числителе и знаменателе (12), что пока нам не удалось сделать.

Учет нелинейности в уравнении Уизема производится в приближении длинных волн, поэтому мы сразу можем записать ответ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{3}{2}u \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{5} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} + \frac{1}{4} H \left\{ \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} \right\} = 0. \quad (15)$$

Полученные пространственно эволюционные уравнения Буссинеска и Уизема решаются в области  $x > 0$ , при этом граничные условия задаются на оси времени ( $-\infty < t < +\infty$ ).

### Заключение

В работе представлен феноменологический вывод пространственно - эволюционных уравнений Буссинеска и Уизема для гравитационных волн на поверхности жидкости конечной глубины. С их помощью может быть описана пространственная эволюция волнового поля, заданного на границе (волнопродуктор в лотке или запись на бугре в море). Основная проблема при выводе таких уравнений лежит в полиномиальной аппроксимации дисперсионного соотношения для волнового числа от частоты, причем в зависимости от аппроксимации могут быть получены разные формы эволюционных уравнений. Свойства таких уравнений предполагается исследовать в дальнейшем. Аналогичный подход может быть применен для вывода пространственно - эволюционного уравнения Джозефа для внутренних волн в двухслойном потоке, а также для более общего случая произвольной стратификации жидкости. Как нам представляется там больше «свободы» с аппроксимацией дисперсионной характеристики. Мы предполагаем выполнить это исследование для ряда типичных стратификаций океана.

*Работа выполнена при поддержке Лаборатории динамических систем и приложений НИУ ВШЭ, гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2019-1931 (в части уравнения Буссинеска) и гранта РФФИ № 19-05-00161 (в части уравнения Уизема).*

### Библиографический список

1. **Уизем, Дж.** Линейные и нелинейные волны/ Дж. Уизем -М.: Мир, 1977.624с.
2. **Benjamin, T.B.** Internal waves of permanent form in fluids of great depth / T.B. Benjamin // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. № 3. P. 559 - 592.
3. **Ono, H.** Algebraic solitary waves in stratified fluid / H. Ono // J. Phys. Soc. Japan. 1975. V. 39. № 4. P. 1082 - 1091.
4. **Уизем, Дж.** Вариационные методы и их приложение к волнам на воде. Вкниге: Нелинейная теория распространения волн/ Дж. Уизем -М.: Мир, 1970.С. 12-39.
5. **Joseph, R.J.** Solitary waves in a finite depth fluid / R.J. Joseph //J. Phys. A: Math. and Gen.1977.V. 10. № 12. P. L225-L227.
6. **Наумкин, П.И.** О нелинейных нелокальных уравнениях в теории волн. 1. Уравнение Уизема / П.И.Наумкин, И.А Шишмарев // ВестникМГУ. Серия 3 Физика и астрономия. 1990. Т. 31. № 5. С. 3-16.

7. **Ehrnström, M., Kalisch, H.** Traveling waves for the Whitham equation / M. Ehrnström, H. Kalisch//Differential Integral Equations. 2009. V.22. P. 1193–1210.
8. **Sanford, N., Kodama, K., Carter, J., Kalisch, H.** Stability of traveling wave solutions to the Whitham equation /N.Sanford, K.Kodama, J.Carter, H.Kalisch// Phys. Lett. A. 2014. V.378. P. 2100–2107.
9. **Johnson, M., Hur, V.** Modulational instability in the Whitham equation for water waves / M. Johnson, V. Hur// Stud. Appl. Math. 2015. V.134. P. 120–143.
10. **Moldabayev, D., Kalisch, H., Dutykh, D.** The Whitham equation as a model for surface water waves / D.Moldabayev, H.Kalisch, D.Dutykh// Physica D.2015. V.309. P. 99–107.
11. **Hur, V.** Wave breaking in the Whitham equation / Hur V. // Adv. Math. 2017. V. 317 P. 410.
12. **Carter, J.D.** Bidirectional Whitham equations as models of waves on shallow water / J.D. Carter // Wave Motion. 2018. V. 82. P. 51–61.
13. **Saut, J.C.** Benjamin-Ono and Intermediate Long Wave Equations: Modeling, IST and PDE / J.C. Saut // In: Miller P., Perry P., Saut J.C., Sulem C. (eds) Nonlinear Dispersive Partial Differential Equations and Inverse Scattering. Fields Institute Communications. Springer, New York 2019. V. 83. P. 95-160.
14. **Holloway, R., Pelinovsky, E., Talipova, T., Barnes, B.** A nonlinear model of the internal tide transformation on the Australian North West Shelf / R.Holloway, E.Pelinovsky, T.Talipova, B.A. Barnes // J. Phys. Oceanography. 1997. V. 27. № 6. P. 871 - 896.
15. **Chabchoub, A., Grimshaw, R.H.J.** The hydrodynamic nonlinear Schrödinger equation: space and time / A. Chabchoub, R.H.J.Grimshaw//Fluids.2016 V. 1. P. 23.
16. **Madsen, P.A., Bingham, H.B., Schaffer, H.A.** Boussinesq-type formulations for fully nonlinear and extremely dispersive water waves: derivation and analysis / P.A.Madsen, H.B.Bingham, H.A.Schaffer //Proc. R. Soc. Lond. A. 2003. V. 459. P. 1075-1104.
17. **Hunt, J.N.** Direct solution of wave dispersion equation / J.N. Hunt // J Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 1959. V. 105. P. 457-459.
18. **Белберова, Д.З.** Полиномиальные приближения модели Беркгофа для волн в бассейне переменной глубины / Д.З. Белберова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 2. С. 3 - 9.

**Pelinovsky E.N.<sup>1,2,3</sup>, Talipova T.G.<sup>1,3</sup>, Didenkulova E.G.<sup>1,2,3</sup>**

### **ATIALLY EVOLUTIONAL EQUATIONS OF UIZEM AND BUSSINSK IN THE THEORY OF WAVES ON WATER**

<sup>1</sup>Sector for modeling extreme wave phenomena in the ocean, Institute of Applied Physics RAS

<sup>2</sup>Laboratory for modeling natural and technological disasters, Nizhny Novgorod State Technical University. n. a. R.E. Alekseeva

<sup>3</sup>Laboratory of Dynamic Systems and Applications, National Research University - Higher School of Economics

The well-known Boussinesq and Whitham equations describe the evolution of waves in time and are poorly “adapted” to solve boundary problems. Similar equations are derived here in which the coordinate is the evolutionary variable. The main difficulty of all the transformations associated with the insolubility of the dispersion relation for water waves relative to the wave number is noted, and a number of approximation dependencies are proposed.

**Keywords:** water waves, Boussinesq equations, Whitham equation, boundary value problem.

Е.Н. Пелиновский<sup>1,2,3</sup>, Т.Г. Галипова<sup>1,3</sup>, Е.Г. Диденкулова<sup>1,2,3</sup>, Е. Тобиш<sup>4</sup>

## ЭВОЛЮЦИЯ НАЧАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В РАМКАХ ЛИНЕАРИЗОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ТИПА КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА С ИНТЕГРАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",  
г. Нижний Новгород

<sup>3</sup>Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

<sup>4</sup>Университет Кеплера, Линц, Австрия

Решена задача Коши для линейного уравнения Кортевега-де Вриза с интегральной дисперсией, спектр которой представлен степенной зависимостью от волнового числа. Показано, что в зависимости от показателя степени из начального короткого возмущения формируются волновой пакет с максимальной головной волной или максимальной волной в середине цуга. Обсуждается роль полученных решений в дисперсионном механизме образования волн-убийц.

**Ключевые слова:** уравнение типа Кортевега-де Вриза, метод стационарной фазы, механика жидкости, астрофизика, волны-убийцы.

### Введение

Хорошо известна роль интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений в нелинейной физике, позволившая доказать существование уединенных волн специального вида – солитонов, которые сохраняются при взаимодействии друг с другом. Их неизменность при распространении в нелинейных диспергирующих средах дала возможность использовать солитоны в системах передачи информации на далекие расстояния, в частности, в оптических волоконных системах. Большинство из известных нелинейных эволюционных уравнений (уравнение Кортевега-де Вриза, нелинейное уравнение Шредингера, уравнение синус-Гордона и т.п.) являются уравнениями в частных производных с аналитическими нелинейными функциями (как правило, степенными), что значительно упрощает математический анализ [1]. Особняком здесь стоит уравнение Бенджамина-Оно, которое содержит интегральное слагаемое, ответственное за дисперсию [2-3]. Оно является также полностью интегрируемым, причем солитоны в нем имеют лоренцову форму и их называют алгебраическими солитонами. Интегральность дисперсии позволяет лучше учесть дисперсию, в частности для поверхностных и внутренних волн в жидкости выведены уравнения Уизема [4] и Джозефа [5], которое уже не является интегрируемым. Сложность неинтегрируемых версий нелинейных эволюционных уравнений с интегральной дисперсией приводит к тому, что для их анализа привлекаются главным образом численные методы.

Здесь мы рассмотрим линеаризованную версию эволюционных уравнений с интегральной дисперсией, чтобы оценить влияние такой дисперсии на эволюцию начального импульсного возмущения.

## Линеаризованное уравнение типа Кортевега-де Вриза с интегральной дисперсией

Целью наших исследований будет линеаризованное уравнение типа Кортевега-де Вриза

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \beta_m \frac{\partial}{\partial x} D_m \{u\} = 0, \quad (1)$$

где оператор  $D\{u\}$  в Фурье-представлении имеет следующий вид

$$D_m \{u\} = -|k|^m U(k). \quad (2)$$

Здесь  $U(k)$  – пространственный Фурье спектр

$$U(k, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) \exp(ikx) dx, \quad (3)$$

при этом  $m$  может быть как положительным, так и отрицательным, в том числе и дробным,  $\beta_m$  – произвольная константа, для определенности положительная. Уравнение (1) решается на безграничном интервале:  $-\infty < x < +\infty$  с исчезающе малыми значениями на бесконечности.

Уравнения такого типа встречаются во многих приложениях. В частности, если  $m = 2$ , то уравнение (1) сводится к известному линеаризованному уравнению Кортевега-де Вриза (КдВ), а при  $m = 1$  – к линеаризованному уравнению Бенджамина-Оно (БО). Уравнение (1) при  $m = 4$  есть линеаризованное уравнение Кавахары [6-7]. В принципе, известны варианты уравнения (1) с «отрицательными» дисперсиями ( $m = -2$ ) типа редуцированного уравнения Островского [8], которые также включаются в анализ. Нелинейные слагаемые в уравнениях КдВ типа тоже бывают весьма разные [9], которые здесь не будут рассматриваться.

Мы будем решать задачу Коши для уравнения (1) с начальным условием в виде однополярного гауссового импульса

$$u_0(x) = A_0 \exp\left(-\frac{x^2}{l^2}\right), \quad (4)$$

где  $A_0$  и  $l$  – амплитуда и полуширина начального импульса. Сразу отметим, что константы в уравнении (1) и начальном условии (2) могут быть опущены простой заменой функции и аргументов, но мы будем сохранять их, имея в виду физические приложения данного уравнения.

### Асимптотическое решение задачи Коши

В силу линейности уравнения (1) его общее решение может быть представлено интегралом Фурье

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(k) \exp\{i[\omega(k)t - kx]\} dk, \quad (5)$$

где  $U_0(k)$  – спектр начального возмущения,  $\operatorname{Re}$  означает реальную часть и частота волны есть

$$\omega = -\beta_m |k|^m k. \quad (6)$$

В общем случае дисперсионная зависимость (6) не является аналитической кривой, однако это не приводит к появлению комплексных значений частоты волны и неустойчивости бегущих волн.

На больших временах в силу дисперсии (если  $m \neq 0$ ) любое возмущение превратится в волновой пакет, структура которого в фиксированной точке  $x$  может быть исследована с помощью метода стационарной фазы [10]

$$u(x,t) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi t |d^2\omega/dk^2|}} U_0(k_*) \cos[\omega(k_*)t - k_*x - \pi/4], \quad (7)$$

где  $k_*(x,t)$  находится из уравнения

$$c_{gr}(k_*) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{x}{t}. \quad (8)$$

Учитывая, что в рамках моделей КдВ-типа частота волны и ее групповая скорость  $c_{gr}$  отрицательна, асимптотическое представление решения задается в области  $x < 0$  (вдали от головной волны). Нахождение решения в области начального возмущения и впереди ее требует более тонкого анализа интеграла (5), который для некоторых значений параметра  $m$  дан в [11-12].

Входящий в (7) начальный спектр легко вычисляется

$$U_0(k) = \sqrt{\pi} A_0 l_0 \exp(-k^2 l^2 / 4), \quad (9)$$

так что окончательно асимптотическое решение (7) можно записать в виде

$$u(x,t) = A[x,t;k_*(x,t)] \cos[\omega(k_*)t - k_*x - \pi/4], \quad (10)$$

где огибающая волнового пакета есть

$$A[x,t;k_*(x,t)] = A_0 l \sqrt{\frac{2}{t \beta_m m(m+1) k_*^{m-1}}} \exp\left(-\frac{k_*^2 l^2}{4}\right), \quad (11)$$

и

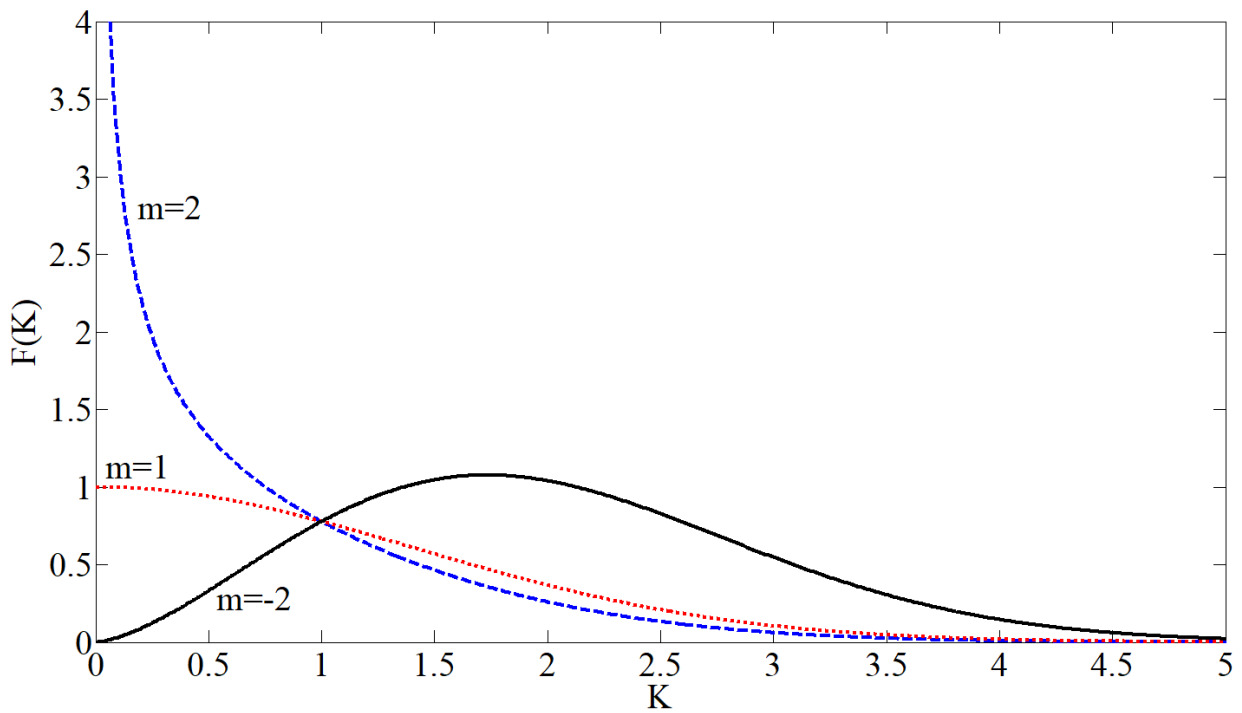
$$k_*(x,t) = \left[ \frac{-x}{\beta_m(m+1)t} \right]^{1/m}. \quad (12)$$

Рассматривая волновой процесс в фиксированный момент времени, мы видим из (12), что вблизи зоны начального возмущения ( $|x| < l$ ) располагаются длинные волны (малые значения волнового числа), а вдали от нее (позади головной волны) все более короткие волны (с увеличивающимся значением волнового числа).

Характер распределения амплитуды волнового пакета зависит от вида дисперсии и определяется функцией (рис. 1)

$$F_m(K) = K^{\frac{1-m}{2}} \exp\left(-\frac{K^2}{4}\right), \quad (13)$$

входящей в выражение (11) для амплитуды. Здесь  $K = kl$ . Если  $m > 1$  (как в уравнениях Кортевега-де Вриза и Кавахары), то амплитуда первых длинных волн велика (пунктирная кривая на рис. 1), и монотонно спадает к хвосту волнового пакета, где присутствуют короткие волны. Такая динамика хорошо известна в рамках линейного КдВ уравнения [13]. На самом деле, в окрестности малых  $k$  метод стационарной фазы не работает, и область головной волны должна быть рассмотрена особо. В частности, для  $m = 2$  точный анализ приводит к функции Эйри, в котором максимальной является головная волна. В случае  $m = 1$  (как в уравнении Бенджамина-Оно) длинные волны имеют одинаковую амплитуду, которая даже в рамках метода стационарной фазы остается конечной (пунктирная кривая на рисунке).



**Распределение спектральной амплитуды по волновым числам**

Совсем другая динамика возникает при  $m < 1$  (сплошная кривая на рис. 1 для редуцированного уравнения Островского). В этом случае длинные и короткие волны имеют малую амплитуду, а основная энергия приходится на волну с волновым числом  $k_{max}$  и амплитудой  $A_{max}$ , причем она движется с постоянной скоростью  $c_{max}$ :

$$A_{max} = A_0 \sqrt{\frac{(1-m)^{\frac{1-m}{2}} l^{1+m}}{t \beta_m m(m+1)}} \exp\left(-\frac{1-m}{4}\right), k_{max} = \frac{\sqrt{1-m}}{l}, c_{max} = -\frac{\beta_m (m+1)(1-m)^{m/2}}{l^m}. \quad (14)$$

В результате мы имеем волновой пакет, амплитуда которого затухает со временем, как  $t^{1/2}$ , и он расплывается в пространстве (длинные волны уходят вперед, а короткие назад), так что его энергия сохраняется.

Подчеркнем еще раз, что асимптотическое решение получено для дисперсионных сред ( $m \neq 0$ ). Если же в среде нет дисперсии ( $m=0$ ), то точное решение уравнения (1) представляет собой бегущую волну

$$u(x,t) = A_0 \exp\left(-\frac{[x - \beta_0 t]^2}{l^2}\right), \quad (15)$$

которая не расплывается в пространстве.

Если начальное возмущение представляет собой разнополярный импульс типа  $N$ -волны, спектр которого пропорционален  $k$  (при малых  $k$ ), то аналогично можно показать, что головная волна будет максимальной при  $m \geq 3$ , а в случае  $m < 3$  — максимальной является волна в пуге с фиксированной длиной и постоянной скоростью, как в случае (14). В частности, в линеаризованном КдВ-уравнении, если начальное возмущение имеет нулевую массу, головная волна не максимальна, и это было показано в [14-15] применительно к волнам цунами.

## Заключение

Мы рассмотрели эволюцию начального импульсного возмущения в рамках линеаризованного уравнения типа Кортевега-де Вриза, когда дисперсия может быть представлена как дифференциальным, так и интегральным слагаемым. В случае однополярного начального возмущения решение уравнения (1) представляет собой затухающий цуг с максимальной головной волной при  $m \geq 1$ , и осциллирующий волновой пакет при  $m < 1$ . Если начальное возмущение есть  $N$ -волна, то критическое значение параметра дисперсии смещается к  $m = 3$ . Отмеченные особенности волновых полей будут важны при анализе нелинейных эффектов, что будет сделано в дальнейшем.

Отметим также, что в рамках уравнения (1) существует симметрия решений относительно знаков времени и координат. Это означает, что если в начальный момент времени задать инвертированный в пространстве волновой пакет (10), то он за конечное время превратится в импульс большой амплитуды, что лежит в основе дисперсионного механизма генерации «волн-убийц» [16-17].

*Работа выполнена при частичной поддержке Лаборатории динамических систем и приложений НИУ ВШЭ, гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2019-1931 (раздел 3), а также грантов РФФИ 19-05-00161 и 19-02-00111 в части приложения полученных результатов в океанологии и астрофизике.*

## Библиографический список

1. **Инфельд, Э.** Нелинейные волны, солитоны и хаос / Э.Инфельд, Д.Роуландс- М.: Физматлит. 2006. 480с.
2. **Benjamin, T.B.** Internal waves of permanent form in fluids of great depth / T.B. Benjamin // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. № 3. P. 559 - 592.
3. **Ono, H.** Algebraic solitary waves in stratified fluid / H. Ono // J. Phys. Soc. Japan. 1975. V. 39. № 4. P. 1082 - 1091.
4. **Уизем, Дж.** Линейные и нелинейные волны/ Дж. Уизем. - М.: Мир, 1977.624с.
5. **Joseph, R.J.** Solitary waves in a finite depth fluid / R.J. Joseph //J. Phys. A: Math. and Gen. 1977.V. 10. № 12. P. L225-L227.
6. **Kawahara, T.** Oscillatory solitary waves in dispersive media / T.J. Kawahara// Phys. Soc. Japan. 1972. V. 33. P. 260-264.
7. **Boyd, J.P.** Weakly non-local solitons for capillary-gravity waves: Fifth degree Korteweg-de Vries equation / J.P. Boyd// Physica D. 1991. V. 48. P. 129-146.
8. **Geyer, A., Pelinovsky, D.E.** Spectral stability of periodic waves in the generalized reduced Ostrovsky equation / A. Geyer, D.E.Pelinovsky// Lett. Math. Phys. 2017. V. 107. P. 1293–1314.
9. **Пелиновский Е.Н., Диденкулова Е.Г., Талипова Т.Г. Тобиш Е., Орлов Ю.Ф., Зенькович А.В.** Семейство уравнений типа Кортевега-деВриза в приложениях / Е.Н. Пелиновский, Е.Г. Диденкулова, Т.Г. Талипова, Е. Тобиш, Ю.Ф. Орлов, А.В. Зенькович // Труды ННГТУ им. П. Алексеева. 2018. № 4. С. 41-47.
10. **Федорюк, М.В.** Метод перевала / М.В. Федорюк - М.:Наука, 1977. — С. 366.
11. **Sidi, A., Sulem, C., Sulem, P.** On the long time behaviour of a generalized KdV equation / A. Sidi, C. Sulem, P. Sulem // Acta Applicandae Mathematicae. 1986. V. 7. P. 35-47.



12. **Saut, J.C.** Benjamin-Ono and Intermediate Long Wave Equations: Modeling, IST and PDE / J.C. Saut // In: Miller P., Perry P., Saut J.C., Sulem C. (eds) Nonlinear Dispersive Partial Differential Equations and Inverse Scattering. Fields Institute Communications. Springer, New York 2019. V. 83. P. 95-160.
13. **Карпман, В.И.** Нелинейные волны в диспергирующих средах / В.И. Карпман—М.: Наука, 1973. 175 с.
14. **Кажура, К.** The leading wave of a tsunami / К.Кажура // Bull. Earthquake Research Institute. 1963. V. 41. P. 535-571.
15. **Пелиновский, Е.Н.** Нелинейная динамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский – Горький: ИПФ. 1982. 226 с.
16. **Куркин, А.А.** Волны убийцы: факты, теория и моделирование: 2-е изд. / А.А.Куркин, Е.Н. Пелиновский. - Direct-Media, Москва-Берлин, 2016. 178 с.
17. **Kharif, Ch., Pelinovsky, E., Slunyaev, A.** Rogue Waves in the Ocean / Ch.Kharif, E.Pelinovsky, A.Slunyaev - Springer, 2009. 216 p.

**Pelinovsky E.N.<sup>1,2,3</sup>, Talipova T.G.<sup>1,3</sup>, Didenkulova E.G.<sup>1,2,3</sup>, Tobish E.<sup>4</sup>**

**EVOLUTION OF INITIAL PERTURBATION IN THE FRAMEWORK  
OF THE LINEARIZED EQUATION OF TYPE KORTEVEG-DE VRIESE  
WITH INTEGRAL DISPERSION**

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod Technical University n.a. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod

<sup>4</sup>Kepler University, Linz, Austria

The Cauchy problem is solved for the linear Korteweg-de Vries equation with integral dispersion, the spectrum of which is represented by a power-law dependence on the wave number. It is shown that, depending on the exponent, a wave packet with a maximum head wave or a maximum wave in the middle of the train is formed from the initial short disturbance. The role of the obtained solutions in the dispersion mechanism of the formation of killer waves is discussed.

**Keywords:** Korteweg-de Vries type equation, stationary phase method, fluid mechanics, astrophysics, killer waves.

## О МНОГОМЕРНЫХ АНАЛОГАХ ТРЕУГОЛЬНИКА СЕРПИНСКОГО

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Исследуются аттракторы систем итерированных функций в  $n$ -мерном евклидовом пространстве, состоящих из  $n + 1$  гомотетии с аффинно независимыми центрами и произвольными коэффициентами подобия  $\lambda_i \in (0,1)$ . Найдены условия, при которых аттрактор является: 1) симплексом  $\Delta$  с вершинами в центрах гомотетий; 2) канторовым множеством в симплексе  $\Delta$ . Указана размерность Минковского и Хаусдорфа для аттракторов рассматриваемых систем.

**Ключевые слова:** треугольник Серпинского, система итерированных функций, аттрактор, фрактал, множество Кантора

## Введение

Треугольник (ковёр, салфетка) Серпинского – один из классических примеров фракталов на плоскости. Несмотря на простоту его построения, он представляет огромный интерес (см., например, [1]).

Треугольник Серпинского может быть получен как аттрактор системы итерированных функций. Напомним, что системой итерированных функций (СИФ) на полном метрическом пространстве  $X$  называется конечное семейство сжимающих отображений, заданных на  $X$ . Согласно известной теореме Хатчинсона ([2, с.713]) любая СИФ имеет единственный аттрактор, представляющий собой непустое компактное множество, инвариантное относительно отображений системы.

Аттрактором СИФ, состоящей из трех гомотетий с коэффициентами гомотетии, равными  $1/2$ , и центрами, не лежащими на одной прямой, является классический треугольник Серпинского.

В данной работе мы исследуем некоторые аналоги треугольника Серпинского в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $R^n$ . Для этого рассмотрена система итерированных функций в  $R^n$ , состоящая из  $n + 1$  гомотетий  $f_i(X) = \lambda_i(X - A_i) + A_i$  с коэффициентами подобия  $\lambda_i \in (0,1)$  и центрами  $A_i$ , являющимися аффинно независимыми.

В [3] рассматривались такие многомерные аналоги треугольника Серпинского в предположении равенства всех коэффициентов подобия:  $\lambda_1 = \lambda_1 = \dots = \lambda_{n+1} = \lambda$ . В [3] доказано, в частности, что при  $\lambda \geq \frac{n}{n+1}$  аттрактором  $A_S$  такой системы является симплекс  $\Delta$  с вершинами в центрах гомотетий, а при  $\lambda \leq 1/2$  аттрактор  $A$  является самоподобным и имеет хаусдорфову размерность  $\dim_H A = -\ln(n + 1)/\ln \lambda$ .

Подчеркнем, что в нашей работе равенство коэффициентов подобия не предполагается.

Нами показано, что при  $\lambda_1 + \lambda_1 + \dots + \lambda_{n+1} \geq n$  аттрактор  $A_S$  совпадает с симплексом  $\Delta$  с вершинами в центрах гомотетий, а при  $\lambda_i + \lambda_j \leq 1 \forall i \neq j, i, j = \overline{1..n+1}$  аттрактором  $A_S$  яв-

ляется канторово множество в симплексе  $\Delta$ , причем размерности Хаусдорфа и Минковского аттрактора  $A_s$  совпадают и равны  $d$ , где  $\lambda_1^d + \lambda_2^d + \dots + \lambda_{n+1}^d = 1$ .

### Основные определения. Теорема Хатчинсона

**Определение 1.** Семейство  $S = \{f_i | i = 0, 1, \dots, n\}$  сжимающих отображений  $f_i: X \rightarrow X$ , заданных на полном метрическом пространстве  $(X, d)$ , называется *системой итерированных функций* (СИФ).

Пусть  $C(X)$  – множество непустых компактных подмножеств полного метрического пространства  $(X, d)$ . Как известно, множество  $C(X)$ , снабженное метрикой Хаусдорфа  $d_H$ , является полным метрическим пространством.

Дж. Э. Хатчинсон [2с.713] доказал следующую теорему.

**Теорема.** Пусть  $S = \{f_i | i = 0, 1, \dots, N\}$  – СИФ, заданная на полном метрическом пространстве  $(X, d)$ . Тогда отображение

$$F: C(X) \rightarrow C(X), \quad F(B) = \bigcup_{i=0}^N f_i(B) \quad \forall B \in C(X),$$

является сжатием на  $C(X)$  с коэффициентом сжатия  $s = \max\{s_0, s_1, \dots, s_N\}$  и имеет единственную неподвижную точку  $A_s \in C(X)$ , причем для любого  $A_0 \in C(X)$  последовательность  $\{A_n = F^n(A_0)\}$  сходится к  $A_s$  в метрике Хаусдорфа.

**Определение 2.** Множество  $A_s$  называется *аттрактором СИФ  $S$* , а отображение  $F$  – *отображением Хатчинсона*.

**Определение 3.** Множеством Кантора называется компактное, совершенное, вполне несвязное подмножество топологического пространства.

### Основные утверждения и их доказательство

Рассмотрим систему итерированных функций  $S = \{f_i | i = 1..n + 1\}$  в евклидовом пространстве  $R^n$ , состоящую из  $n + 1$  гомотетий  $f_i(X) = \lambda_i(X - A_i) + A_i$ ,  $X \in R^n$ ,  $\lambda_i \in (0, 1)$ , где центры гомотетий  $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$  аффинно независимы. Напомним, что точки  $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$  в  $R^n$  называются аффинно независимыми, если они не лежат в подпространстве размерности  $n - 1$ .

Точки  $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$  в аффинном пространстве  $R^n$  образуют точечный базис. Если  $P$  – произвольная фиксированная точка в  $R^n$ , то любая точка  $M \in R^n$  может быть единственным образом представлена  $M = P + x_1 \overrightarrow{PA_1} + x_2 \overrightarrow{PA_2} + \dots + x_{n+1} \overrightarrow{PA_{n+1}}$ , где  $x_1 + x_2 + \dots + x_{n+1} = 1$ . Такая комбинация называется барицентрической, а набор чисел  $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$  барицентрическими координатами точки  $M$ . Барицентрические координаты не зависят от выбора точки  $P$ . Отметим что точка  $A_i \in R^n$  имеет барицентрические координаты  $(0, \dots, 1, \dots, 0)$ , где единица стоит на  $i$ -м месте.

Нетрудно доказать следующее утверждение.

**Лемма.** Гомотетия  $f_i: R^n \rightarrow R^n$  в барицентрических координатах может быть задана матрицей:

$$\begin{pmatrix}
 \lambda_i & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \dots & & & \dots & & & \dots \\
 0 & \dots & \lambda_i & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 1 - \lambda_i & \dots & 1 - \lambda_i & 1 & 1 - \lambda_i & \dots & 1 - \lambda_i \\
 0 & \dots & 0 & 0 & \lambda_i & \dots & 0 \\
 \dots & & & \dots & & & \dots \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_i
 \end{pmatrix} \leftarrow i\text{-ая строка}$$

$\uparrow$   
 $i$  - й столбец

Симплексом в  $R^n$  с вершинами  $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$  называется выпуклая оболочка множества  $\{A_1, A_2, \dots, A_{n+1}\}$ . Далее такой симплекс будем обозначать через  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ .

Пусть  $A_s$  аттрактор системы  $S$ . Компонента связности множества  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1}) \setminus A_s$  называется дырой.

**Теорема 1.** Пусть  $S = \{f_i | i = \overline{1..n+1}\}$  – система итерированных функций в  $R^n$ , где  $f_i$  – гомотетия с центром  $A_i$  и коэффициентом  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1..n+1}$ , причем  $A_1 A_2 \dots A_{n+1}$  аффинно независимые. Если  $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{n+1} \geq n$ , то аттрактором  $A_s$  системы итерированных функций  $S$  является симплекс  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ .

**Доказательство.** Применяя лемму, можно показать, что образами симплекса  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$  при отображениях  $f_i$  являются множества:

$$f_i(\Delta) = \{(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) | x_i \geq 1 - \lambda_i\}, \quad i = \overline{1..n+1}.$$

Для того, чтобы точка  $M = (x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$  лежала в дыре  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1}) \setminus \bigcup_{i=1}^{n+1} f_i(\Delta)$ , необходимо выполнение условий:

$$\{x_i < 1 - \lambda_i, \quad i = \overline{1..n+1}.$$

Сложив все неравенства системы, получим:

$$\sum_{i=1}^{n+1} x_i < n + 1 - \sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i.$$

Так как  $\sum_{i=1}^{n+1} x_i = 1$ , то

$$\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i < n.$$

Итак, для того, чтобы точка  $M$  принадлежала дыре, необходимо чтобы  $\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i < n$ , что противоречит условию теоремы. Следовательно,  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1}) = \bigcup_{i=1}^{n+1} f_i(\Delta)$  и аттрактором  $A_s$  системы итерированных функций  $S$  является симплекс  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ . ■

**Следствие.** Если в предположении теоремы  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{n+1} = \lambda$ , то при  $\lambda \geq n/n + 1$  аттрактором  $A_s$  системы итерированных функций  $S = \{f_i | i = \overline{1..n+1}\}$  является симплекс  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ .

**Теорема 2.** Пусть  $S = \{f_i | i = \overline{1..n+1}\}$  – система итерированных функций в  $R^n$ , где  $f_i$  – гомотетия с центром  $A_i$  и коэффициентом  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1..n+1}$ , причем  $A_1, \dots, A_{n+1}$  аффинно независимые. Если  $\lambda_i + \lambda_j \leq 1 \forall i \neq j, i, j = \overline{1..n+1}$ , то аттрактором  $A_s$  системы итерированных функций  $S$  является канторово множество в симплексе  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ , причем размерность Минковского и Хаусдорфа совпадают и равны  $d$ , где  $\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i^d = 1$ .

**Доказательство.** Пусть  $M(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) \in f_i(\Delta) \cap f_j(\Delta) \neq \emptyset$ , т.е.

$$\begin{cases} x_i \geq 1 - \lambda_i \\ x_j \geq 1 - \lambda_j \end{cases}$$

Сложив эти неравенства, получим:

$$x_i + x_j \geq 2 - (\lambda_i + \lambda_j).$$

1) если  $\lambda_i + \lambda_j < 1$ , то  $x_i + x_j > 1$ , что противоречит определению барицентрических координат для  $M \in \Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ . Следовательно, при  $\lambda_i + \lambda_j < 1$  имеем  $f_i(\Delta) \cap f_j(\Delta) = \emptyset$ .

2) если  $\lambda_i + \lambda_j = 1$ , то  $x_i + x_j \geq 1$ , следовательно,  $x_i + x_j = 1, x_k = 0, k = 1..n + 1, k \neq i, k \neq j$ . Тогда получаем, что пересечение  $f_i(\Delta) \cap f_j(\Delta)$  состоит из одной точки  $M$ .

Итак, образы  $f_i(\Delta)$  и  $f_j(\Delta), \forall i \neq j$  или не пересекаются, или пересекаются по одной точке. Таким образом, выполнено условие открытого множества (opensetcondition). Следовательно, размерности Минковского и Хаусдорфа совпадают и равны  $d$ , где  $\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i^d = 1$ . Более того, поскольку  $A_s = \bigcap_{n=1}^{\infty} \Delta_n$ , где  $\Delta_n = \bigcup_{i=1}^{n+1} f_i(\Delta_{n-1})$ ,  $\Delta_0 = \Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ , то  $A_s$  является вполне несвязным. Следовательно,  $A_s$  – компактное, совершенное вполне несвязное подмножество в  $\Delta(A_1 A_2 \dots A_{n+1})$ , то есть является канторовым. ■

**Следствие 1.** Если в предположении теоремы  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{n+1} = \lambda$ , то при  $\lambda \leq 1/2$  аттрактором системы итерированных функций  $S = \{f_i | i = \overline{1..n+1}\}$  является канторово множество, причем размерность Минковского и Хаусдорфа совпадают и равны  $-\ln(n+1)/\ln \lambda$

Поскольку система уравнений

$$\{\lambda_i + \lambda_j = 1, \forall i \neq j, i, j = 1..n + 1,$$

имеет единственное решение  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{n+1} = 1/2$ , то справедливо следующее утверждение.

**Следствие 2.** Если  $\lambda_i + \lambda_j = 1, \forall i \neq j, i, j = 1..n + 1$ , то  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{n+1} = 1/2$  и аттрактор  $A_s$  является многомерным аналогом классического треугольника Серпинского в  $R^n$ .

Далее приведены примеры СИФ, иллюстрирующие теоремы 1 и 2.

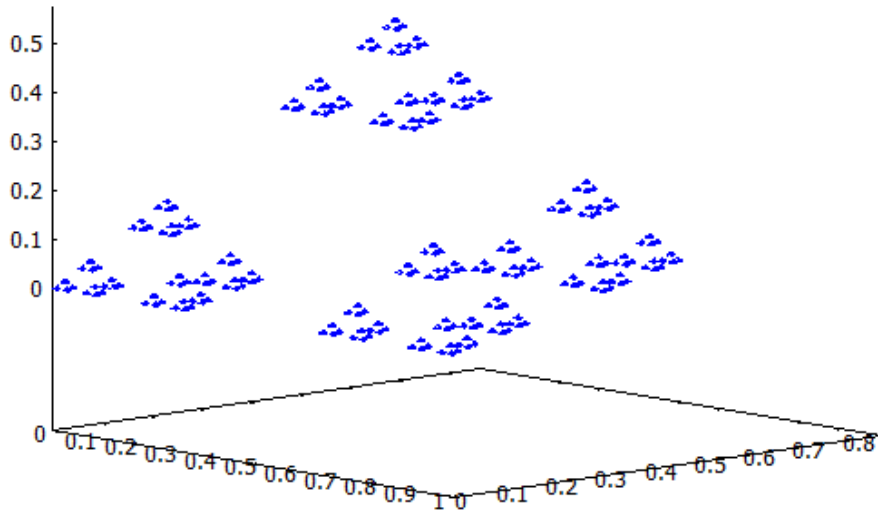
**Пример 1.** Рассмотрим систему  $S = \{f_i | i = \overline{1..4}\}$ , где  $f_1(x, y, z) = \left(\frac{2}{3}x, \frac{2}{3}y, \frac{2}{3}z\right)$ ,  $f_2(x, y, z) = \left(\frac{2}{3}(x-1) + 1, \frac{2}{3}y, \frac{2}{3}z\right)$ ,  $f_3(x, y, z) = \left(\frac{5}{6}(x-0.5) + 0.5, \frac{5}{6}\left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{5}{6}z\right)$ ,  $f_4(x, y, z) = \left(\frac{5}{6}(x-0.5) + 0.5, \frac{5}{6}\left(y - \frac{\sqrt{3}}{6}\right) + \frac{\sqrt{3}}{6}, \frac{5}{6}\left(z - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}}\right) + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}}\right)$ .

Центры гомотетий  $A_1, A_2, A_3, A_4$  являются аффинно независимыми.

Коэффициенты гомотетий удовлетворяют теореме 1, следовательно, аттрактор  $A_s$  – симплекс с вершинами  $A_1, A_2, A_3, A_4$ .

**Пример 2.** Рассмотрим систему  $S = \{f_i | i = \overline{1..4}\}$ , где  $f_1(x, y, z) = \left(\frac{1}{3}x, \frac{1}{3}y, \frac{1}{3}z\right)$ ,  $f_2(x, y, z) = \left(\frac{1}{3}(x-1) + 1, \frac{1}{3}y, \frac{1}{3}z\right)$ ,  $f_3(x, y, z) = \left(\frac{1}{3}(x-0.5) + 0.5, \frac{1}{3}\left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{3}z\right)$ ,  $f_4(x, y, z) = \left(\frac{1}{3}(x-0.5) + 0.5, \frac{1}{3}\left(y - \frac{\sqrt{3}}{6}\right) + \frac{\sqrt{3}}{6}, \frac{1}{3}\left(z - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}}\right) + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}}\right)$ .

Центры гомотетий  $A_1, A_2, A_3, A_4$  являются аффинно независимыми, а коэффициенты гомотетий удовлетворяют теореме 2, следовательно, аттрактор  $A_s$  – канторово множество (см. рисунок).



### Аналог треугольника Серпинского в трехмерном евклидовом пространстве

#### Заключение

Для систем итерированных гомотетий  $S = \{f_i | i = \overline{1..n+1}\}$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $R^n$  с аффинно независимыми центрами  $A_i$  и произвольными коэффициентами подобия  $\lambda_i \in (0,1), i = \overline{1..n+1}$ , найдены условия, при которых аттрактор  $A_S$  системы  $S$  является: симплексом  $\Delta$  с вершинами  $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$ ; канторовым множеством в симплексе  $\Delta$ .

#### Библиографический список

1. **Кириллов, А.А.** Повесть о двух фракталах / А.А. Кириллов. – М.: МЦНМО, 2010. – 180 с.
2. **Hutchinson, J. E.** Fractals and self-similarity / J. E. Hutchinson // Indiana Univ. Math. J. – 1981. – Vol. 30. – P. 713–747.
3. **Broomhead, D.** Golden gaskets: variations on the Sierpiński sieve / D. Broomhead, J. Montaldi, N. Sidorov // Nonlinearity. – 2004. – V. 17. – P. 1455–1480.

**A.V.Bagaev, A.V. Kiseleva**

#### ON MULTIDIMENSIONAL ANALOGS OF THE SIERPINSKI TRIANGLE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

We investigate the attractors of iterated function systems in  $n$ -dimensional Euclidean space consisting of  $n+1$  homotheties with affine independent centers and arbitrary similarity coefficients  $\lambda_i \in (0,1)$ . We found the conditions under which the attractor is: 1) a simplex  $\Delta$  with vertices in the centers of homotheties; 2) a Cantor set in the simplex  $\Delta$ . The Minkowski and Hausdorff dimension is indicated for attractors of the considered systems.

**Key words:** Sierpiński triangle, iterated function system, attractor, fractal, Cantor set.

Д.А. Батанин, С.А. Чекалова

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ДЕТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Приволжский исследовательский медицинский университет

В работе разрабатывается программный комплекс для оценки физического развития детей различных возрастных групп. Представлено программное средство статистики и оценки развития для упрощения деятельности медицинского работника. Данная информационная система способна повысить эффективность деятельности на основе автоматизации трудоемких процессов сбора данных, их обработки и оценки.

**Ключевые слова:** хранение данных, физическое развитие, дети, автоматизация.

### **Введение**

В современном обществе компьютеры широко применяются во всех сферах деятельности человека. В настоящее время в обществе большое значение имеют системы хранения, распространения и обработки информации, которые основаны на работе компьютера. Образуются международные и межрегиональные системы связи, которые позволяют людям осуществлять обмен информацией на больших территориях за кратчайшие сроки, что имеет большое значение в медицинской деятельности

Целью данной работы является разработка программного комплекса для оценки физического развития детей различных возрастных групп, включающее хранение информации о ребёнке и оценке параметров его физического развития

Мощность базы данных обусловлена возможностью ее постоянного пополнения новыми данными, что является очень удобным для пользователя. Создание базы данных, обладающей такими свойствами в настоящее время очень актуально.

### **Постановка задачи**

Целью данной работы является создание информационной системы, обеспечивающей:

- хранение данных о детях различных возрастных групп;
- возможность пополнения новыми данными и удаления уже существующих данных;
- оценку различных физических параметров;
- представление результатов в удобном формате.

### **Описание работы программного комплекса**

Задача исследования состояла в разработке программного комплекса для хранения и обработки данных, полученных при проведении осмотра детей различных возрастных групп.

В самом начале работы было несколько вариантов языков для работы. Такие как C++ и Qt для визуализации, Python, Java и C#. Было принято решение использовать C#, так как для работы с Windows он является оптимальным вариантом. Windows Form, работающий на C# и являющийся частью NET Framework, упростил работу с визуализацией программы. Программа работает с процедурным расширением языка SQL - Transact-SQL. Для тестирования работоспособности программы была написана консольная программа. Оценка параметров является важным и трудоемким этапом работы. При переходе к этому этапу были определены столбцы для таблицы базы данных:

- **ID** – автоматически инкрементирующийся параметр для более удобного доступа ко всем другим параметров.
- **ФИО** – основной отличительный признак для пользователя программы.
- **Пол** – оценочные таблицы разделены по полу ребенка.
- **Дата рождения** – параметр для определения возрастной группы ребенка.
- **Рост, вес** – физические параметры ребенка.
- **Возрастная группа** – важный параметр, как и пол, служит для разделения таблиц.
- **Оценка роста и веса** – градируется от 1-8 в зависимости от физических параметров.
- **Количество зубов** – параметр для определения числа постоянных зубов у ребенка.
- **Оценка роста зубов** – исходя из количества, высчитывается параметр относительно принятых норм.

Также были рассмотрены половые характеристики, в будущем будет добавлено еще несколько параметров. Оценка роста и веса происходит по таблицам (рис. 1)

Возраст	Длина/рост								Масса							
	Центильный интервал								Центильный интервал							
	1 3%	2 10%	3 25%	4 50%	5 75%	6 90%	7 97%	8	1 3%	2 10%	3 25%	4 50%	5 75%	6 90%	7 97%	8
0	45,8	47,5	49,8	50,7	52,0	53,1	53,9	2,6	2,8	3,0	3,3	3,7	3,9	4,1		
1 мес.	48,5	50,3	52,1	53,5	55,0	56,1	57,3	3,3	3,6	3,8	4,2	4,5	4,7	5,1		
2 мес.	51,2	53,3	55,2	56,8	58,0	59,3	60,6	3,8	4,2	4,5	4,8	5,2	5,5	5,9		
3 мес.	54,0	56,2	57,6	59,3	60,7	61,8	63,6	4,4	4,8	5,2	5,5	5,9	6,3	6,7		
4 мес.	56,7	58,4	60,0	61,2	62,8	64,0	65,7	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	7,5		
5 мес.	59,1	60,8	62,0	63,8	65,1	66,0	68,0	5,5	5,9	6,3	6,7	7,2	7,7	8,1		
6 мес.	60,8	62,5	64,1	65,5	67,1	68,8	70,0	5,9	6,3	6,8	7,3	7,8	8,3	8,7		
7 мес.	62,7	64,1	65,9	67,5	69,2	70,4	71,9	6,4	6,8	7,3	7,7	8,4	8,9	9,3		
8 мес.	64,5	66,0	67,5	69,0	70,5	72,5	73,7	6,7	7,2	7,6	8,2	8,8	9,3	9,7		
9 мес.	66,0	67,5	69,1	70,2	72,0	74,1	75,5	7,1	7,5	8,0	8,6	9,2	9,7	10,1		
10 мес.	67,5	69,0	70,3	71,9	73,2	75,3	76,8	7,4	7,9	8,4	9,0	9,6	10,1	10,5		
11 мес.	68,9	70,1	71,5	73,0	74,7	76,5	78,1	7,7	8,3	8,7	9,3	9,9	10,5	10,9		
1 год	70,1	71,4	72,8	74,1	75,8	78,0	79,6	8,0	8,5	9,0	9,6	10,2	10,8	11,3		
15 мес.	72,9	74,5	76,0	77,1	79,1	81,5	83,4	8,6	9,2	9,7	10,8	10,9	11,5	12,1		
18 мес.	75,8	77,1	78,9	79,9	82,1	84,5	86,8	9,2	9,8	10,3	10,8	11,5	12,2	12,8		
21 мес.	78,0	79,5	81,2	82,9	84,5	87,5	89,5	9,7	10,3	10,6	11,5	12,2	12,8	13,4		
2 года	80,1	81,7	83,3	85,2	87,5	90,1	92,5	10,2	10,8	11,3	12,1	12,8	13,5	14,1		
27 мес.	82,0	83,5	85,4	87,4	90,1	92,4	95,0	10,6	11,2	11,7	12,6	13,3	14,2	14,8		
30 мес.	83,8	85,7	87,7	89,8	92,3	95,0	97,3	11,0	11,6	12,3	13,2	13,9	14,8	15,5		
33 мес.	85,8	87,6	89,8	91,7	94,8	97,0	99,7	11,5	12,1	12,7	14,3	14,5	15,4	16,3		
3 года	89,0	90,8	93,0	95,5	98,1	100,7	103,1	11,7	12,5	13,3	13,7	15,5	16,5	17,6		
3,5 года	91,3	93,5	95,6	98,5	101,4	103,5	106,0	12,3	13,4	14,0	15,0	16,4	17,7	18,6		
4 года	94,0	96,1	98,5	101,5	104,1	106,9	109,7	13,0	14,0	14,8	15,9	17,6	18,9	20,0		
4,5 года	96,8	99,3	101,5	104,4	107,4	110,5	113,2	13,9	14,8	15,8	16,9	18,5	20,3	21,5		
5 лет	99,9	102,5	104,7	107,5	110,7	113,6	116,7	14,7	15,7	16,6	18,1	19,7	21,6	23,2		
5,5 лет	102,5	105,2	108,0	110,8	114,3	117,0	120,0	15,5	16,6	17,7	19,3	21,1	23,1	25,1		
6 лет	105,3	108,0	110,9	114,1	118,0	120,6	124,0	16,3	17,4	18,7	20,4	22,5	24,8	27,1		
6,5 лет	108,1	110,5	114,0	117,6	121,3	124,2	127,5	17,1	18,3	19,7	21,5	23,8	26,5	29,3		
7 лет	111,1	113,6	116,9	120,8	124,8	128,0	131,3	17,9	19,4	20,6	22,7	25,3	28,3	31,6		
8 лет	116,5	119,3	123,0	127,2	131,0	134,3	137,7	20,0	21,4	23,0	25,1	28,5	32,1	36,3		
9 лет	122,0	124,6	128,4	132,8	137,0	140,5	144,8	21,9	23,4	25,5	28,2	32,0	36,3	41,0		
10 лет	127,0	130,5	134,3	139,0	142,9	146,7	151,0	22,7	25,0	27,7	30,6	34,9	39,8	47,4		
11 лет	131,8	136,2	140,2	145,3	148,8	153,2	157,7	24,9	27,8	30,7	34,3	38,9	44,6	55,2		
12 лет	137,6	142,2	145,9	150,4	154,2	159,2	163,2	27,8	31,8	36,0	40,0	45,4	51,8	63,4		
13 лет	143,0	148,3	151,8	155,5	159,8	163,7	168,0	32,0	38,7	43,0	47,5	52,5	59,0	69,0		
14 лет	147,8	152,6	155,4	159,0	163,6	167,2	171,2	37,6	43,8	48,2	52,8	58,0	64,0	72,2		
15 лет	150,7	154,4	157,2	161,2	166,0	169,2	173,4	42,0	46,8	50,6	55,2	60,4	66,5	74,9		
16 лет	151,6	155,2	158,0	162,5	166,8	170,2	173,8	45,2	48,4	51,8	56,5	61,3	67,6	75,6		

Рисунок 1. Таблица оценки роста и веса



Визуализирована программа с помощью Windows Forms. В программе используются три основных вкладки

“Список” - в этой вкладке представлен демо-вариант отчета, который потом создается с помощью HTML, нажатием кнопки “Инструменты” и выбором “Создать отчет” на меню-баре (рис. 2).

ID	Номер	ФИО	Пол	Дата рождения	Рост	Вес	Возрастная группа	Оценка роста	Оценка веса	Норма зубов	Половое развитие
16	242	[REDACTED]	Мужской	15.12.2010	150	40	30	8	6		Опережает   Вне возраста(0)

Рисунок 2. «Список»

Вкладка “Добавление” представляет из себя несколько строк для ввода с подписями, выбор пола и кнопку добавления. При нажатии кнопки происходит оценка параметров роста и веса исходя из введенных параметров (рис. 3).

После добавления для отображения нового списка, нужно опять же в “Инструменты” выбрать “Обновить”, которая перепишет список в первой вкладке.

Номер

Имя  Дата рождения

Рост  Вес

Пол  Женский  Мужской

Для детей от 5 до 12 лет (для девочек до 10 лет)

Число зубов

Рисунок 3. «Добавление»

И третья вкладка — это удаление. Оно происходит посредством ввода ID, которое можно узнать, посмотрев на список в первой вкладке (рис. 4). И завершающий этап программы — это отчет по данным и оценке их (рис. 5).

ID

Удалить

Рисунок 4. «Удаление»

№	ФИО	Пол	Дата рождения	Рост	Вес	Возрастная группа	Оценка роста	Оценка веса	Норма зубов	Половое развитие
242	Батанин Тимофей Алексеевич	Мужской	15,12,2010	150	40	30	8	6	Опережает	Вне возраста(0)

Рисунок 5. «Отчет»

## Выводы

Разработанный программный комплекс способен повысить эффективность деятельности врача-педиатра на основе автоматизации трудоемких операций анализа, обработки, статистики и оценки информации. Были обработаны более 40 оценочных таблицы показателей физического развития. Подобран язык программирования для выполнения задания. Реализована программа для работы с показателями физических параметров детей, их оценка, возможность их изменения, просмотра, а также представление информации в виде отчета. Созданная программа будет использоваться в разных лечебных учреждениях и иметь практическое применение в сфере здравоохранения

## Библиографический список

1. **Нейгел, К.** C# 4.0 и платформа .NET 4 для профессионалов / К. Нейгел. – М., 2018.
2. Чекалова, Н.Г. Оздоровительные и коррекционные программы для школьников с сочетанной патологией костно-мышечной и нервной систем / Н.Г. Чекалова [и др.] // Медицинский альманах. 2014. № 2 (32). С. 94-96.
3. **Чекалова, Н.Г.** Особенности функциональных резервов организма школьников в динамике обучения / Н.Г. Чекалова [и др.] // Медицинский альманах. 2016. № 5 (45). С. 232-234.
4. **Силкин, Ю.Р.** Особенности показателей здоровья учащихся с патологией костно-мышечной системы / Силкин Ю.Р. [и др.] // Медицинский альманах. 2013. № 2 (26). С. 135-138.

**D.A.Batanin, S.A.Chekalova**

## DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE COMPLEX FOR EVALUATING THE PHYSICAL DEVELOPMENT OF CHILDREN OF DIFFERENT AGE GROUPS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev,  
Privolzhsky Research Medical University

The work develops a software package for assessing the physical development of children of various age groups. A software tool for statistics and development assessment is presented to simplify the work of a medical worker. This information system is able to increase the efficiency of activities based on the automation of labor-intensive data collection processes, their processing and evaluation.

**Keywords:** data storage, physical development, children, automation.

М.С. Баранова, В.В. Гладков

## ЯВНОЕ ОПИСАНИЕ ВСЕХ ВЕЙВЛЕТ-БАЗИСОВ ПЕРВОГО ЭТАПА В ДИСКРЕТНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ СОБОЛЕВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В статье дано явное описание всех вейвлет-базисов первого этапа в дискретных пространствах Соболева, которые являются обобщением пространств  $l^2(\mathbb{Z}_N)$

**Ключевые слова:** линейное пространство, вейвлет базисы, дискретное преобразование Фурье, дискретные пространства Соболева.

### Основные обозначения

Пространство  $l^2(\mathbb{Z}_N)$

$$\mathbb{Z}_N := \{0, 1, \dots, N-1\};$$

$$l^2(\mathbb{Z}_N) := \mathbb{C}^N := \{z = (z(0), z(1), \dots, z(N-1)): z(j) \in \mathbb{C}, 0 \leq j \leq N-1\}.$$

**Скалярное произведение.**

$$\langle z, w \rangle = \sum_{k=0}^{N-1} z(k) \overline{w(k)}, z, w \in l^2(\mathbb{Z}_N).$$

**Норма.**

$$\|z\| = (\sum_{k=0}^{N-1} |z(k)|^2)^{1/2}.$$

**Преобразование Фурье.**

$$\hat{z}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) e^{-2\pi i m n / N}.$$

**Равенство Парсеваля.**

$$\langle z, w \rangle = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \hat{z}(m) \overline{\hat{w}(m)} = \frac{1}{N} \langle \hat{z}, \hat{w} \rangle.$$

**Формула Планшереля.**

$$\|z\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |\hat{z}(m)|^2 = \frac{1}{N} \|\hat{z}\|^2.$$

**Обратное дискретное преобразование Фурье.**

$$\check{w}(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} w(m) e^{\frac{2\pi i m n}{N}}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

**Очевидное свойство:**

$$(\hat{z})^V = z.$$

**Оператор циклического сдвига.**

$$R_k z(n) = z(n-k), n \in \mathbb{Z}, z \in l^2(\mathbb{Z}_N).$$

**Вектор  $z$  считается периодическим.**

$$z(j+N) = z(j), \forall j \in \mathbb{Z}.$$

**Свертка.**

$$z * w(n) = \sum_{k=0}^{N-1} z(n-k) w(k), n \in \mathbb{Z}.$$

**Основные свойства.**

$$\begin{aligned} (i) \widehat{R_k z}(n) &= e^{-\frac{2\pi i n k}{N}} \hat{z}(n) \\ (ii) \langle z, R_k w \rangle &= z * \tilde{w}(k), \tilde{w}(k) = \overline{w(-k)} \\ (iii) \widehat{z * w}(n) &= \hat{z}(n) \hat{w}(n). \end{aligned}$$

**Вейвлет базис первого этапа пространства  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .**

$l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  это дискретный аналог пространства Соболева  $H^s(\mathbb{R})$ .

Если  $L_2(\mathbb{R})$  –пространство комплекснозначных функций на  $\mathbb{R}$  суммируемых с том,  $f(x) \in L_2(\mathbb{R})$  и  $\hat{f}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} f(x) e^{-ixw} dx$ ,

есть преобразование Фурье для  $f(x)$ , причем  $\hat{f}(w) \in L_2(\mathbb{R})$  то пространство Соболева  $H^s(\mathbb{R})$  определяется как

$$H^s(\mathbb{R}) = \{f \in L_2(\mathbb{R}) : (1 + |w|^2)^{s/2} \hat{f}(w) \in L_2(\mathbb{R})\}.$$

**Определение[5].**

$$z \in l_s^2(\mathbb{Z}_N) \Leftrightarrow (1 + (\cdot))^{\frac{s}{2}} \hat{z}(\cdot) \in l^2(\mathbb{Z}_N).$$

**Скалярное произведение** в  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

$$\langle z, w \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} (1 + m^2)^s \hat{z}(m) \overline{\hat{w}(m)}, \forall z, w \in l_s^2(\mathbb{Z}_N).$$

**Норма.**

$$\|z\|_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} (1 + m^2)^s |\hat{z}(m)|^2.$$

При  $s=0$  пространство  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  и  $l^2(\mathbb{Z}_N)$  совпадают.

**Лемма[5].**

Пусть  $w \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ . Тогда множество  $\{R_k w\}_{k=0}^{N-1}$  есть ортонормированный базис для  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ , если и только если  $(1 + n^2)^s |\hat{w}(n)|^2 = 1$  для всех  $n=0, 1, \dots, N-1$ .

**Определение [5].**

$M$  – целое положительное число,  $N=2M$ .

Ортонормированный базис для  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  в виде:

$$\{R_{2k} u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k} v\}_{k=0}^{M-1},$$

для некоторых  $u, v \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  называется вейвлет базисом первого этапа пространства  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .  $u$ - называют отцовским вейвлетом, а  $v$ - материнским вейвлетом.

**Лемма [5].**

Пусть  $N=2M$  для некоторого положительного целого  $M$  и  $w \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

Тогда  $\{R_{2k} w\}_{k=0}^{M-1}$  ортонормальное множество в  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  если и только если  $(1 + n^2)^s |\hat{w}(n)|^2 + (1 + (n + M)^2)^s |\hat{w}(n + M)|^2 = 2$  для  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

**Определение[5].**

Пусть  $N=2M$ ,  $M \in \mathbb{N}$ ,  $u, v \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

Определим систему матриц для  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

$$A_s(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (1 + n^2)^{\frac{s}{2}} \hat{u}(n) & (1 + n^2)^{\frac{s}{2}} \hat{v}(n) \\ (1 + (n + M)^2)^{\frac{s}{2}} \hat{u}(n + M) & (1 + (n + M)^2)^{\frac{s}{2}} \hat{v}(n + M) \end{bmatrix}$$

**Теорема[5].**

Пусть  $N=2M$ ,  $M \in \mathbb{N}$ ,  $u, v \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

Тогда

$$B = \{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$$

Является ортонормированным базисом для  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  если и только если система матриц  $A_s(n)$  унитарна для  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

Эквивалентно: если и только если

$$(1+n^2)^s |\hat{u}(n)|^2 + (1+(n+M)^2)^s |\hat{u}(n+M)|^2 = 2.$$

$$(1+n^2)^s |\hat{v}(n)|^2 + (1+(n+M)^2)^s |\hat{v}(n+M)|^2 = 2.$$

$$(1+n^2)^s \hat{u}(n) \overline{\hat{v}(n)} + (1+(n+M)^2)^s \hat{u}(n+M) \overline{\hat{v}(n+M)} = 0.$$

для  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

Сформируем и докажем следующие два утверждения.

1.  $N=2M$ ,  $M \in \mathbb{N}$

Пусть  $\{r(n)\}_{k=0}^{M-1}$  вещественные числа, такие что

$$0 \leq r(n) \leq \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{s/2}}, \quad n=0, 1, \dots, M-1.$$

Пусть

$\{\theta(n)\}_{k=0}^{M-1}, \{\varphi(n)\}_{k=0}^{M-1}, \{\sigma(n)\}_{k=0}^{M-1}, \{\rho(n)\}_{k=0}^{M-1}$  - вещественные числа, такие что если

$$n \in \{0, 1, \dots, M-1\} \text{ и } 0 < r(n) < \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{s/2}},$$

то  $\theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = (2k+1)\pi$  для некоторых  $k = k(n) \in \mathbb{Z}$

(Если  $r(n) = 0$  или  $r(n) = \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{s/2}}$ , то  $\theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n)$  любые вещественные числа)

Определим  $\hat{u}$  и  $\hat{v}$  положив:

$$\begin{aligned} \hat{u}(n) &= r(n) e^{i\theta(n)} \\ \hat{v}(n) &= \sqrt{\frac{2 - (1+n^2)^s r^2(n)}{(1+n^2)^s}} e^{i\sigma(n)} \\ \hat{u}(n+M) &= \sqrt{\frac{2 - (1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\varphi(n)} \\ \hat{v}(n+M) &= \sqrt{\frac{(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\rho(n)} \end{aligned}$$

Определим  $u$  и  $v \in l_s^2(\mathbb{Z}_N)$  как  $u = (\hat{u})^\vee$  и  $v = (\hat{v})^\vee$ . Тогда  $\{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$  - есть ортонормированный базис в  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

2. Для любого вейвлет – базиса первого этапа  $\{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$ , вектора  $\hat{u}$  и  $\hat{v}$  имеют вид, определенный в пункте 1) при некоторых вещественных  $\theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n), n=0,$

$1, \dots, M-1$ , удовлетворяющих условиям  $0 \leq r(n) \leq \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{s/2}}$  и

$\theta + \rho - \varphi - \sigma = (2k+1)\pi$  для некоторых  $k = k(n) \in \mathbb{Z}$  для каждого  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

**Доказательство 1.**

Рассмотрим систему матриц

$$A_s(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (1+n^2)^{\frac{s}{2}} \hat{u}(n) & (1+n^2)^{\frac{s}{2}} \hat{v}(n) \\ (1+(n+M)^2)^{\frac{s}{2}} \hat{u}(n+M) & (1+(n+M)^2)^{\frac{s}{2}} \hat{v}(n+M) \end{bmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} \hat{u}(n) &= r(n)e^{i\theta(n)} \\ \hat{v}(n) &= \sqrt{\frac{2-(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+n^2)^s}} e^{i\sigma(n)} \\ \hat{u}(n+M) &= \sqrt{\frac{2-(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\varphi(n)} \\ \hat{v}(n+M) &= \sqrt{\frac{(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\rho(n)} \end{aligned}$$

тогда

$$\begin{aligned} (1+n^2)^s |\hat{u}(n)|^2 + (1+(n+M)^2)^s |\hat{u}(n+M)|^2 &= 2 \\ (1+n^2)^s |\hat{v}(n)|^2 + (1+(n+M)^2)^s |\hat{v}(n+M)|^2 &= 2 \\ (1+n^2)^s \hat{u}(n) \overline{\hat{v}(n)} + (1+(n+M)^2)^s \hat{u}(n+M) \overline{\hat{v}(n+M)} &= \\ (1+n^2)^s r(n) e^{i\theta(n)} \sqrt{\frac{2-(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+n^2)^s}} e^{i\sigma(n)} + \\ (1+(n+M)^2)^s \sqrt{\frac{2-(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\varphi(n)} \sqrt{\frac{(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+(n+M)^2)^s}} e^{i\rho(n)} &= \\ (1+n^2)^{\frac{s}{2}} r(n) \sqrt{2-(1+n^2)^s r^2(n)} e^{i(\theta(n)-\sigma(n))} + \\ \sqrt{2-(1+n^2)^s r^2(n)} \sqrt{(1+n^2)^s r^2(n)} e^{i(\varphi(n)-\rho(n))} &= \\ (1+n^2)^{\frac{s}{2}} r(n) \sqrt{2-(1+n^2)^s r^2(n)} (e^{i(\theta(n)-\sigma(n))} + e^{i(\varphi(n)-\rho(n))}) &(*) \end{aligned}$$

Если  $r(n) = 0$  или  $r(n) = \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{\frac{s}{2}}}$ , то последнее выражение равно 0 при любых

$\theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n)$ .

Если  $0 < r(n) < \frac{\sqrt{2}}{(1+n^2)^{\frac{s}{2}}}$ , то в силу условий  $\theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = (2k+1)\pi$ ,

Получим  $e^{i(\theta(n)-\sigma(n))} + e^{i(\varphi(n)-\rho(n))} = e^{i(\theta(n)-\sigma(n))} + e^{i(\varphi(n)-\rho(n))} e^{-i(2k+1)\pi} = 0$

Матрицы  $A_s(n)$  оказываются унитарными при  $n=0, 1, \dots, M-1$ . Найдя  $u$  и  $v$  обратным преобразованием Фурье, получим, что  $B = \{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$  есть ортонормированный базис в  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ .

**Доказательство 2.**

Пусть  $\{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$  есть вейвлет-базис первого этапа для  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ . Тогда матрицы  $A_s(n)$  унитарны при  $n=0, 1, \dots, M-1$ .

Пусть

$$\hat{u}(n) = r(n)e^{i\theta(n)}$$

Из унитарности матриц  $A_s(n)$  следует, что

$$(1+n^2)^s |\hat{u}(n)|^2 + (1+n^2)^s |\hat{v}(n)|^2 = 2$$

Отсюда

$$|\hat{v}(n)| = \sqrt{\frac{2-(1+n^2)^s r^2(n)}{(1+n^2)^s}}$$

Пусть

$$\hat{v}(n) = \sqrt{\frac{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + n^2)^s}} e^{i\sigma(n)}$$

Из унитарности матриц  $A_s(n)$  имеем

$$(1 + (n + M)^2)^s |\hat{u}(n + M)|^2 + (1 + n^2)^s |\hat{u}(n)|^2 = 2$$

Отсюда

$$\hat{u}(n + M) = \sqrt{\frac{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + (n + M)^2)^s}} e^{i\varphi(n)}$$

Из унитарности матриц  $A_s(n)$  следует также, что

$$(1 + n^2)^s |\hat{v}(n)|^2 + (1 + (n + M)^2)^s |\hat{v}(n + M)|^2 = 2$$

Отсюда

$$\hat{v}(n + M) = \sqrt{\frac{(1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + (n + M)^2)^s}} e^{i\rho(n)}$$

Из унитарности матриц  $A_s(n)$  следует также, что

$$(1 + n^2)^s \hat{u}(n) \overline{\hat{v}(n)} + (1 + (n + M)^2)^s \hat{u}(n + M) \overline{\hat{v}(n + M)} = 0$$

То есть

$$(1 + n^2)^s r(n) e^{i\theta(n)} \sqrt{\frac{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + n^2)^s}} e^{-i\sigma(n)} + (1 + (n + M)^2)^s \sqrt{\frac{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + (n + M)^2)^s}} e^{i\varphi(n)} \sqrt{\frac{(1 + n^2)^s r^2(n)}{(1 + (n + M)^2)^s}} e^{-i\rho(n)} = 0$$

$$(1 + n^2)^{s/2} r(n) \sqrt{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)} e^{i(\theta(n) - i\sigma(n))} + \sqrt{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)} (1 + n^2)^{s/2} e^{e^{i(\varphi(n) - \rho(n))}} = 0$$

$$\text{Или } (1 + n^2)^{s/2} r(n) \sqrt{2 - (1 + n^2)^s r^2(n)} \left( e^{i(\theta(n) - i\sigma(n))} + e^{e^{i(\varphi(n) - \rho(n))}} \right) = 0$$

Если  $r(n) = 0$  или  $r(n) = \frac{\sqrt{2}}{(1 + n^2)^{s/2}}$ , то это равенство выполняется при любых

$\theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n)$ .

Если  $0 \leq r(n) \leq \frac{\sqrt{2}}{(1 + n^2)^{s/2}}$ , то должно быть  $\left( e^{i(\theta(n) - \sigma(n))} + e^{e^{i(\varphi(n) - \rho(n))}} \right) = 0$

То есть  $\theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = (2k + 1)\pi$

**Пример.**

Пусть  $N=4$ .

Положим  $r(0) = \sqrt{2}, r(1) = 2^{-s/2}$

$$\hat{u}(0) = \sqrt{2} e^{i\theta(0)}, \theta(0) = 0, \hat{U}(0) = \sqrt{2}$$

$$\hat{u}(1) = r(1) e^{i\theta(1)}, \theta(1) = 0, r(1) = 2^{-s/2}$$

$$\hat{u}(2) = 0 e^{i\varphi(0)}, \varphi(0) - \text{любое}$$

$$\hat{u}(3) = \sqrt{\frac{2 - 2^s 2^{-s}}{10^s}} e^{i\varphi(1)} = 10^{-s/2} e^{i\varphi(1)} = 10^{-s/2}, \varphi(1) = 0$$

$$\hat{v}(0) = 0 e^{i\sigma(n)}, \sigma(0) - \text{любое}, \hat{v}(0) = 0$$

$$\hat{v}(1) = \sqrt{\frac{2 - 2^s 2^{-s}}{2^s}} e^{i\sigma(1)} = 2^{-s/2} e^{i\sigma(1)} = 2^{-s/2}, \sigma(1) = 0$$

$$\hat{v}(2) = \sqrt{\frac{2}{5^s}} e^{i\rho(0)} = \sqrt{2} 5^{-s/2}, \rho(0) = 0$$

$$\hat{v}(3) = \sqrt{\frac{2^s 2^{-s}}{10^s}} e^{i\rho(1)} = 10^{-s/2} e^{i\pi} = 10^{-s/2}, \rho(1) = \pi$$

Тогда  $\theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = \pi$

$A_s(0) = \begin{pmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{pmatrix}$  - унитарная матрица при любых  $\theta(0), \rho(0), \varphi(0), \sigma(0)$

$A_s(1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\theta(1)} & e^{i\sigma(1)} \\ e^{i\varphi(1)} & e^{i\rho(1)} \end{pmatrix}$  - унитарная матрица

Таким образом

$$\hat{u} = (\sqrt{2}, 2^{-\frac{s}{2}}, 0, 10^{-\frac{s}{2}})$$

$$\hat{v} = (0, 2^{-\frac{s}{2}}, \sqrt{2} 5^{-\frac{s}{2}}, 10^{-\frac{s}{2}})$$

Найдем обратное преобразование Фурье

$$u = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2} \\ 2^{-\frac{s}{2}} \\ 0 \\ 10^{-\frac{s}{2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \sqrt{2} + 2^{-\frac{s}{2}} + 10^{-\frac{s}{2}} \\ \sqrt{2} + i(2^{-\frac{s}{2}} - 10^{-\frac{s}{2}}) \\ \sqrt{2} - 2^{-\frac{s}{2}} - 10^{-\frac{s}{2}} \\ \sqrt{2} - i(2^{-\frac{s}{2}} - 10^{-\frac{s}{2}}) \end{bmatrix}$$

$$u = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 2^{-\frac{s}{2}} \\ 5^{-\frac{s}{2}} \sqrt{2} \\ 10^{-\frac{s}{2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2^{-\frac{s}{2}} + 5^{-\frac{s}{2}} \sqrt{2} - 10^{-\frac{s}{2}} \\ i 2^{-\frac{s}{2}} + 5^{-\frac{s}{2}} \sqrt{2} - i 10^{-\frac{s}{2}} \\ -2^{-\frac{s}{2}} + 5^{-\frac{s}{2}} \sqrt{2} + 10^{-\frac{s}{2}} \\ -i 2^{-\frac{s}{2}} - 5^{-\frac{s}{2}} \sqrt{2} - i 10^{-\frac{s}{2}} \end{bmatrix}$$

Тогда

$B = \{v, R_2 v, u, R_2 u\}$  есть ортонормированный базис в  $l_s^2(\mathbb{Z}_N)$ , что можно проверить и непосредственно.

### Библиографический список

1. **Anton Fahlgren.** Wavelets on  $\mathbb{Z}_N$ . // Självständiga arbeten i matematik matematiska institutionen. Stockholmsuniversitet.-2016, №12.- 57p.
2. **Alberto Debernardi Pinos.** Discrete wavelets on  $\mathbb{Z}_N$ . // Advanced Mathematics Master Thesis.- Barcelona, University of Barcelona, Yune 2014.-103 p.
3. **M.W. Wong.** Discrete Fourier Analysis.-NY.: Publiser. 2011.-176p.
4. **Фрейзер, М.** Введение в вейвлеты в свете линейной алгебры / М. Фрейзер. - М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008, 487 с.



5. **R.S. Pathak and Cireshpandey.** Wavelets in discrete sobolev space. / Investigations in Mathematical Science.-London: MMA.2012. Vol. 2(1). - P.171-180.

6. **Баранова, М.С.** Явное описание всех вейвлет-базисов первого этапа пространства  $l^2(\mathbb{Z}_N)$  / М.С. Баранова, В.В.Гладков // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ – 2018). – Н. Новгород: НГТУ, 2018. С. 563-566.

**M.S. Baranova, V.V. Gladkov**

**EXPLICIT DESCRIPTION OF ALL OF THE WAVELETS BASES  
OF THE FIRST-STAGE IN SPACE  $l^2_s(\mathbb{Z}_N)$**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** To study the wavelets bases first-stage in space  $l^2_s(\mathbb{Z}_N)$ .

**Design (methodology) approach:** For the description of bases, we used the methods of linear algebra.

**Findings:** In this paper, we obtain a description of all possible wavelet bases first-stage in space  $l^2_s(\mathbb{Z}_N)$ .

**Research limitation/implications:** In this paper, we considered only discrete finite dimensional space.

**Originality/value:** Necessary and sufficient condition for existence of wavelet bases in space  $l^2_s(\mathbb{Z}_N)$  are proved.

**Key words:** linear space, wavelet bases, Sobolev.

А.В. Горенкова, С.А. Чекалова

## АВТОМАТИЗАЦИЯ АНКЕТИРОВАНИЯ ПАЦИЕНТОВ В МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Приволжский исследовательский медицинский университет

В работе рассматривается программный комплекс для автоматизации анкетирования пациентов в медицинских учреждениях различных типов. Разработанная программа представляет собой программное средство для создания и обработки стандартизированных анкет, а также ведения статистики и анализа собранных с пациентов данных. Автоматизация процесса обработки данных анкетирования способна повысить эффективность рабочего процесса в медицинских учреждениях.

**Ключевые слова:** распознавание зрительных образов, база данных, анкетирование, автоматизация, медицинские учреждения

### Введение

В настоящее время одной из глобальных проблем всех сфер деятельности человека является автоматизация. Основная задача автоматизации - увеличение производительности работников за счёт применения передовых технологий. Не является исключением и медицинская отрасль. Эффективная работа медицинских учреждений всех размеров и любой специализации невозможна без медицинских автоматизированных систем. С помощью таких систем в клиниках ведутся картотеки пациентов, производится запись на прием к специалистам, ведется управленческий и финансовый учет. Одно из наиболее важных мест в медицинских системах занимает перевод на более высокий уровень взаимодействия с пациентами. Для этого необходимо создание универсальных систем, которые позволяли бы унифицировано работать в любых медицинских учреждениях с любыми группами пациентов.

Целью данной работы является создание программного комплекса для автоматизации анкетирования пациентов в медицинских учреждениях различных типов. Комплекс предназначен для создания и обработки бумажных анкет с возможностью ведения статистики опрошенных для каждого вида анкет, а также проведение анализа и оценки собранных данных. Комплекс позволит автоматизировать обработку любых типов анкет, в которых предполагается выбор пациентом в виде ответов на вопросы, а также упростить создание таких форм и обеспечить их единообразный вид.

На основе обработанных анкет составляется база данных, неограниченная в размерах. Статистическая выборка возможна для любых групп пациентов, т.к. тематика анкет неограничена. Создание такой легко пополняемой базы данных является актуальной задачей в медицинских учреждениях.

## Постановка задачи

Целью данной работы является создание программного комплекса, отвечающего следующим требованиям:

- 1) осуществлять создание стандартизированных анкет с закрытым типом вопросов (с вариантами ответов);
- 2) автоматизированно обрабатывать результаты анкетирования пациентов медицинских учреждений;
- 3) собирать результаты анкетирования в базу данных и предоставлять возможность внесения исправлений в данные;
- 4) предоставлять возможность выгрузки базы данных из системы;
- 5) проводить первичный анализ полученных данных для любых анкет.

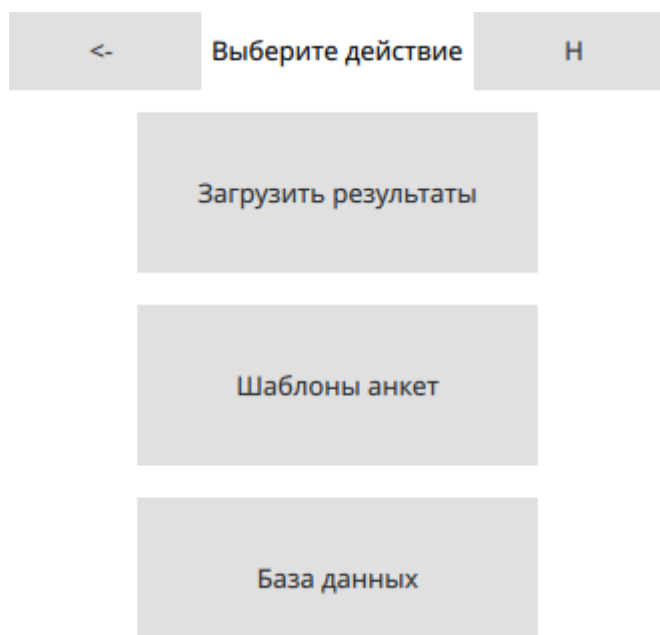
## Описание работы программного комплекса

Основная задача состояла в разработке программного комплекса, позволяющего создавать и редактировать анкеты, хранить базу данных с готовыми анкетами, обрабатывать результаты анкетирования пациентов и собирать статистику анкетирования в базу данных. Не менее важной задачей было реализовать удобный программный интерфейс и функционал для медицинских работников.

В качестве платформы для разработки был выбран Qt - кроссплатформенный фреймворк для разработки программного обеспечения на языке программирования C++. Преимущества данного фреймворка в огромном наборе библиотек для работы с базами данных на основе SQL, совместимость с библиотекой алгоритмов компьютерного зрения – opencv, а также собственный язык программирования - qml, основанный на JavaScript, предназначенный для дизайна приложений, делающих основной упор на пользовательский интерфейс. Использование Qt позволяет выполнить все требования к программному комплексу используя только язык C++ и не прибегая к излишним усложнениям реализации для различных платформ.

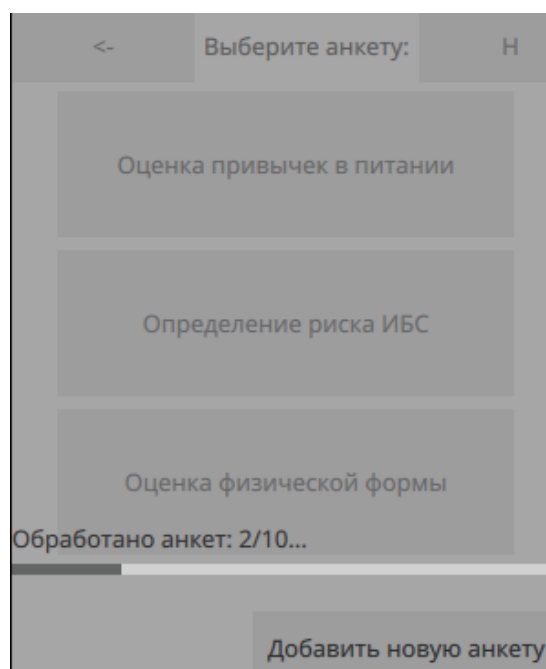
Для распознавания отмеченных анкетированными ответами использовалась библиотека с открытым исходным кодом – opencv 4. Данная библиотека позволяет работать с изображениями и находить на них отметки, сделанные анкетированным пациентом. Для корректного поиска меток используется заранее заданный чистый «шаблон» анкеты из базы данных программного комплекса.

Программа состоит из главного окна и нескольких дочерних диалоговых окон. На стартовой странице находится меню с основным функционалом программного комплекса: обработка результатов анкетирования, создание и просмотр анкет, работа с базой данных для каждой анкеты. При выборе любого пункта меню выполняется переход на соответствующий действию интерфейс без создания дополнительных диалоговых окон. Интерфейс стартовой страницы представлен на рис. 1.



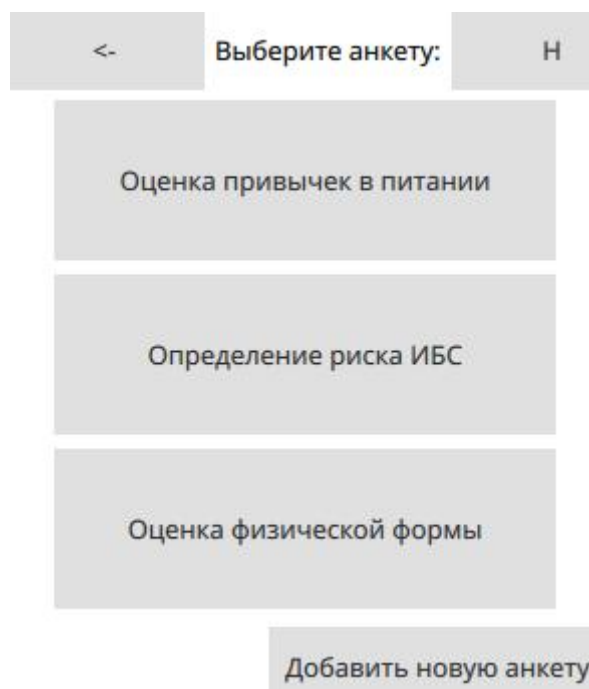
**Рисунок 1. Стартовая страница программы**

Первый пункт меню выполняет переход к интерфейсу обработки заполненных анкет. Пользователю достаточно указать папку с отсканированными анкетами и выбрать шаблон анкеты, после чего программа начнёт обработку изображений и занесение результатов в базу данных. Если нужного шаблона анкеты в базе данных не существует, то пользователю предлагается создать его. Все анкеты создаются медицинскими работниками один раз, а далее любую анкету из базы данных можно удалить/редактировать. Интерфейс страницы обработки представлен на рис. 2.



**Рисунок 2. Страница ожидания завершения обработки изображений**

Второй пункт меню позволяет добавить новую анкету или редактировать существующую, выгрузить любую анкету из базы данных в файл формата pdf.



**Рисунок 3. Список добавленных в систему анкет**

Сами анкеты хранятся в базе данных в формате json-документа, т.к. Qt позволяет быстро выгрузить все данные в нужном формате из json. Сама база данных анкет не использует SQL, т.к. необходимо быстрое расширение базы данных на элементы с неодинаковыми полями и с различной структурой ответов и вопросов, что позволяет сделать json-формат. Такое решение даёт возможность одновременно загружать базу для просмотра списком, редактировать её и сохранять обратно в базу, не используя лишних запросов. Список добавленных анкет представлен на рис. 3.

Третий пункт меню позволяет просмотреть базу данных с ответами по каждой анкете. Данные выводятся в таблицу, для которой возможно произвести сортировку по нужному столбцу.

### **Выводы**

Разработанный программный комплекс способен увеличить эффективность обработки данных анкетирования на основе автоматизации распознавания и занесения ответа в базу данных, создания стандартизированных анкет и первичного анализа полученной информации. Данный комплекс применим в любых медицинских учреждениях для анкетирования и сбора данных с пациентов.

### **Библиографический список**

1. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++ / Шлее Макс – БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с.
2. Learning Open CV 3: Computer Vision in C++ with the Open CV Library 1st Edition /Gary Bradski, Adrian Kaehler. - O'Reilly Media, Inc., 2014. – 1024 с.

3. Mastering Open CV with Practical Computer Vision Projects / Daniel Lélis Baggio, Shervin Emami, Et al. – PASCIT, 2012. – 340 с.
4. **Кириллов, В.В.** Структуризированный язык запросов (SQL) / Кириллов В.В., Громов Г.Ю. – СПГИТМО, html-формат.
5. **Копейкин, М.В.** Базы данных. Основы SQL реляционных баз данных / Копейкин М.В., Спиридонов В.В., Шумова Е.О. – СЗТУ, 2005. – 160 с.
6. **Чекалова, Н.Г.** Особенности функциональных резервов организма школьников в динамике обучения / Н.Г. Чекалова [и др.] // Медицинский альманах, №5 (45), 2016. – С. 232-234.
7. **Чекалова, Н.Г.** Программа оздоровления спортсменов с заболеваниями органов дыхания в условиях школьного реабилитационного центра / Н.Г. Чекалова [и др.] // В сборнике: «Проблемы гигиенической безопасности и управления факторами риска для здоровья населения», Научные труды. Нижний Новгород, 2015. – С. 111-113.

**A.V. Gorenkova, S.A. Chekalova**

### **AUTOMATION OF PATIENT QUESTIONS IN MEDICAL INSTITUTIONS OF VARIOUS TYPES**

Nizhny Novgorodstate technical university.a.R.E. Alekseev,  
Privolzhskyresearch medical University

In the report discusses of a software package for automating patient questionnaires in medical institutions of various types. The developed program is a software tool for creating and processing standardized questionnaires and for statistics and analysis of collected data. Automation of the processing of questionnaire data can increase the efficiency of working in medical institutions.

**Keywords:** computer vision, database, questionnaire, automation, medical institutions

## СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРЕЗ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИБРЕЖНЫХ КАМЕР

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований  
ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Задачей данной работы является разработка системы определения уровня моря и длины зоны затопления через распознавание изображений с прибрежных камер на основе аппарата искусственных нейронных сетей. Автоматическое распознавание изображений приносит множество новых возможностей.

Для достижения данной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- составить набор данных включающих изображение и результат обработки векторную ломаную линию;
- по составленному набору настроить алгоритм;
- проверить работу алгоритма с изображениями, поступающими в реальном времени.

В результате выполнения данной работы определена архитектура процессов по распознаванию зоны затопления по данным изображения с камер. Реализована модель, способная не хуже человека определять линию затопления воды на побережье.

**Ключевые слова:** нейронные сети, волновые характеристики, прибрежная зона.

### Актуальность

В современном мире практически за каждым углом на улице можно наткнуться на камеру видеонаблюдения. Зачастую их целью является - обеспечение безопасности. Такое повсеместное распространение внешних камер видеонаблюдения не обошло стороной и прибрежную зону морей. К примеру, на веб-ресурсе <http://webcam-krasnodar.ru/> насчитывается множество камер Краснодарского края, которые передают изображение в режиме реального времени. На нем можно найти 50 камер в г. Сочи, из которых около половины направлены на приливную зону и передают качественное изображение состояния берега.

Такое распространение камер, расположенных в удобных для исследований местах, предоставляет возможность для получения и обработки информации об обстановке в прибрежной зоне. Однако для анализа изображений в режиме реального времени в перспективе требуется затрата немалых человеческих ресурсов. В этом случае на помощь приходит перспективное в данный момент направление в информационных технологиях, как искусственный интеллект, в частности набирающий особую популярность раздел - искусственные нейронные сети. Способность таких технологий к обучению и обработке различных видов данных идеально подходит под задачу анализа изображения прибрежной зоны.

Что касается искусственных нейронных сетей, то в последние годы данный раздел машинного обучения получается все большее развитие в связи со значительным повышением вычислительных мощностей существующих компьютеров и повсеместном распространении применения графических карт для вычислений, что позволяет обучать нейронные сети гораздо большей глубины и сложной структуры, чем раньше [1,2,8,7], которые, в свою очередь, показывают значительно лучшие результаты по сравнению с другими алгоритмами для мно-

гих задач, в особенности задачи распознавания изображений [3,4,5,6]. Данное направление развития нейронных сетей получило название DeepLearning (“глубокое обучение”) и является одним из наиболее успешных и быстро развивающихся в настоящее время. Так, по результатам ежегодного соревнования по распознаванию изображений ImageNet-2014 подавляющее большинство успешных алгоритмов использовало глубокие сверточные сети. Так как задача распознавания изображений является очень обширной и в большинстве случаев требует отдельного подхода для различных типов изображений, то рассмотреть задачу распознавания изображений в целом в рамках одного исследования практически невозможно. В рамках нашей работы рассмотрим задачу построения векторного изображения затопления берега по данным с камер наружного наблюдения прибрежной зоны.

### Проблема

Рассмотрим пример данных, с которыми нужно будет работать. На рис. 1 представлен пример изображения с веб-камеры в Сочи с пляжа отеля “Сон у моря”.



**Рисунок 1. Изображение с веб-камеры отеля “Сон у моря”**

Человеческий глаз с легкостью может очертить ломаную линию волны, прибываемую на берег. И наша задача состоит в том, чтобы обучить нейронную сеть, не хуже человека определять набор двумерных точек, составляющих картину волны на берегу. На рис. 2 представлен ожидаемый результат обработки изображения.



**Рисунок 2. Ожидаемый результат обработки изображения**

На изображении всегда присутствуют статические объекты, такие как волнорезы, пирсы,



здания, и другие различные сооружения. С их помощью можно зафиксировать точку наблюдения, а также примерно оценить ширину наплыва воды на берег в метрах.

На момент начала исследования не удалось найти в открытых источниках готовые предварительно обученные модели, решающие схожие задачи. За модель в данном случае принимается результат обучения алгоритма, способный производить собственный анализ данных.

### **Инструментарий**

На данный момент было принято решение в работе для анализа изображений использовать библиотеку TensorFlow на языке Python. Tensor Flow - это, по сути, инструмент, который позволяет реализовать или упростить реализацию машинного обучения (Machine Learning) для вашей системы или задачи. Если несколько более формально, то библиотека, которую мы собираемся использовать - это Deep Learning движок с открытым исходным кодом. При этом стоит дать определение Deep Learning, о котором уже упоминалось выше. По сути это область Machine Learning, которая использует концепцию функционирования нейронных связей человеческого мозга для решения различных проблем, таких как распознавание образов и речи, то есть таких задач, которые трудно решить с помощью просто вычислительных мощностей компьютера.

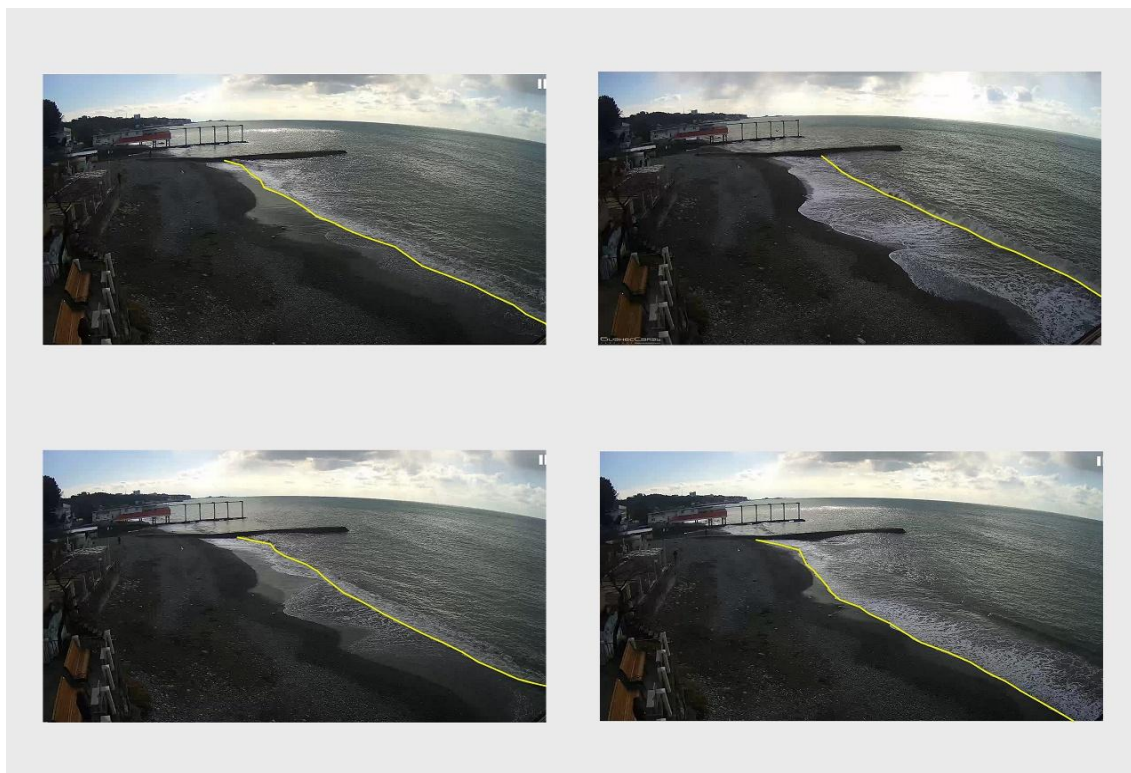
Если сравнить обычные сервисы и функции, решающие в какой-то степени схожие задачи, то нейронная сеть может не просто на выходе предоставлять результат по заранее определенным правилам, а сама обучается. В этом плане ее функционирование схоже с поведением мозга человека. То есть для сети не нужно строго знать все правила, которые заложены в задачу, а она сама для себя определяет правила и выдает результат.

К сказанному выше добавим, что Tensor Flow — это система машинного обучения, которая может работать как на локальном компьютере, в облаке, так и на смартфоне или даже, например, Raspberry Pi-платах, и для ускорения процесса обработки может также использовать GPU. И в этом ее большое преимущество – универсальность и некоторая простота (в определенном смысле).

### **Алгоритм действий**

Изначально для построения нейронной сети необходимо составить набор данных для тренировки алгоритма, так называемый DataSet. В нашем случае набор данных будет представлять собой множество изображений с одной камеры с разными условиями внешней среды. К каждой картинке должен соответствовать набор двумерных точек для составления векторной картины. Пример такого набора приведен на рис. 3.

После того как данные будут готовы нужно будет написать обучаемую модель на Python с помощью библиотеки TensorFlow, описание которой приведено выше. Зачастую процесс получения работоспособной модели не заканчивается после первой итерации обучения. После проверки результатов алгоритма итоги обработки не всегда получаются идеальными, поэтому следует проводить настройки модели и корректировку набора данных для обучения.



**Рисунок 3. Пример набора данных для тренировки**

### **Заключение**

В результате данной работы определена архитектура процессов по распознаванию зоны затопления по данным изображения с камер. Реализована модель, способная не хуже человека определять линию наплыва воды на берег. В дальнейшем, требуется составить Data Set для другой камеры с целью обучения в различных условиях, и проверить уже существующую модель в режиме реального времени.

*Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов Президента РФ МД-148.2020.5 и НШ-2485.2020.5 и грантов РФФИ №16-55-52019, 17-05-00067.*

### **Библиографический список**

1. **Герасименко, Н.А.** О некоторых особенностях технологии BIGDATA / Н.А. Герасименко // Научное обозрение. -2015, №16, с.180-184.
2. **Измалкова, С.А.** Использование глобальных технологий «BIGDATA» в управлении экономическими системами / С.А. Измалкова, Т.А. Головина // Известия Тульского государственного университета (серия «Экономические и юридические науки»). – 2015, т.4, №1, с.151-158.
3. **Куприянова, А.А.** Теоретические основы и методика судебно-почерковедческих исследований: Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1992.
4. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская. - М.: Горячая Линия - Телеком, 2007.
5. **Хайкин, С.** Нейронные сети / С. Хайкин. - М.; СПб.; Киев: Вильямс, 2006.

6. **Ясницкий, Л.Н.** Введение в искусственный интеллект / Л.Н. Ясницкий. - М.: Академия, 2005.
7. **Hamouda, A.Z.** Numerical computations of 1303 tsunamigenic propagation towards Alexandria, Egyptian Coast // Journal of African Earth Sciences. 2006. V. 44. P. 37–44.
8. **Lagoze, C.** Big Data, data integrity, and the fracturing of the control zone. Big Data & Society, July–December, 2014, p.2.

**D.V. Dogin<sup>1)</sup>, A.I. Zaytsev<sup>1,2)</sup>**

## **SYSTEM FOR DETERMINING WAVE CHARACTERISTICS THROUGH RECOGNITION OF IMAGES FROM COASTAL CAMERAS**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

<sup>2</sup>Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

The object of this work is to develop a system of sea level transfer and inundation zone length through recognition of images from coastal cameras based on artificial neural network apparatus. Automatic image recognition brings many new capabilities.

To achieve this goal, the following objectives have been formulated and achieved:

- Compose a data set comprising the image and the processing result of the vector broken line
- Set the algorithm according to the compiled set
- Check the algorithm for real-time images

As a result of this work, the architecture of processes for spreading the inundation zone is determined according to the data of the image from the cameras. A model has been implemented that can determine the water flooding line on the coast no worse than a person.

**Key words:** Neural networks, wave characteristics, coastal zone.

М.В. Кокоулина, Л.В. Талалушкина, Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин

## ИНЕРЦИОННЫЕ БАРОКЛИННЫЕ ВОЛНЫ В ЗАПИСЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе представлен предварительный анализ основных свойств стратифицированных морских течений, измеренных вблизи побережья Куршской косы в юго-восточной части Балтийского моря. Показано, что инерционные бароклинные колебания составляют значительную часть энергии стратифицированных течений. Максимальные скорости инерционного течения составляют 0,3-0,5 м/с, и такие волны можно рассматривать как фактор силового воздействия на морское дно или гидротехнические сооружения.

**Ключевые слова:** инерционные колебания, внутренние волны, скорость течения, амплитудный спектр, вероятность превышения уровня.

### Введение

Инерционные колебания представляют собой один из классов интенсивных мезомасштабных движений воды в морях и океанах. Волны соответствующих периодов часто регистрируются в измеренных волновых полях [1 – 3], включая наблюдения в Балтийском море [4, 5].

В настоящей работе представлен предварительный анализ основных свойств стратифицированных морских течений, являющихся важной составляющей гидрологического режима, измеренных вблизи побережья Куршской косы в юго-восточной части Балтийского моря. Записи в летний сезон часто обладают структурой, характерной для инерционных бароклиновых волн.

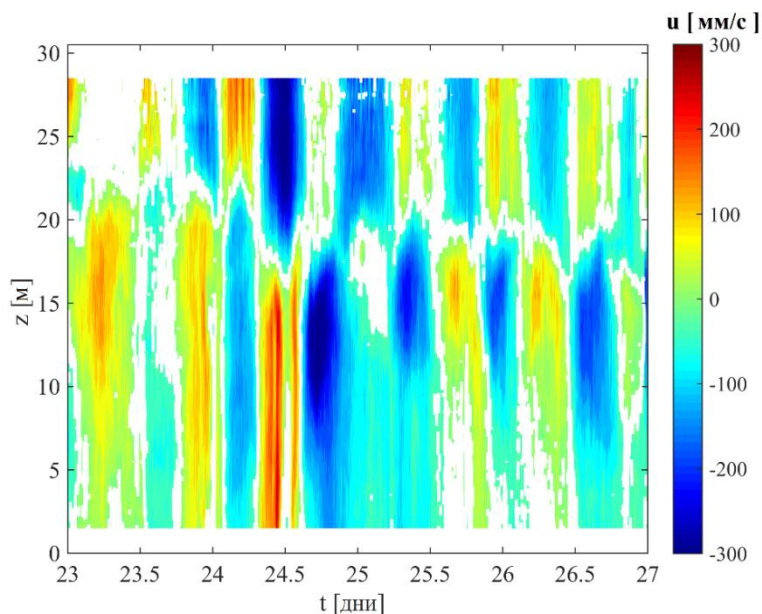
### Данные наблюдений

В нашем распоряжении имеются данные двух компонент скорости течений, которые были измерены в период с 2004 по 2010 гг. с помощью прибора ADCP, установленного в районе со средней глубиной 30 м, временное разрешение данных составляет 3 минуты, вертикальное разрешение равно 1 м. В качестве примера данных наблюдений приведен рис. 1, где показаны вертикальные профили зональной скорости от времени за четыре дня июля 2010 года. Этот месяц был особенно репрезентативным в отношении рассматриваемых процессов.

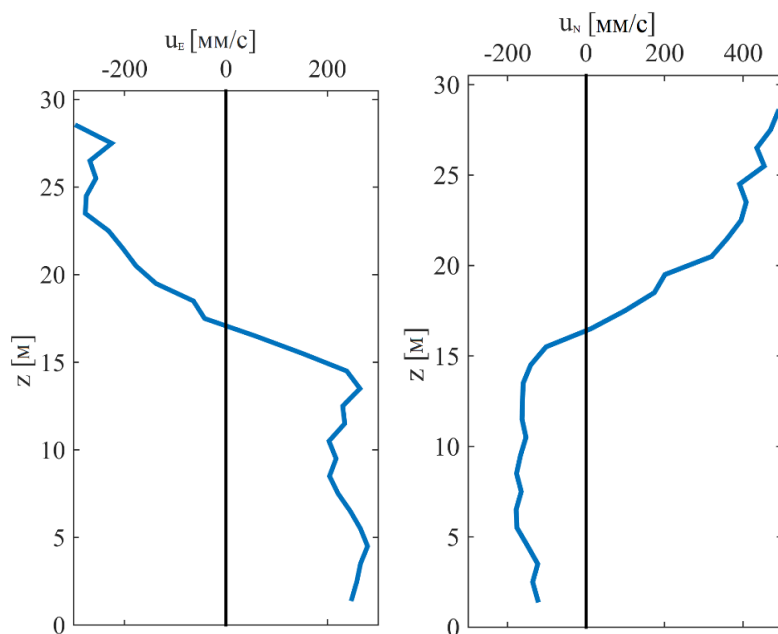
На рис. 1, где показан пример записи профиля горизонтальной скорости течения (восточная компонента) от времени, хорошо видно, во-первых, выраженную неоднородность вертикальной структуры поля скоростей потока, а во-вторых, колебания инерционного масштаба. Меридиональная составляющая здесь не показана, однако наблюдается фазовый сдвиг между двумя составляющими горизонтальной скорости, что также характерно для волн во вращающейся жидкости.

## Вертикальная структура

Вертикальные профили обеих составляющих горизонтальной скорости в фиксированный момент времени иллюстрирует рис. 2. Рис. 1 и 2 показывают, что колебания в верхнем и нижнем слоях воды находятся в противофазе, так как функция вертикальной структуры меняет знак. Такая структура вертикальных профилей скоростей характерна для бароклинных волн низшей моды.



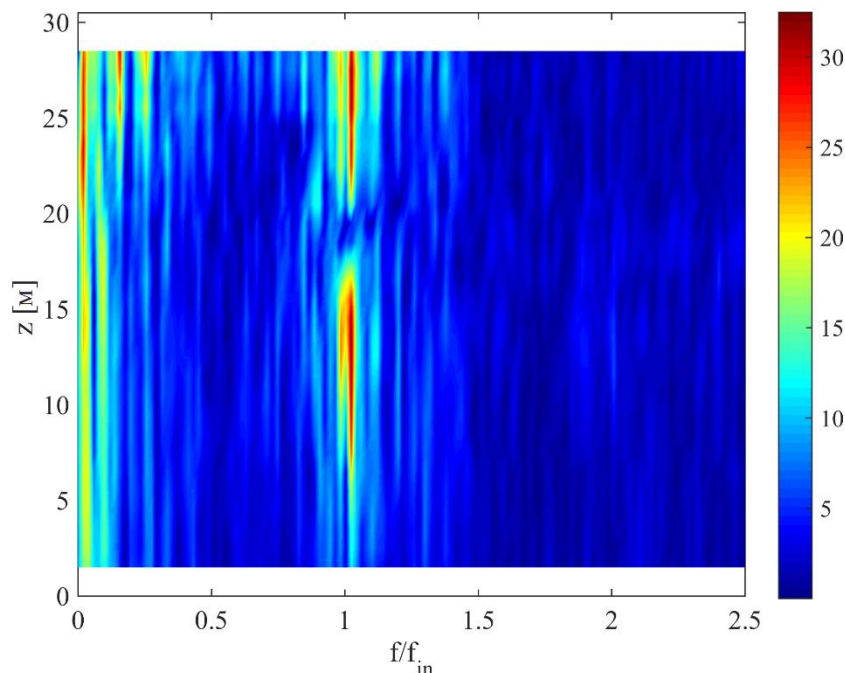
**Рисунок 1. Типичный пример записи профиля горизонтальной скорости течения (восточная компонента) от времени в точке измерения летом (здесь за 23-27 июля 2010 г). Нулевые контуры скорости показаны белыми линиями**



**Рисунок 2. Примеры вертикальных профилей горизонтальной скорости течения (слева – зональная составляющая, справа – меридиональная составляющая) от 24 июля 2010 г)**

## Спектральный анализ записей

Типичные частоты наблюдаемых волн можно оценить по их амплитудному спектру, показанному на рис. 3 (для временных рядов июля 2010 года).



**Рисунок 3. Односторонний амплитудный спектр (мм/с) широтной составляющей горизонтальной скорости в зависимости от вертикальной координаты. Значения амплитуды показаны цветом. Ось частот нормирована на значение инерционной частоты  $f_{in}$  в точке измерений**

Как и ожидалось, наиболее выраженными компонентами волнового поля являются около инерционные волны с частотами, близкими к  $f_{in} = 2\Omega_E \sin\varphi$ , где  $\Omega_E$  – частота вращения Земли,  $\varphi$  – географическая широта Земли, для точки измерений это  $\sim 55^\circ$  с.ш. По вертикали эти колебания локализуются в верхнем слое толщиной около 10 м, а также в 10-метровом слое под пикноклином. Они также заметны в приповерхностном слое, хотя амплитуда пика здесь почти вдвое меньше.

### Вероятностный анализ

Распределение вероятности превышения уровня по вертикальной координате для горизонтальных значений скорости в июле 2010 г показано на рис. 4 отдельно для положительной (на восток) и отрицательной (на запад) компонент скорости течения. Здесь видна существенная асимметрия отрицательных и положительных значений  $u$ , а также заметная вертикальная неоднородность. Наиболее слабые течения наблюдаются в районе пикноклина (на глубинах 11-13 м). Максимальные скорости течения достигаются вблизи поверхности моря, однако скорости вблизи дна сравнимы по величине.

Отметим, что распределение вероятностей для отрицательных скоростей на рис. 4 имеет вертикальную структуру, очень похожую на вертикальное распределение амплитуд вблизи инерционной частоты в спектре на рис. 3. Это говорит о том, что максимальные скорости западных течений обусловлены главным образом инерционными движениями.

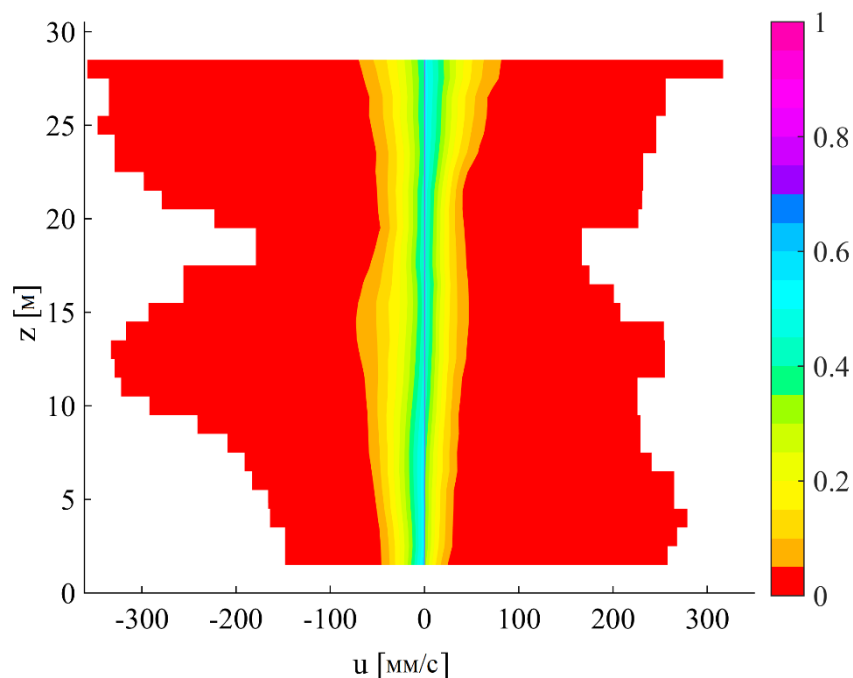
Наблюдаемая меридиональная составляющая поля горизонтальных скоростей имеет сходные особенности.

## Заключение

Измерения горизонтальных профилей скоростей в районе Куршской косы в юго-восточной части Балтийского моря показали, что в летние сезоны 2004-2010 гг. инерционные бароклинные колебания определяют значительную часть энергии стратифицированных течений.

Максимальные скорости инерционных течений составляют 0,3-0,5 м/с, и такие волны можно рассматривать как фактор силового воздействия на морское дно и гидротехнические сооружения. Если говорить об изгибных нагрузках, то определяющими действительно могут быть нагрузки, связанные с движениями, индуцированными бароклинными волнами, которые (для низшей бароклинной моды) имеют противоположное направление выше и ниже пикноклина, и могут иметь еще более сложную вертикальную структуру для высших мод.

Полученные результаты могут быть также использованы для оценки потенциала ресуспендирования и транспорта наносов и процессов эрозии морского дна под действием рассматриваемых течений.



**Рисунок 4. Распределение вероятности превышения уровня (показано цветом) горизонтальной скорости течения (положительные и отрицательные значения соответствуют соответственно восточной и западной компонентам) в июле 2010 г.**

*Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № 0728-2020-0007 «Волновой климат стратифицированного морского шельфа: нелинейные динамические процессы и их влияние на прибрежную зону и гидротехнические сооружения») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2485.2020.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1225.2019.5).*

*Также исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №15-07-20095 и №20-07-20038.*

## Библиографический список

1. **Kim H.R., Ahn S., Kim K.** Observations of highly nonlinear internal solitons generated by near-inertial internal waves off the east coast of Korea // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28(16). P. 3191-3194.
2. **Lappe C., Umlauf L.** Efficient boundary mixing due to near-inertial waves in a nontidal basin: Observations from the Baltic Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. V. 121(11). P. 8287-8304.
3. **Magnell B.A., Ivanov L.I., Govea M.G., Lopez R.V., Molina O.V.** Observations of downward and upward propagating near-inertial waves in the western Gulf Of Mexico // In *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, IEEE*. 2005. P. 2407-2414.
4. **Valipour R., Bouffard D., Boegman L., Rao Y.R.** Near-inertial waves in Lake Erie // *Limnology and Oceanography*. 2015. V. 60(5). P. 1522-1535.
5. **Van der Lee E.M., Umlauf L.** Internal wave mixing in the Baltic Sea: Near-inertial waves in the absence of tides // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. V. 116(C10). Art. No. C10016. DOI:10.1029/2011JC007072.

**M. Kokoulina, L. Talalushkina, E. Rouvinskay, O. Kurkina, A. Kurkin**

### **NEAR-INERTIAL BAROCLINIC WAVES IN THE HORIZONTAL SHEAR FLOW RECORDS IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE BALTIC SEA**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

We present the preliminary analysis of basic properties of stratified sea currents measured near the coast of Curonian Spit in the southeastern part of the Baltic Sea. It is shown that inertial baroclinic oscillations contain a significant part of the energy of stratified currents. The maximum inertial current velocities are  $0.3 - 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and such waves can be considered as a factor of force impact on the sea bottom or hydraulic structures.

**Keywords:** inertial oscillations, internal waves, flow velocity, amplitude spectrum, exceedance probability distribution.



П.В. Лобовиков, Л.В. Талалушкина, О.Е. Куркина, А.Р. Гиниятуллин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БРИЗЕРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАМКАХ ПОЛНОНЕЛИНЕЙНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

В жидкости с квазитрехслойной симметричной стратификацией плотности проведен ряд численных экспериментов по фронтальному взаимодействию бризеров внутренних волн с различными параметрами. Даны оценки количественных характеристик протекающих процессов (амплитудные, энергетические). Продемонстрирован эффект излучения энергии в результате взаимодействия бризеров с различными частотными характеристиками.

**Ключевые слова:** внутренние волны, бризер, уравнения Эйлера, полнонелинейная численная модель.

### Введение

Внутренние уединенные волны-солитоны повсеместно встречаются в мелководных районах океана и отчетливо видны на спутниковых снимках [1]. Однако слабонелинейная теория длинных внутренних волн предполагает существование еще одного типа локализованных решений в рамках уравнений Гарднера и мКдВ, которые обычно привлекаются для описания динамики внутренних волн в слоистом океане. Этими решениями являются длинные нелинейные локализованные волновые пакеты – бризеры [2].

Внутренние бризеры наблюдались в реальном океане. Так, в работе [3] представлены результаты наблюдений бризероподобного волнового пакета вблизи побережья Южной Кореи. Наблюдения подобных волновых пакетов также представлены в книге [4] для Андаманского моря и для Ирландского моря в работе [5].

Однако подтвердить принадлежность этих пакетов к классу бризероподобных волн можно, лишь имея наблюдения в нескольких последовательных точках вдоль трассы распространения этих волн, а такие данные практически отсутствуют. Именно поэтому мотивы и актуальность исследования внутренних бризеров очевидны.

В отличие от внутренних солитонов, существует множество нерешенных задач, связанных с динамикой бризеров. Одна из проблем связана с взаимодействием таких нелинейных пакетов. Целью настоящей работы является исследование динамики взаимодействия бризеров с различными амплитудами в жидкости с квазитрехслойной симметричной стратификацией в рамках полнонелинейной модели, основанной на уравнениях Эйлера. В рамках данного исследования проводится серия численных экспериментов по взаимодействиям типа «бризер-бризер» при различных параметрах волновых пакетов. Оцениваются количественные характеристики протекающих процессов (амплитудные, энергетические). В качестве основного инструмента моделирования используется глобальная модель циркуляции MITgcm.

## Бризеры уравнений КдВ-иерархии

Как известно, бризеры существуют только при определенных типах стратификации жидкости, а какие-либо аналитические решения в виде бризеров в рамках уравнений Эйлера отсутствуют. В то же время, данная проблема достаточно легко решается в рамках слабонелинейной теории длинных внутренних волн [6, 7], согласно которой одномодовое волновое поле представляется в виде следующего ряда:

$$\zeta(z, x, t) = \eta(x, t)\Phi(z) + \eta^2(x, t)T_n(z) \quad (1)$$

Здесь функция  $\eta(x, t)$  описывает волновые характеристики вдоль оси распространения и ее эволюцию во времени. Вертикальная структура волнового поля определяется функцией  $\Phi(z)$  (модовая функция или вертикальная бароклинная мода), которая находится как решение задачи Штурма-Лиувилля:

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c^2}\Phi = 0, \quad \Phi(0) = \Phi(-H) = 0, \Phi_{\max} = \Phi(z_{\max}) = 1. \quad (2)$$

Нелинейная поправка  $T_n(z)$  в свою очередь находится как решение неоднородной краевой задачи:

$$\frac{d^2T_n}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2}T_n = -\frac{\alpha}{c} \frac{d^2\Phi}{dz^2} + \frac{3}{2} \frac{d}{dz} \left[ \left( \frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right], \quad T_n(0) = T_n(-H) = 0 \quad (3)$$

Волновая функция  $\eta(x, t)$ , как правило, является решением уравнений так называемой «КдВ-иерархии». Одним из таких уравнений является модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза [8, 9], которое обычно фигурирует в задачах с симметричной стратификацией:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha_1 \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0. \quad (4)$$

где  $c$  – фазовая скорость распространения волны, определяемая как собственное значение задачи (2),  $\alpha_1$  – коэффициент кубической нелинейности,  $\beta$  – коэффициент дисперсии [6].

При положительном коэффициенте кубической нелинейности  $\alpha_1$ , уравнение мКдВ имеет бризерное решение [10]:

$$\frac{\eta(x, t)}{A_0} = -4a \operatorname{sech} \theta \cdot \left[ \frac{\cos \varphi + (a/b) \sin \varphi \cdot \tanh \varphi}{1 + (a/b)^2 \sin^2 \varphi \cdot \operatorname{sech}^2 \varphi} \right] \quad (5)$$

где

$$\theta = -2b \frac{x}{\xi} - 8b(b^2 - 3a^2) \frac{t}{\tau} + \theta_0, \quad \varphi = 2a \frac{x}{\xi} + 8a(3b^2 - a^2) \frac{t}{\tau} + \varphi_0,$$

$$\xi = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}, \quad \tau = \left( \frac{6}{\alpha_1} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{\beta}}{A_0^3},$$

$a$  и  $b$  – произвольные параметры,  $\theta_0$  и  $\varphi_0$  – фазовые сдвиги. Параметр  $b$  влияет на количество волн в волновом пакете, параметр  $a$  определяет величину амплитуды бризера.

## Инициализация модели и начальные данные

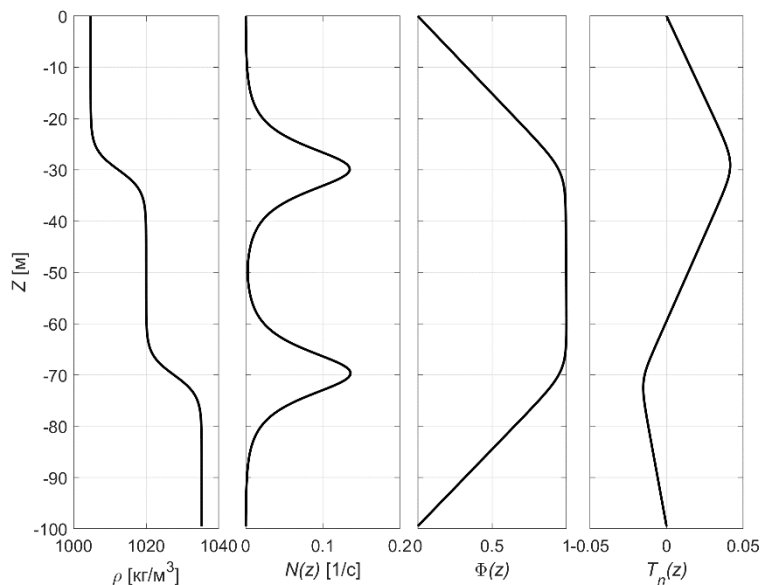
В качестве инструмента для моделирования процессов взаимодействия внутренних бризеров в данной работе был задействован программный комплекс MITgcm, океаническая часть которой основывается на трехмерных уравнениях Навье-Стокса гидродинамики несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска с учетом силы Кориолиса. Однако, вязкие члены могут быть отключены в вычислительном комплексе, и тогда все решения получаются в рамках уравнений Эйлера. Именно эта модификация комплекса MITgcm используется в данной работе.

В качестве модельной была выбрана квазитрехслойная симметричная стратификация плотности жидкости, определяемая следующим выражением:

$$\rho(z) = \rho_0 - \Delta\rho_1 \tanh\left(\frac{z - z_{pyc1}}{d_{pyc1}}\right) - \Delta\rho_2 \tanh\left(\frac{z - z_{pyc2}}{d_{pyc2}}\right), \quad (16)$$

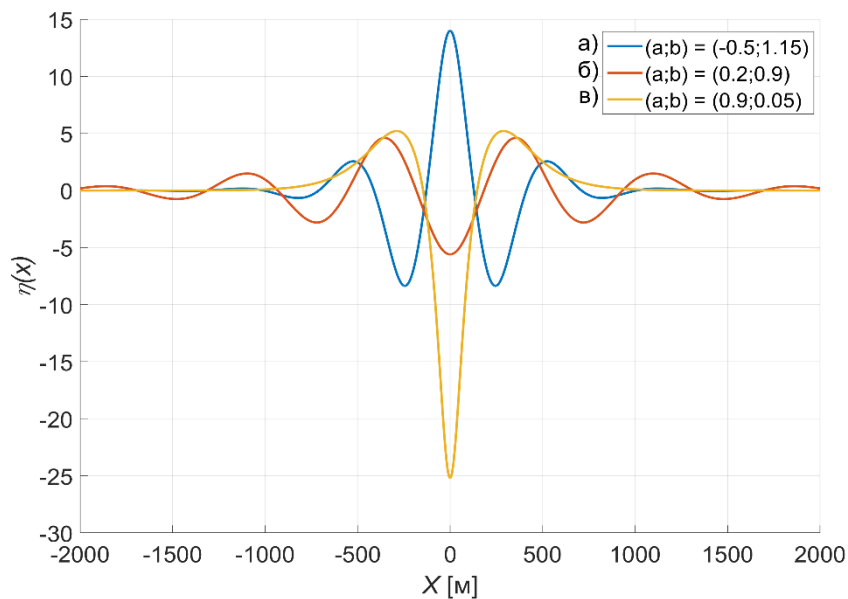
где  $\rho_0 = 1020 \text{ кг/м}^3$  – среднее значение плотности,  $\Delta\rho_1 = 5 \text{ кг/м}^3$ ,  $\Delta\rho_2 = 5 \text{ кг/м}^3$  – скачок плотности на верхнем и нижнем пикноклинах соответственно,  $z_{pyc1} = -30 \text{ м}$ ,  $z_{pyc2} = -70 \text{ м}$  – глубины залегания пикноклинов,  $d_{pyc1} = d_{pyc2} = 4 \text{ м}$  – характерная полуширина пикноклинов. Полная глубина жидкости принималась равной  $H = 100 \text{ м}$ .

Для выбранной стратификации были решены соответствующие задачи (2), (3) На рис. 1 представлен вид первой модовой функции  $\Phi(z)$ , нелинейной к ней поправки  $T_n(z)$ , частоты Вайселя-Брента и профиля плотности для выбранных условий.



**Рисунок 1. Слева направо – стратификация плотности жидкости; частота Вайселя-Брента; низшая вертикальная мода; нелинейная поправка к моде**

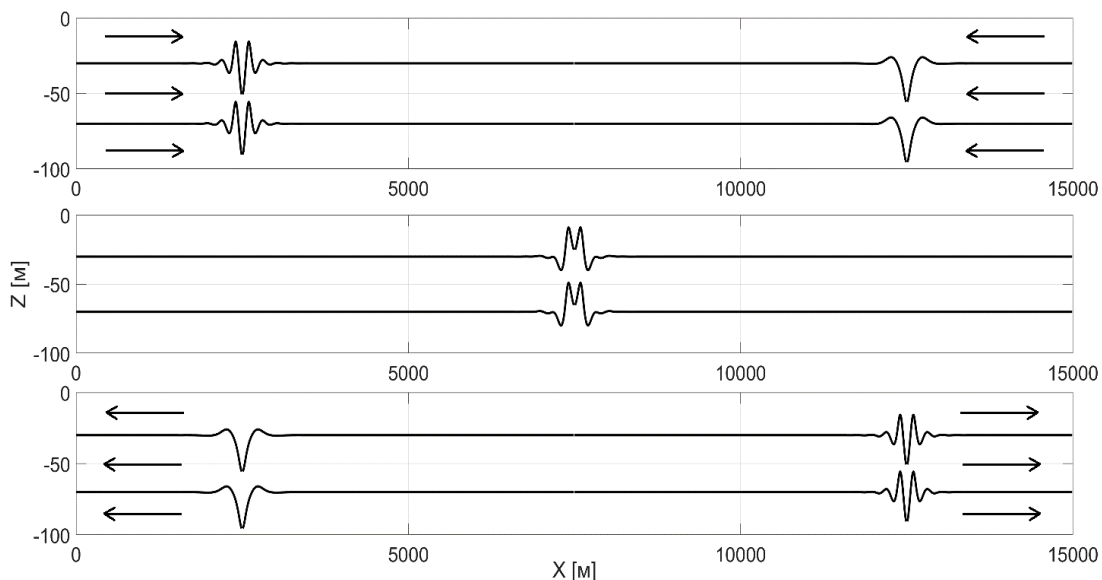
Для получения квазистационарных полнонелинейных бризеров была использована итерационная процедура, описанная в [11]. В качестве начальных условий для данной процедуры были выбраны 3 бризера мКдВ (5) с различными параметрами также из работы [11]. Формы начальных бризеров приведены на рис. 2.



**Рисунок 2. Форма начальных бризеров уравнения мКдВ (5)**

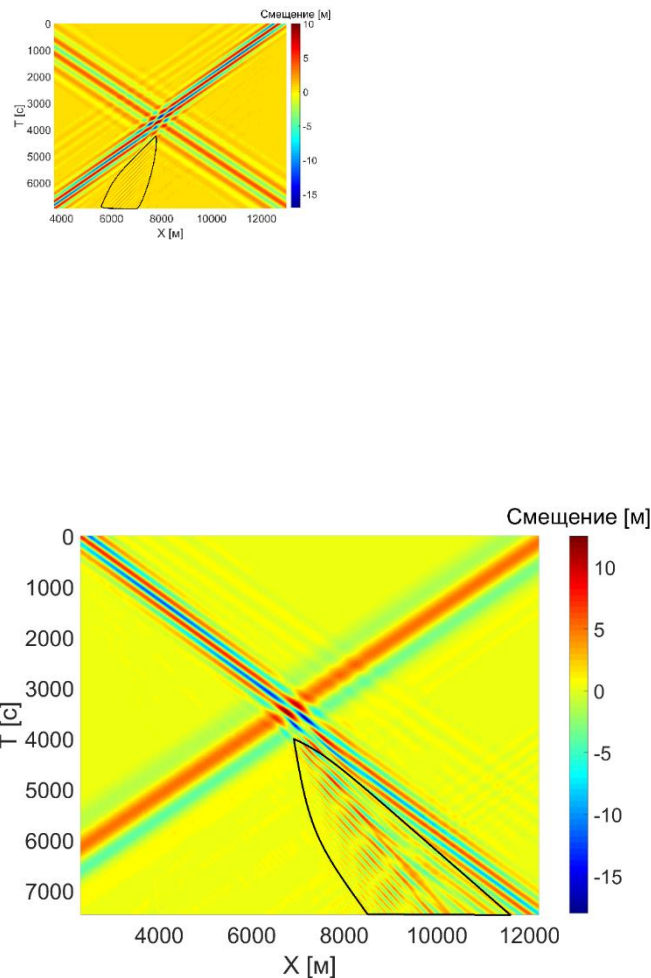
### **Встречное взаимодействие внутренних бризеров**

Результаты численного моделирования показали, что в полнонелинейной модели бризеры с идентичными параметрами взаимодействуют практически упруго (в пределах точности численной схемы), излучения энергии в результате столкновения не наблюдается. Однако, в случае с бризерами с различными частотными характеристиками в результате столкновения наблюдается формирование дисперсионных хвостов и излучение энергии. На рис. 3 показана схема численных экспериментов по взаимодействию бризеров с различными параметрами.



**Рисунок 3. Схема задачи по встречному взаимодействию полнонелинейных бризеров с различными параметрами**

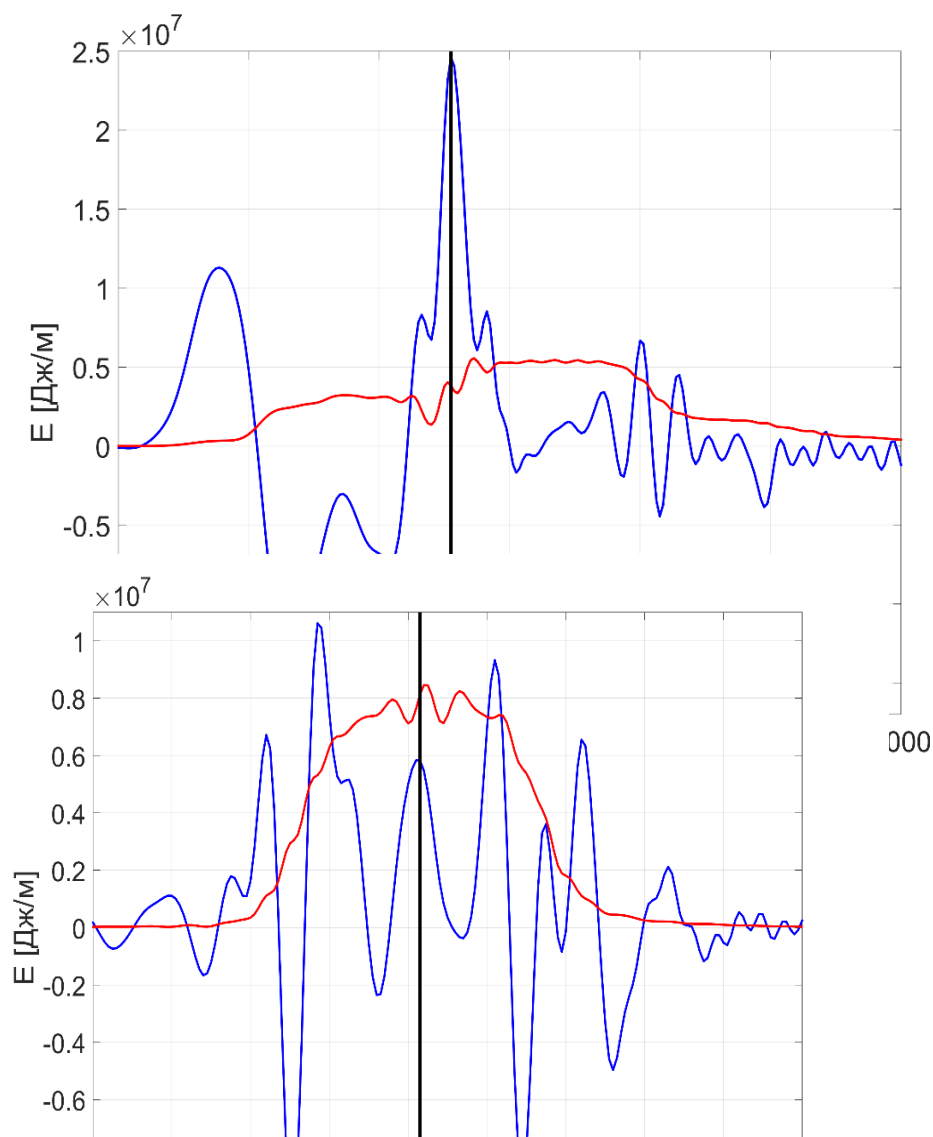
На рис. 4 приведены пространственно-временные диаграммы процессов взаимодействия полнонелинейного бризера (а) с бризерами (б) и (в) для смещения верхнего пикноклина. На приведенных иллюстрациях можно видеть, что происходит неупругое столкновение волновых пакетов, и наблюдается излучение энергии в виде дисперсионных хвостов (данные области отмечены черными линиями). После взаимодействия у обоих волновых пакетов наблюдается небольшой сдвиг фаз.



**Рисунок 4. Пространственно-временные диаграммы процессов взаимодействия полнонелинейного бризера (а) с бризерами (б) и (в).**

**Черными линиями отмечены области с дисперсионными хвостами**

На рис. 5 представлено изменение доступной потенциальной [12] (синие линии) и кинетической (красные линии) энергий в области  $(x, z) \in [7000 \text{ м}; 9000 \text{ м}] \times [-100 \text{ м}; 0 \text{ м}]$ , расположенной в центре исследуемого бассейна, для данных экспериментов. На приведенных иллюстрациях видно, как изменяются значения энергий, сосредоточенных в исследуемой области, по мере столкновения бризеров. После того, как бризеры, участвующие в процессе соударения, покидают исследуемую область, в полях кинетической и потенциальной энергий можно наблюдать формирование мелкомасштабных волн.



**Рисунок 5. Изменение доступной потенциальной и кинетической энергий в области, расположенной в центре исследуемого бассейна. Черными линиями показаны моменты взаимодействия бризеров**

### Заключение

В рамках настоящей работы был проведен ряд полномасштабных численных экспериментов по генерации полнонелинейных бризеров в трехслойной жидкости с симметричной стратификацией плотности и их взаимодействию друг с другом и с твердой стенкой. Проведены количественные (амплитудные и энергетические) оценки протекающих процессов. Показано, что при столкновении бризеров с различным спектральным составом происходит излучение энергии в виде дисперсионных хвостов. При столкновении бризеров с одинаковыми параметрами излучения энергии не наблюдается.

*Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК-218.2020.5.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

## Библиографический список

1. **Jackson, C.R. and Apel, J.R.** “An atlas of internal solitary-like waves and their properties”, *Global Ocean Associates*, 2004.-Alexandria, VA, 2nd ed. Global Ocean Associates, 560 p.
2. **Pelinovsky, D. and Grimshaw, R.** “Structural transformation of eigenvalues for a perturbed algebraic soliton potential”, *Phys. Lett. A*, 1997.-№229, P.165-172.
3. **Lee, J.H., Lozovatsky, I., Jang, S.-T., Jang, Ch.J., Hong, Ch.S., and Fernando, H.J.S.** “Episodes of nonlinear internal waves in the northern East China Sea”, *Geoph. Res. Letters*, 2006.-№33, L18601.
4. **Osborne, A.R.** “Internal waves and solitons”, *Internat. Geophys.*, 2010.-№97(C), P.597-622.
5. **Vlasenko, V., Stashchuk, N., Inall, M. and Hopkins, J.** “Tidal energy conversion in a global hotspot: on the 3D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break”, *J. Geophys. Res. – Oceans*, 2014. - №119, P.3249-3265
6. **Pelinovsky, E., Polukhina O., Slunyaev A., Talipova T.** Internal solitary waves // Chapter 4 in the book “Solitary Waves in Fluids”. WIT Press. Southampton, Boston. 2007. P. 85 – 110.
7. **Grimshaw, R., Talipova T., Pelinovsky E., Kurkina O.** Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration. // *Nonlin. Processes Geophys.* 2010. V. 17. P. 633 – 649.
8. **Grimshaw, R., Pelinovsky E., Talipova T.** The modified Korteweg–de Vries equation in the theory of the large–amplitude internal waves. // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 1997. V. 4. P.237–250.
9. **Талипова, Т.Г.** Влияние кубической нелинейности на трансформацию интенсивных внутренних волн / Т.Г. Талипова [и др.] // Доклады АН. 1999. Т. 364. № 6. С. 824 – 827.
10. **J. L. Lamb.** Elements of Soliton Theory, John Wiley & Sons, New York, 1980.
11. **Лобовиков, П.В.** Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости / П.В. Лобовиков [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 182-193.
12. **Shroyer, E.L., Moum J.N., Nash J.D.** Energy transformation and dissipation of nonlinear internal waves over New Jersey’s continental shelf // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2010 b. V.17. P. 345–360.

**P.V. Lobovikov, L.V. Talaluskina, O.E. Kurkina, A.R. Giniyatullin**

### **INVESTIGATION OF THE INTERACTION PROCESSES OF INTERNAL BREATHERS WITHIN A FULLY NONLINEAR NUMERICAL MODEL**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

In a fluid with a quasi-three-layer symmetric density stratification, a series of numerical experiments on the frontal interaction of internal wave breathers with various parameters has been performed. Estimates of the quantitative characteristics of the ongoing processes (amplitude, energy) are given. The effect of energy radiation as a result of the interaction of breathers with different frequency characteristics is demonstrated.

**Keywords:** internal waves, breather, Euler equations, fully nonlinear numerical model.

Т.Е. Моисеенко, А.А. Куркин, О.Е. Куркина

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЯПОНСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Создана постоянно пополняемая база данных, содержащая сведения о 2962 зарегистрированных проявлениях внутренних волн в Мировом океане из 802 литературных источников за период с 1950 по 2019 гг. В данной работе представлен анализ 44 записей, отображающих характеристики внутренних волн, в Японском море. Также приведены примеры изображений, показывающие регистрацию наблюдений вблизи мыса Шульца, Амурского пролива и городов Южной Кореи: Донхэ и Ульсана. В дальнейшем планируется расширить функционал имеющейся базы данных путем интеграции цифрового атласа наблюдений внутренних волн в онлайн-проект IGW Atlas.

**Ключевые слова:** цифровой атлас наблюдений, внутренние волны, Мировой океан, база данных, IGW Atlas, Японское море.

### Введение

Факт, что внутренние волны в Мировом океане являются актуальным объектом научного исследования, неоспорим. Они оказывают существенное влияние на хозяйственную деятельность человека, связанную с добычей природных ресурсов на морских и океанских шельфах. Также внутренние волны могут представлять собой серьезный фактор воздействия на основания платформ и подводные части гидротехнических сооружений (судоподъемники, судоходные шлюзы, нефтедобывающие платформы и пр.). Поэтому необходимость сбора и анализа информации о зарегистрированных проявлениях внутренних волн достаточно обоснована.

В созданной базе данных [1, 2] обобщены сведения о наблюдениях внутренних волн в Мировом океане за период с 1950 по 2019 гг., что обеспечивает удобный инструмент для дальнейшей работы с ними. С помощью веб-приложения IGW Atlas [3] конечный пользователь может взаимодействовать с базой данных. Этот онлайн-проект содержит информацию о наблюдениях внутренних волн, основанных на данных, полученных путем дистанционного зондирования и прямых контактных измерений, в различных акваториях Мирового океана. Зачастую эти данные не имеют подробного описания или содержат информацию в неявном виде. К тому же любая база данных содержит именно набор данных, а их анализ должен осуществляться конечным пользователем, что требует определенных знаний в данной области и сопряжено с существенными временными затратами. Поэтому и возникла потребность в создании цифрового атласа, на экспертном уровне обобщающего сведения, содержащиеся в базе данных, и визуализирующего проанализированные характеристики.



## Анализ записей наблюдений внутренних волн в Японском море

Из названного ранее конечному пользователю необходимо проанализировать большой объем данных, чтобы получить представление о характеристиках внутренних волн, таких как амплитуда, период, мода, полярность и прочие [4]. В разрабатываемом цифровом атласе содержится следующая информация: название источника, географические координаты записи, анализируемое поле, тип внутренней волны, её мода, амплитуда, период, полярность, а также дата проводимого наблюдения.

В случае отсутствия полного анализа записи наблюдений в источнике оценка характеристик внутренних волн производится следующим образом: для начала определяется мода, затем – тип внутренней волны по форме и длительности, после чего амплитуда и период. Далее, исходя из данных о моде внутренней волны, определяется ее полярность.

В качестве анализируемой акватории было выбрано Японское море [5], поскольку здесь находятся крупнейшие морские порты России, угольные, нефтеналивные терминалы. Наблюдения внутренних волн в данной акватории зарегистрированы в основном в трех локациях: на гидрофизическом полигоне «МЭС Шульца» вблизи мыса Шульца, около Амурского пролива и городов Южной Кореи Донхэ и Ульсана. В течение длительного времени производилось непрерывное измерение полей температуры, позволяющее дать качественное описание динамики внутренних волн и выделить их характерные особенности [6].

На сегодняшний день цифровой атлас содержит 44 записей наблюдений внутренних волн на шельфе Японского моря. Анализ проводится по аналогии с процессом, описанным в статье [7]. Имеются в распоряжении прямые измерения внутренних волн только первой моды вблизи мыса Шульца – 32 записи (табл. 1) и на шельфе восточного побережья Южной Кореи – 5 записей (табл. 3), тогда как в районе Амурского пролива (табл. 2) 6 записей первой моды и одна – второй. Все данные были извлечены из изображений записей внутренних волн, анализируемым полем которых является температура.

*Таблица 1*

Данные из литературных источников по наблюдениям внутренних волн вблизи мыса Шульца (42.55 с.ш., 131.1 в.д.) [6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]

№	Мода	Тип	Амплитуда, м	Период, ч	Полярность	Дата
1	1	Цуги КВВ	5	0.5	положительная	09.09.2011
2	1	Цуги КВВ	4	0.58	положительная	09.09.2011
3	1	Цуги КВВ	4	0.33	положительная	11.09.2011
4	1	Цуги КВВ	2	0.25	положительная	11.09.2011
5	1	Цуги КВВ	4	0.5	положительная	11.09.2011
6	1	Цуги КВВ	4	0.58	положительная	11.09.2011
7	1	Цуги КВВ	9	0.21	положительная	08.09.2011
8	1	Цуги КВВ	8	0.21	положительная	08.09.2011
9	1	Цуги КВВ	9	0.45	положительная	08.09.2011
10	1	Цуги КВВ	5	0.16	положительная	08.09.2011
11	1	Цуги КВВ	6	0.13	положительная	08.09.2011
12	1	Цуги КВВ	6	0.14	положительная	08.09.2011
13	1	Цуги КВВ	7	0.1	положительная	09.09.2011
14	1	Цуги КВВ	8	0.18	положительная	10.09.2011
15	1	Цуги КВВ	17	0.41	отрицательная	Август 2011

Окончание табл. 1

16	1	Цуги КВВ	9	0.1	отрицательная	Август 2011
17	1	Цуги КВВ	3	0.33	положительная	Сентябрь 2009
18	1	ДВ	8	12	положительная	Сентябрь 2009
19	1	Цуги КВВ	10	0.25	положительная	12.10.2011
20	1	ДВ	25	7	положительная	12.10.2011-20.10.2011
			Амплитуда, °С			
21	1	ДВ	1	12	положительная	29.05.2007-01.06.2007
22	1	ДВ	5	23	положительная	11.10.2007-12.10.2007
23	1	Цуги КВВ	5	0.25	положительная	20.10.2008
24	1	Цуги КВВ	8	0.41	отрицательная	13.10.2007
25	1	Цуги КВВ	4	0.5	отрицательная	18.10.2008-19.10.2008
26	1	ДВ	5	8	отрицательная	12.05.2009-16.05.2009
27	1	ВБ	9	-	-	19.10.2012
28	1	ВБ	7	-	-	21.10.2013
29	1	ДВ	17	24	отрицательная	04.09.2011-11.09.2011
30	1	ДВ	8	17	отрицательная	24.09.2011-06.10.2011
31	1	ДВ	8	15	отрицательная	07.09.2011-08.09.2011
32	1	Цуги КВВ	6	0.1	отрицательная	09.09.2011

Таблица 2

Данные из литературных источников по наблюдениям внутренних волн вблизи Амурского пролива (42.8 с.ш., 131.8в.д.) [15, 16]

№	Мода	Тип	Амплитуда, м	Период, ч	Полярность	Дата
1	1	Цуги КВВ	10	0.08	положительная	Октябрь 2012
2	1	Цуги КВВ	7	0.16	положительная	Октябрь 2013
3	1	Цуги КВВ	8	0.33	положительная	Октябрь 2013
4	1	Цуги КВВ	5	2	положительная	Сентябрь 2011
5	1	Цуги КВВ	6	1	положительная	01.09.2011
6	1	Цуги КВВ	5	6	положительная	Сентябрь 2011
7	2	Цуги КВВ	3	1	выпуклая	Сентябрь 2011

Таблица 3

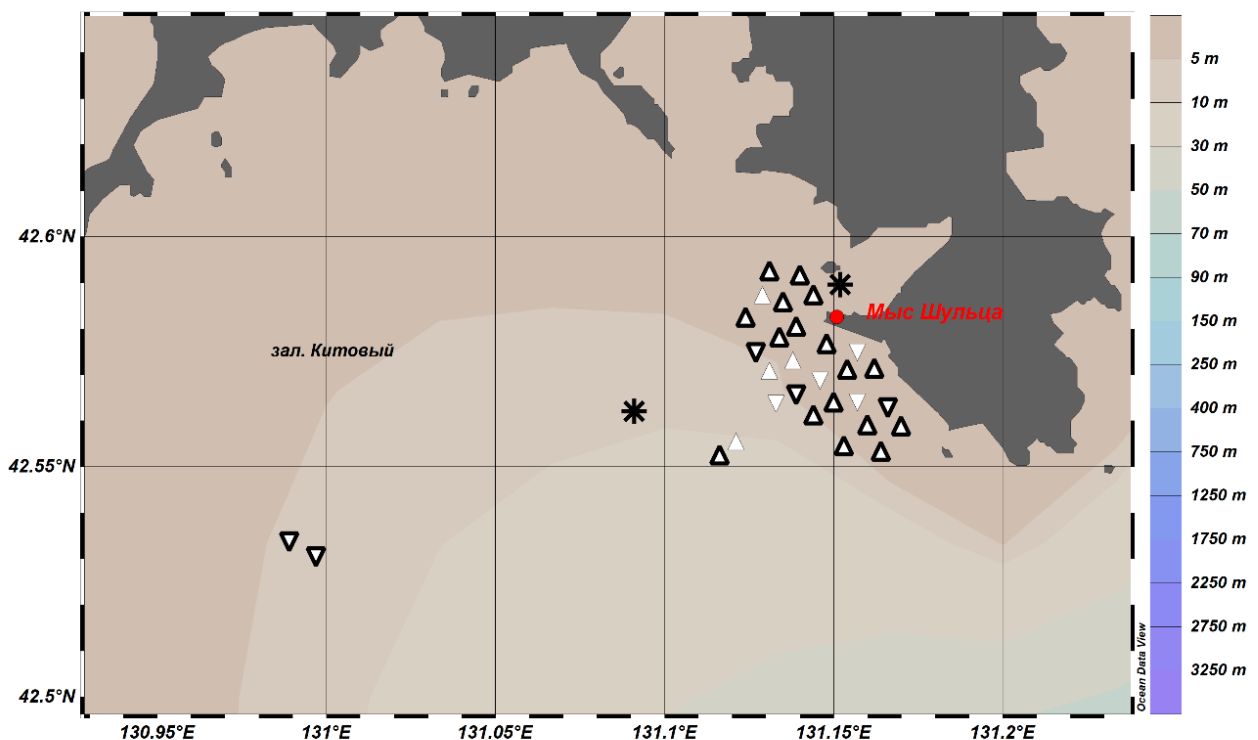
Данные из литературных источников по наблюдениям внутренних волн вблизи городов Южной Кореи (37с.ш., 130в.д.) [17, 18, 19]

№	Мода	Тип	Амплитуда, м	Период, ч	Полярность	Дата
1	1	ДВ	60	13	положительная	01.09.2012-02.09.2012
2	1	ДВ	40	12	положительная	06.09.2012-07.09.2012
3	1	Цуги КВВ	21	0.33	отрицательная	12.05.1999-14.05.1999
4	1	Цуги КВВ	20	0.16	отрицательная	12.05.1999-14.05.1999
5	1	Цуги КВВ	30	0.33	положительная	12.05.2004

По результатам проведенного анализа наблюдения разделились по типам внутренних волн следующим образом: длинные волны (ДВ) – 10 наблюдений, цуги короткопериодных внутренних волн (цуги КВВ) – 32 наблюдения и внутренний бор (ВБ) – 2 наблюдения. В данной

акватории преобладают волны первой моды (43 наблюдения), большее количество которых имеет положительную полярность (30). Единственная наблюдавшаяся волна второй моды является выпуклой. Стоит отметить, что отрицательная и положительная полярность присуща волнам первой моды, в то время как выпуклость и вогнутость характерны для волн второй моды. Длинные волны имеют период от одного часа до суток, короткопериодные волны – от 5 до 35 минут, внутренний бор не периодичен. В ходе анализа было выявлено 12 записей, для которых невозможно восстановить поле смещений изолиний температуры/плотности по полю температуры, так как в источниках не содержится гидрологических данных, позволяющих вычислить вертикальные градиенты указанных полей, поэтому амплитуды оставлены в исходной размерности для температуры.

Ниже представлены изображения регистрации наблюдений внутренних волн в Мировом океане, выполненные с помощью Ocean Data View [20] (рис.1-3). Длинные волны обозначаются пиктограммами без контура, цуги короткопериодных внутренних волн имеют широкий контур, а внутренний бор обозначен звездочкой. Светлыми маркерами изображены наблюдения внутренних волн первой моды, а темным – второй моды. Наблюдения волн отрицательной полярности отмечены светлым треугольником, направленным вниз, положительной – направленным вверх. Темным треугольником, направленным вверх, изображены выпуклые внутренние волны второй моды.



**Рисунок 1. Визуализация зарегистрированных проявлений внутренних волн и их характеристик вблизи мыса Шульца**

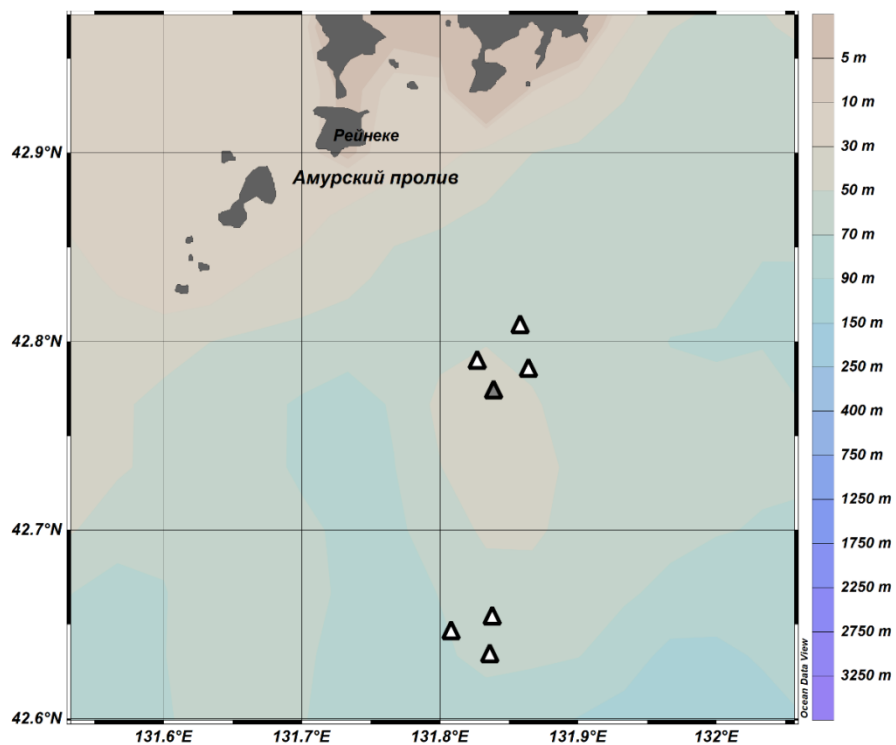


Рисунок 2. Визуализация зарегистрированных проявлений внутренних волн и их характеристик вблизи Амурского пролива

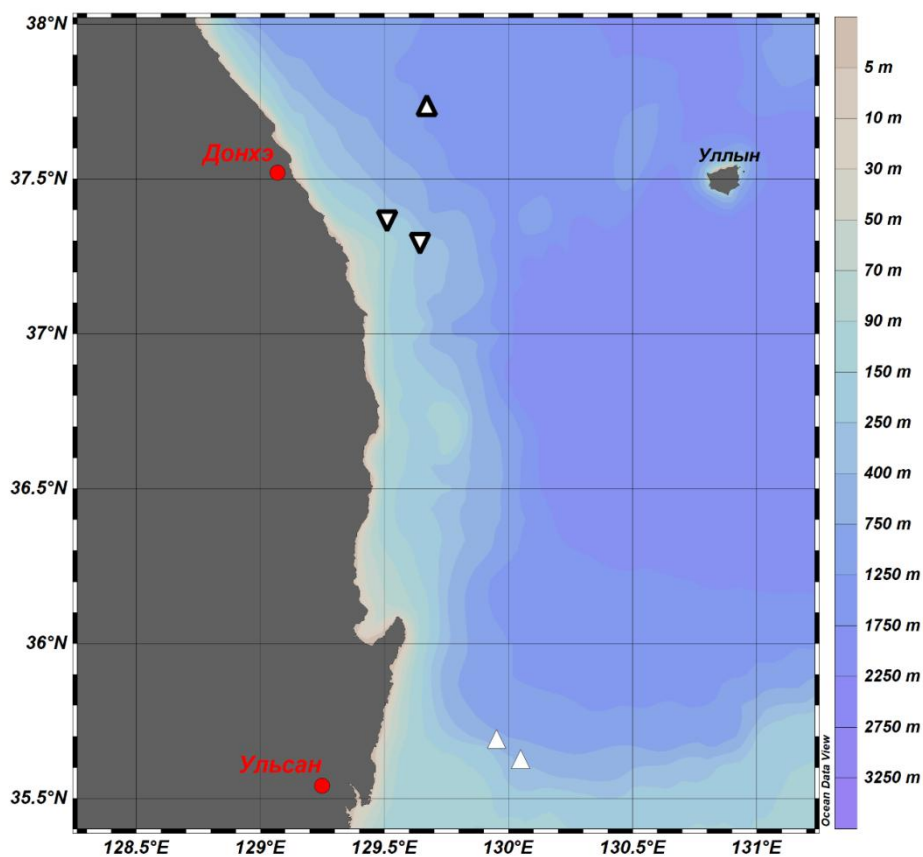


Рисунок 3. Визуализация зарегистрированных проявлений внутренних волн и их характеристик вблизи побережья Южной Кореи

## Заключение

На сегодняшний день непрерывно пополняемая база данных внутренних волн в Мировом океане содержит 2962 наблюдения. Из имеющихся в ней записей были проанализированы 44, относящиеся к акваториям Японского моря. На ее основе была создана начальная версия цифрового атласа, которую планируется интегрировать в онлайн-проект IGW Atlas. Цифровой атлас позволит конечному пользователю получить точные сведения о характеристиках зарегистрированных проявлений внутренних волн в Мировом океане.

*Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № 0728-2020-0007 «Волновой климат стратифицированного морского шельфа: нелинейные динамические процессы и их влияние на прибрежную зону и гидротехнические сооружения») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2485.2020.5.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

## Библиографический список

1. **Епифанова, А.С.** База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А.С. Епифанова, А.В. Рыбин, Т.Е. Моисеенко, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, Д.Ю. Тюгин // Морской гидрофизический журнал. - 2019. - Т. 35, - №. 4. - С. 395–403. - DOI: 10.22449/0233-7584-2019-4-395-403.
2. **Епифанова, А.С.** Мониторинг внутренних волн в мировом океане с использованием базы данных / А.С. Епифанова, А.В. Рыбин, Т.Е. Моисеенко, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // Сборник трудов Международной научно технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2019. – Н. Новгород: НГТУ, 2019. С. 964-968.
3. **Рыбин, А.В.** Программный комплекс для работы с данными наблюдений интенсивных внутренних волн и результатами инструментальных измерений стратификации плотности вод в мировом океане / А.В. Рыбин, Д.Ю. Тюгин, Е.А. Рувинская, С.В. Крылов, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660337. от 29 сентября 2015 г.
4. **Кокоулина, М.В.** Статистическая обработка данных внутренних волн в охотском море / М.В. Кокоулина, Л.В. Талалушкина, А.Р. Гиниятуллин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // Материалы международной научно-технической конференции ИСТ-2019.
5. **Yaroshchuk, I.O.** On intense internal waves in the coastal zone of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan) / I.O. Yaroshchuk, A.P. Leont'ev, A.V. Kosheleva, A.A. Pivovarov, A.N. Samchenko, D.V. Stepanov, A.N. Shvyryov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. –V.41. - №.9. –P.629-634. – DOI: 10.3103%2Fs1068373916090053.
6. **Кукарин, В.Ф.** Эволюция внутренних волн большой амплитуды в зоне заплеска / В.Ф. Кукарин, В.Ю. Ляпидевский, В.В. Навроцкий, Ф.Ф. Храпченков // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2013. –Т.6. - №.2. –С.35-45.

7. **Епифанова, А.С.** О разработке цифрового атласа наблюдений внутренних волн в мировом океане / А. С.Епифанова, А.А.Куркин, О.Е.Куркина, Т.Е. Моисеенко, А.В. Рыбин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – Т.4. - №.127.
8. **Kokoulina, M.V.** Statistics of field data on internal waves / M.V. Kokoulina, O.E. Kurkina, E.A. Ruvinskaya, A.A. Kurkin, A.R. Giniyatullin // The Fourteenth MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation. - 2019. - P.733-743.
9. **Liapidevskii, V.Y.** Internal wave bore in the shelf zone of the sea / V.Y. Liapidevskii, V.V. Novotryasov, F.F. Khrapchenkov, I.O. Yaroshchuk// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2017. – V.58. - №.5. – P.809–818. - DOI:10.1134/s0021894417050066.
10. **Макаренко Н.И.** Пакеты нелинейных внутренних волн в шельфовой зоне / Н.И. Макаренко, В.Ю. Ляпидевский, Д.С. Денисенко, Д.Е. Кукушкин // Вычислительные технологии. - 2019. - Т.24. - №.2. - С.90–98. - DOI: 10.25743/ICT.2019.24.2.008.
11. **Navrotsky, V.V.** Internal waves and mixing in the shelf zone/ V.V. Navrotsky, V.Yu. Lyapidevsky, E.P. Pavlova, F.F. Khrapchenkov // Izv. TINRO. 2010. - №.162. - P.324-337.
12. **Rutenko, A.N.** The influence of internal waves on losses during sound propagation on a shelf/ A.N. Rutenko // Acoustical Physics. – 2010. – V.56. - №.5. - P.703–713. -DOI: 10.1134/s1063771010050179.
13. **Samchenko, A.N.** Internal gravity waves in the coastal zone of the Sea of Japan according to the natural observations/ A.N. Samchenko, I.O. Yaroshchuk, A.V. Kosheleva // Regional Studies in Marine Science. -2018. – V.18. - P.156–160.– DOI: 10.1016/j.rsma.2018.02.004.
14. **Yaroshchuk, I.O.** Experimental researches of internal waves in the coastal zone of the Japanese sea / I.O.Yaroshchuk, A.P.Leontyev, A.V. Kosheleva, A.N. Samchenko, A.A. Pivovarov, F.F. Khrapchenkov, A.N. Shvyrev, E.I. Yaroshchuk // Underwater research and robotics. - 2013. – V.1. - №.15. - P.37-44.
15. **Dolgikh, G.I.** Intense Undular Bores on the Autumn Pycnocline of Shelf Waters of the Peter the Great Bay (Sea of Japan) / G.I. Dolgikh, V.V. Novotryasov, I.O. Yaroshchuk, M.S. Permyakov // Doklady Earth Sciences. - 2018. – V.479. - №.1. - P.379–383.– DOI: 10.1134/s1028334x18030157.
16. **Navrotsky, V.V.** Internal waves and their biological effects offshore / V.V. Navrotsky, E.P. Pavlova, V.Yu. Lyapidevsky // Vestnik DVO RAN. -2011. –V.6. - P.22-31.
17. **Jeon, C.** Seasonal variation of semidiurnal internal tides in the East/Japan Sea / C. Jeon, J.-H. Park, S.M. Varlamov, J.-H. Yoon, Y.H. Kim, S. Seo, Y.-G. Park, H.S. Min, J.H. Lee, C.-H. Kim // Journal of Geophysical Research: Oceans. -2014. – V.119. - №.5. - P.2843–2859. – DOI: 10.1002/2014jc009864.
18. **Kim, H.R.** Observations of highly nonlinear internal solitons generated by near-inertial internal waves off the east coast of Korea / H.R. Kim, S. Ahn, K. Kim // Geophysical Research Letters. -2001. – V.28. - №.16. - P.3191–3194.– DOI: 10.1029/2001gl013130.
19. **Kim, K.** Long-term and real-time monitoring system of the East/Japan sea / K. Kim, Y.B. Kim, J.J. Park, S. Nam, K.-A. Park, K.-I. Chang // Ocean Science Journal. -2005. – V.40. -№.1. - P.25–44. –DOI: 10.1007/bf03023463.
20. **Schlitzer, R.** Ocean Data View [Сайт]. – Режим доступа: <https://odv.awi.de> (дата обращения 12.02.2020).

**T.E. Moiseenko, A.A. Kurkin, O.E. Kurkina**

**CHARACTERISTICS OF INTERNAL WAVES IN THE JAPANESE SEA ACCORDING  
TO OBSERVATION DATA**

Nizhny Novgorod state technical university R.E. Alekseeva

A constantly updated database has been created containing information on 2962 recorded manifestations of internal waves in the World Ocean from 802 literature sources for the period from 1950 to 2019. This paper presents an analysis of 44 records reflecting the characteristics of internal waves in the Sea of Japan. Examples of images are also showing the recording of observations near Cape Shults, the Amur Strait and the cities of South Korea: Donghae and Ulsan. In the future, it is planned to expand the functionality of the existing database by integrating a digital atlas of observations of internal waves in the online project IGW Atlas.

**Key words:** digital atlas of observations, internal waves, World Ocean, database, IGW Atlas, Sea of Japan.

Е.В. Посыпкина, С.А. Чекалова

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ДЕТЕЙ В АМБУЛАТОРНО-ПОЛИКЛИНИЧЕСКОЙ СЛУЖБЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе рассматривается программный комплекс для комплексной оценки состояния здоровья детей в амбулаторно-поликлинической службе. Разрабатываемая программа должна представлять собой программное средство для упрощения работы с большим количеством данных деятельности медицинского учреждения (поликлиники). Данный программный комплекс должен повысить эффективность деятельности медицинского учреждения на основе автоматизации трудоемких операций статистики, обработки и проведения анализа имеющейся информации.

**Ключевые слова:** база данных, программный комплекс.

### Введение

В современном обществе большое значение приобретает использование различных компьютерных технологий во всех сферах деятельности человека. Отдельное внимание уделяется системам хранения, распространения и обработки информации, основанным на использовании различных компьютерных систем. Заметен рост лиц в различных областях, нуждающихся в обработке и хранении информации посредством современных информационных систем.

Стационар и поликлиника – ключевые учреждения, в которых существует необходимость в эффективном предоставлении услуг, поскольку здоровье людей имеет первостепенное значение для счастливого общества. В связи с этим, возникает необходимость в системе, которая позволит медицинскому персоналу принимать эффективные и своевременные решения. В последнее время очень часто прилагаются усилия для создания удобных для пользователей и надёжных баз данных, которые удовлетворяют требованиям больниц и медицинских учреждений. Тем не менее, многие стационары и поликлиники всё ещё имеют ручную систему управления данными. Эти методы управления системы медицинского обслуживания продолжают создавать множество сбоев и проблем для практикующих врачей и пациентов, как в государственных, так и в частных учреждениях.

В настоящее время информационная индустрия связана с созданием технических методов, средств и технологий для получения новых знаний. Все учреждения здравоохранения нуждаются в информационных системах для работы с информацией. В связи с большим количеством пациентов у врачей, обработка информации приобретает всё большее значение. Врачи должны иметь доступ к карте пациента для постановки диагноза и его лечения. Управление данными для каждого врача может быть использовано для получения информации о пациенте, её пополнения и проведения сравнительного анализа.



Любая организация нуждается в своевременном доступе к информации. Роль распорядителей информации в современном мире чаще всего выполняют базы данных. Базы данных обеспечивают надежное хранение информации, структурированном виде и своевременный доступ к ней. Практически любая современная организация нуждается в базе данных, удовлетворяющей те или иные потребности по хранению, управлению и администрированию данных.

Целью выполнения данной работы является создание программного для комплексной оценки состояния здоровья детей в амбулаторно-поликлинической службе. Разработанная программа должна представлять собой программное средство статистики и анализа информации для упрощения деятельности медицинского работника. Данная информационная должна повысить эффективность деятельности на основе автоматизации трудоемких операций статистики, обработки и анализа информации.

### **Постановка задачи**

Целью данной работы является создание программного комплекса, в котором реализованы функции:

- 1) хранения данных,
- 2) обработки и редактирования данных,
- 3) удалённого доступа к данным.

### **Разработка программного комплекса**

Сравнительный анализ популярных языков программирования позволил выбрать для программной реализации язык Python как наиболее удобное и компактное средство для создания приложений, работающих с большими объемами данными.

На сегодняшний день Python является самым распространенным языком для построения научных и технических программных продуктов ввиду компактности и наглядности синтаксиса языка, мощной технической поддержки и наличия крупнейшей свободной базы библиотек (пакетов) с реализованными алгоритмами практически во всех областях научной деятельности.

Соответственно при разработке программного кода использовался объектно-ориентированный подход, который в полной мере поддерживается языком программирования Python. К плюсам язык Python, помимо упомянутых, относятся его простота, большое количество библиотек для использования в самых различных областях, бесплатное распространение и широкая поддержка сообществом программистов.

Графический интерфейс программы будет разрабатываться с помощью библиотеки PyQt, являющейся оберткой к популярной C++ графической библиотеке Qt. Данная библиотека предоставляет удобную среду для создания оконных приложений с широким набором готовых компонентов пользовательского интерфейса (виджетов), в то же время допускающих гибкую настройку под непосредственные нужды разработчика.

Непосредственная математическая обработка данных будет производиться посредством популярного специализированного Python модуля для научных вычислений numpy. Данный модуль позволяет проводить с высокой эффективностью математические операции над мно-

гомерными массивами, включая частные случаи одномерных массивов (векторы) и двумерных массивов (матрицы).

В последние годы при разработке приложений (в особенности web приложений) приобрел популярность так называемый serverless подход, при котором вместо самостоятельной настройки собственного физического или облачного сервера используется уже сконфигурированная стандартная система, позволяющая производить автоматическое развертывание.

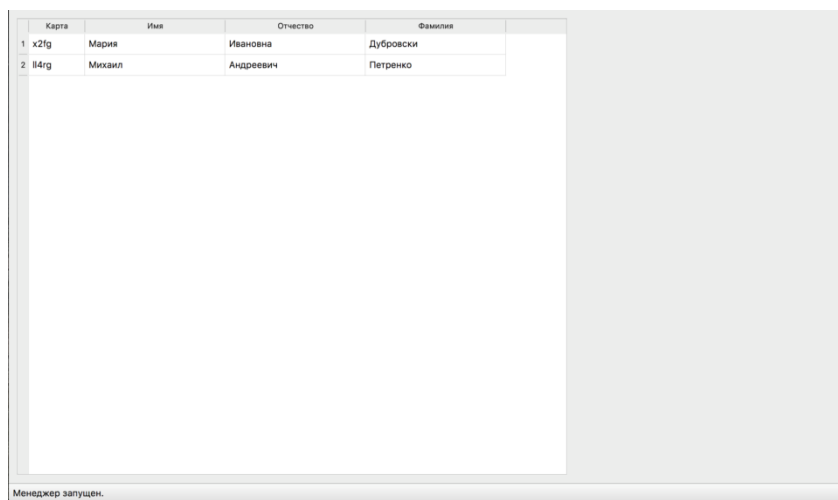
Одним из наиболее распространенных serverless решений является сервис firebase от google, который включает хостинг, систему аутентификации пользователей посредством адреса электронной почты и/или мобильного телефона, облачное хранилище файлов firestore, базу данных реального времени firestore и множество других возможностей. В данной работе будет использоваться удобная noSQL база данных firestore.

Мы будем использовать облачный сервис firebase для хранения данных программного приложения, при этом для доступа к сервису из python коды мы воспользуемся стандартным firebase-менеджером – python пакет firebase-admin.

Для возможности запуска программы и создания исполняемого exe файла в рамках описанного выше набора используемых библиотек, необходимо скачать с официального сайта сборку Python Anaconda для Python 3, и установить стандартным образом, а затем последовательно выполнить установку следующих python пакетов (библиотек): PyQt5, PyInstaller, fbs, firebase-admin.

Мы будем использовать мощную nosql базу данных реального времени firestore. Данная база данных предполагает организацию информации в иерархической форме, состоящей из документов, объединенных в коллекции, при этом каждый документ может содержать как непосредственно данные, так и вложенные коллекции документов.

Графический пользовательский интерфейс созданной нами медицинской системы в состоянии после запуска программы и загрузки тестовой базы данных представлен на рисунке.



Карта	Имя	Отчество	Фамилия
1 x2fg	Мария	Ивановна	Дубровски
2 ll4fg	Михаил	Андреевич	Петренко

Менеджер запущен.

### Пользовательский интерфейс программы

### Выводы

Разработанный программный комплекс способен повысить эффективность деятельности на основе автоматизации трудоемких операций анализа, обработки, статистики и анализа информации.

В качестве возможных направлений дальнейшего развития созданной в данной работе информационной медицинской системы отметим следующие:

1. Модернизация интерфейса администратора с добавлением возможности управления пользователями.
2. Добавление в программу возможности отслеживания изменений в содержании базы данных в режиме реального времени.

### **Библиографический список**

1. **Кириллов, В.В.** Структурированный язык запросов (SQL) / Кириллов В.В., Громов Г.Ю. – СПГИТМО, html-формат.
2. MySQL / Поль Дюбуа – Вильямс, 2001. – 816
3. **Копейкин, М.В.** Базы данных. Основы SQL реляционных баз данных / Копейкин М.В., Спиридонов В.В., Шумова Е.О. – СЗТУ, 2005. – 160 с.
4. **Доусон, М.** Программируем на Python / М. Доусон. – СПб.: Питер, 2014. – 416 с.
5. **Лутц, М.** Программирование на Python, том II, 4-е издание / М. Лутц. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 992 с.
6. **Шапошникова, С.** Основы программирования на Python. Вводный курс / С. Шапошникова. – М., 2015.
7. **Чаплыгин, А.Н.** Учимся программировать вместе с питоном / А.Н. Чаплыгин. – М., 2018.
8. **Шварц, Б.** MySQL. Оптимизация производительности (2-е издание) / Б. Шварц, п. Зайцев, В. Ткаченко. – М., 2009.
9. **Чекалова, Н.Г.** Состояние костно-мышечной системы у детей и подростков 7-18 лет в зависимости от пола на разных ступенях обучения /Чекалова Н.Г., Чекалова С.А., Силкин Ю.Р.// Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. 2018. № 1. С. 33-40.

**E.V.Posypkina, S.A. Chekalova**

### **SOFTWARE COMPLEX FOR COMPLEX EVALUATION OF CHILDREN'S HEALTH CONDITIONS IN THE OUT-patient POLYCLINIC SERVICE**

R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod State Technical University.

In the report considers a software package for a comprehensive assessment of the health status of children in the outpatient service. The program being developed should be a software tool to simplify the work with a large amount of data from the activity of a medical institution (clinic). This software package should increase the efficiency of the medical institution by automating the laborious operations of statistics, processing and analyzing available information.

**Keywords:** database, software package

Л. В. Талалушкина, П. В. Лобовиков, М. В. Кокоулина, А.Р. Гиниятуллин

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО БРИЗЕРА НАД УСТУПОМ В РАМКАХ УРАВНЕНИЯ ГАРДНЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В настоящей работе проводится исследование динамики волновых пакетов (бризеров), а именно изучаются особенностей трансформации бризера над донным уступом в жидкости с трехслойной стратификацией плотности в рамках уравнения Гарднера

**Ключевые слова:** внутренние волны, слабонелинейная теория, бризер, трехслойная стратификация, уравнение Гарднера, неоднородная среда, донный уступ.

### Введение

Внутренние гравитационные волны являются одной из важнейших составляющих волновых движений в стратифицированных водоемах [Миропольский, 1981]. Слабонелинейная теория длинных внутренних волн предполагает существование особого типа локализованных неизлучающих решений в рамках уравнений Гарднера и мКдВ, которые обычно привлекаются для описания динамики внутренних волн в слоистом океане. Этими решениями являются длинные нелинейные локализованные волновые пакеты – бризеры [Pelinovsky, Grimshaw, 1997]. Поскольку натурные наблюдения бризероподобных волн затруднены, а лабораторное моделирование таких волн тоже достаточно непросто осуществить, то численное моделирование пока является единственным инструментом исследования свойств и динамики бризеров внутренних волн. Эти исследования ведутся как в рамках приближенных моделей [Clarke et al., 2000], так в рамках нелинейных уравнений Эйлера или Навье - Стокса [Rouvinskaya et.al., 2015, Лобовиков и др., 2019]. В отличие от внутренних солитонов, существует множество нерешенных задач, связанных с динамикой бризеров. Одна из таких проблем связана с распространением и трансформацией бризеров над донным уступом.

### Постановка задачи

В рамках данной работы ставится задача об изучении особенностей трансформации бризера над донным уступом в трехслойной жидкости. Как известно, бризерные решения в рамках слабонелинейной теории существуют только при определенных типах стратификации жидкости, обеспечивающей положительный знак коэффициента кубической нелинейности в эволюционных уравнениях. В данной работе подходящая симметричная почти трехслойная стратификация. Схема расчетной области и начального возмущения поля плотности представлена на рис. 1. Длина исследуемой области принималась равной  $L = 15000$  м, невозмущенная глубина до уступа  $-H = 100$  м высотой уступа  $H_s = 12$  м и шириной  $W_s$ . Форма сглаженного уступа определялась следующим соотношением:

$$D(x) = \frac{-(H - H_s)}{2} - \frac{H_s}{2} \operatorname{th}\left(\frac{x - x_0}{d}\right), \quad (1)$$

где  $x_0$  – положение центра зоны неоднородной глубины по оси  $x$ ,  $W_s = 2d$  – характерная ширина уступа. Сглаженная стратификация плотности с двумя пикноклинами задается следующим соотношением:

$$\rho(z) = \rho_0 - \Delta\rho_1 \operatorname{tanh}\left(\frac{z - z_{\text{pyc1}}}{d_{\text{pyc1}}}\right) - \Delta\rho_2 \operatorname{tanh}\left(\frac{z - z_{\text{pyc2}}}{d_{\text{pyc2}}}\right), \quad (2)$$

где  $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$  – среднее значение плотности,  $\Delta\rho = \Delta\rho_1 = \Delta\rho_2 = 5 \text{ кг/м}^3$  – скачки плотности на верхнем и нижнем пикноклинах соответственно,  $z_{\text{pyc1}} = -30 \text{ м}$ ,  $z_{\text{pyc2}} = -70 \text{ м}$  – глубины залегания пикноклинов,  $d_{\text{pyc1}} = d_{\text{pyc2}} = 4 \text{ м}$  – характерная полуширина пикноклинов. Полная глубина жидкости принималась равной  $H = 100 \text{ м}$ .

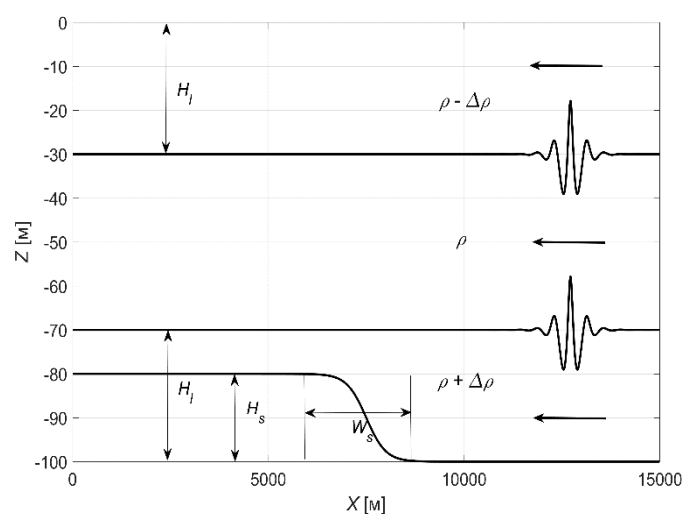


Рисунок 1. Схема задачи

### Уравнения модели

Уравнения КдВ-иерархии являются популярной моделью для описания слабонелинейных длинных волн в различных физических приложениях. Уравнение Гарднера для однородной среды, включает в себя как член квадратичной, так и член кубической (с коэффициентом  $\alpha_1$ ) нелинейности [Grimshaw et al., 2002]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0 \quad (3)$$

где  $c$  – фазовая скорость распространения волны,  $\alpha$  – коэффициент квадратичной нелинейности,  $\alpha_1$  – коэффициент кубической нелинейности,  $\beta$  – коэффициент дисперсии. Волновая функция  $\eta(x, t)$ , как правило, является решением такого уравнения. Подробное описание модели и методику расчета коэффициентов уравнения (3) можно найти, например, в работе [Kurkina et al., 2017].

Уравнение Гарднера (3) является полностью интегрируемым и имеет как семейства мульти-солитонных решений в виде суперпозиции уединенных волн, так и семейство бризерных

решений при положительном коэффициенте кубической нелинейности  $\alpha_1$  [Talipova et. al., 2014, 2019], а также мульти-солитонно-бризерные решения [Slunyaev, 2019].

Для рассматриваемой среды, которая до уступа является симметричной относительно полуглубины, фазовая скорость длинных волн  $c = 1.6451 \text{ м/с}$ , коэффициент дисперсии  $\beta = 782.8056 \text{ м}^3/\text{с}$ , коэффициент кубической нелинейности  $\alpha_1 = 0.002 \text{ 1/(м·с)}$ , а вот коэффициент квадратичной нелинейности  $\alpha$  в (3) обращается в ноль, и уравнение Гарднера совпадает с уравнением мКдВ, бризерное решение которого имеет вид [Clarke et al., 2000]:

$$\frac{\eta_0(x,t)}{A_0} = -4a \operatorname{sech} \theta \cdot \left[ \frac{\cos \varphi + (a/b) \sin \varphi \cdot \tanh \varphi}{1 + (a/b)^2 \sin^2 \varphi \cdot \operatorname{sech}^2 \varphi} \right] \quad (4)$$

$$\theta = -2b \frac{x}{\xi} - 8b(b^2 - 3a^2) \frac{t}{\tau} + \theta_0, \quad \varphi = 2a \frac{x}{\xi} + 8a(3b^2 - a^2) \frac{t}{\tau} + \varphi_0,$$

$$\xi = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}, \quad \tau = \left( \frac{6}{\alpha_1} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{\beta}}{A_0^3},$$

где  $a$  и  $b$  – произвольные параметры,  $\theta_0$  и  $\varphi_0$  – фазовые сдвиги. Параметр  $b$  в основном влияет на количество волн в волновом пакете, параметр  $a$  преимущественно определяет амплитуду бризера. Далее мы будем использовать решение (4) при  $x = 0$ ,  $\theta_0 = 0$  и  $\varphi_0 = 0$  в качестве граничного условия в граничной задаче о трансформации бризера над неровным дном.

Огибающая бризерного решения приближенно описывается следующей формулой:

$$\eta_e = \frac{-4aH}{\cosh \theta}. \quad (5)$$

Длина волны  $\lambda_e$  и волновое число  $k_e$  огибающей определяются следующим образом:

$$\lambda_e = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\cosh(2ax/L)} dx = \frac{\pi L}{2a} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{2\pi}{\lambda_e} = \frac{4a}{L} \quad (7)$$

где  $\bar{L} = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}$  – это характерный горизонтальный масштаб. Бризер при  $a = 0.5$ ,  $b = 1.15$  и его огибающая построенная по формуле (5) приведены на рис. 2.

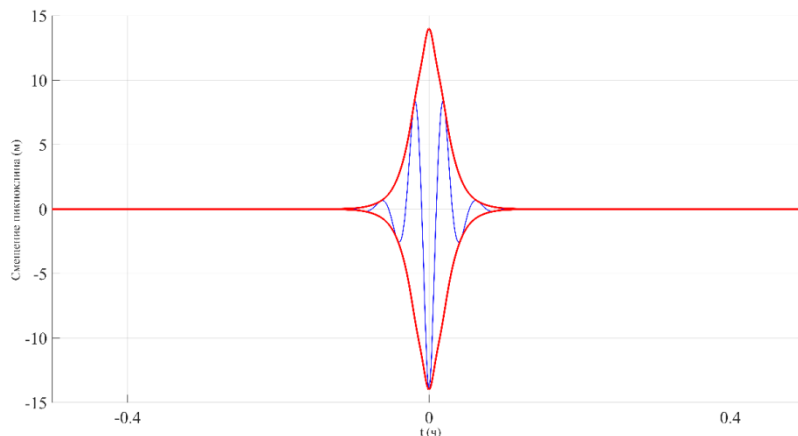


Рисунок 2. Бризер (4) и его огибающая (5) в момент времени  $t = 0$

В настоящей работе рассматривается граничная задача с периодическими граничными условиями в случае неоднородной среды (в нашей задаче, определяемой лишь неровностями дна). Для этого уравнение (2) переписывается в виде [Holloway et al., 1999]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\alpha}{c^2} \eta \frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\alpha_1}{c^2} \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\beta}{c^4} \frac{\partial^3 \eta}{\partial s^3} + \frac{\eta}{2Mc^2} \frac{d(c^3 M)}{dx} = 0 \quad (8)$$

в системе отсчета, движущейся с переменной линейной скоростью длинных волн  $c$ , подробности см, например, в работе [Kurkina et al., 2017]. Уравнение (8) решается численно с помощью неявной псевдо-спектральной схемы с контролем сохранения интегралов массы и энергии. Подобный код неоднократно использовался для моделирования волновых процессов различной природы [Kurkina и др., 2012]. Пространственный интервал выбирался, исходя из предполагаемой формы, скорости возмущений и времени эволюции. В начальной точке трассы задается граничное условие.

$$\eta(x=0, s) = \eta_0(s),$$

где  $\eta_0$  определяется по формуле (4).

### Полученные результаты

На рис. 2 приведены спектры Фурье волны в начальной и в конечной точке трассы распространения, а на рис. 3 – изменение спектров вдоль всей трассы. Можно заметить, что наблюдается сильная трансформация волнового поля при прохождении бризера над уступом (рис. 4, а). На рис. 4, б представлена ХТ-диаграмма процесса трансформации бризера над донным уступом.

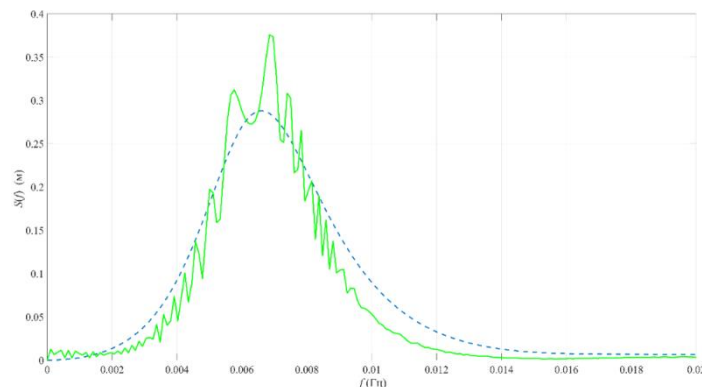


Рисунок 3. Спектры Фурье волны в начальной (пунктир) и в конечной (сплошная линия) точке

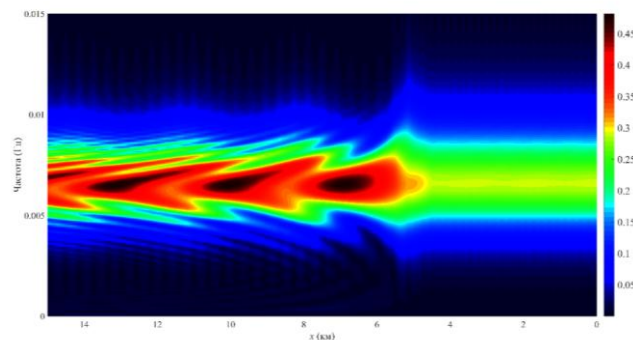
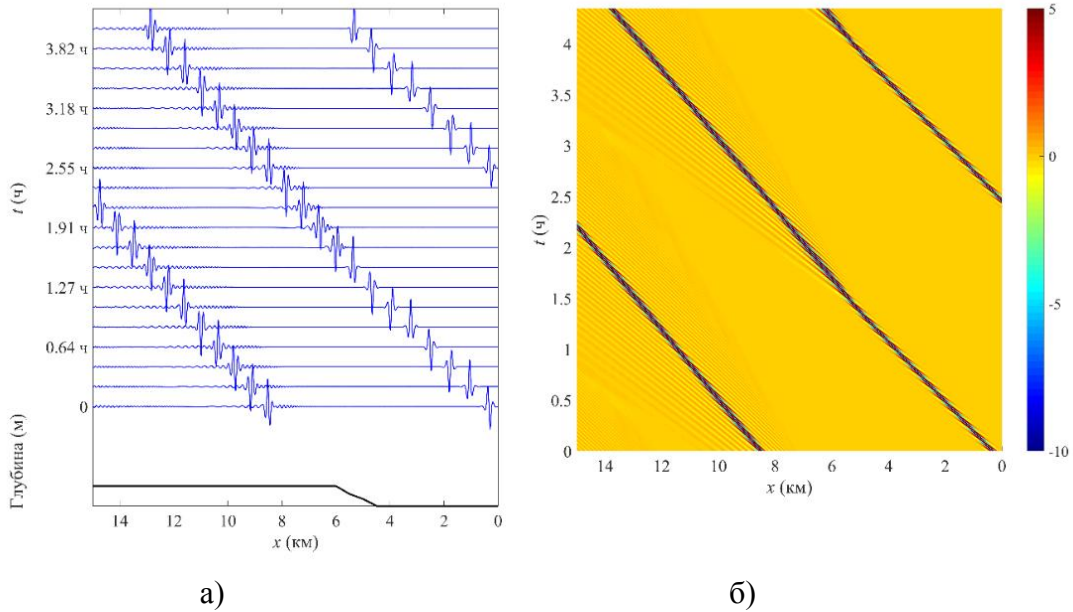
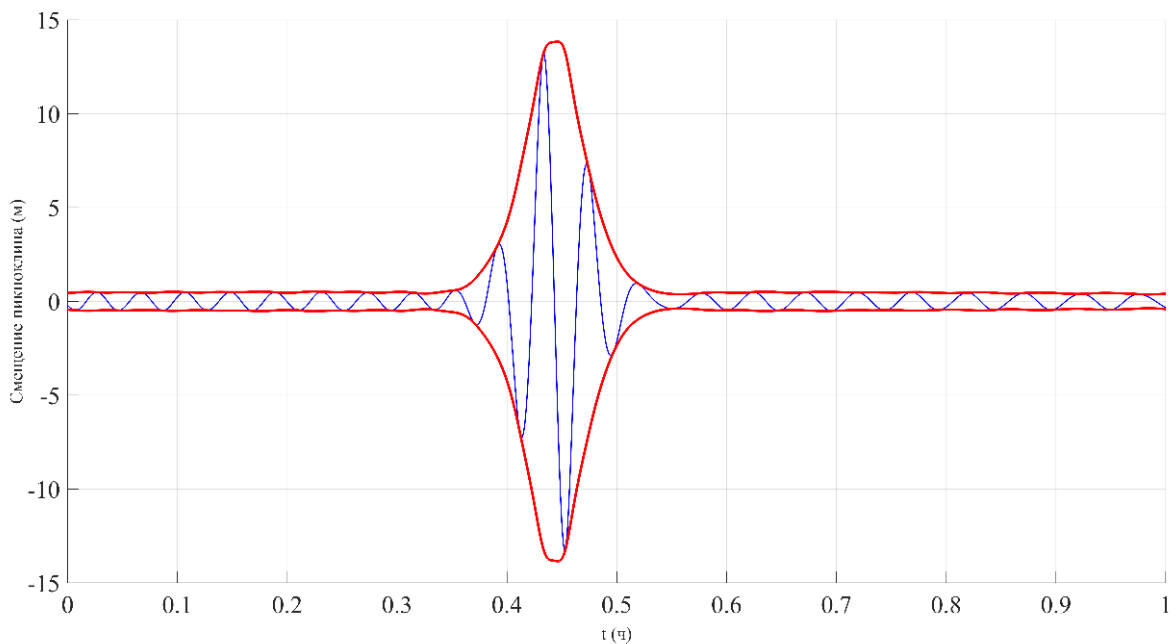


Рисунок 4. Спектр Фурье волнового поля вдоль трассы распространения. Цветом показана спектральная амплитуда в м



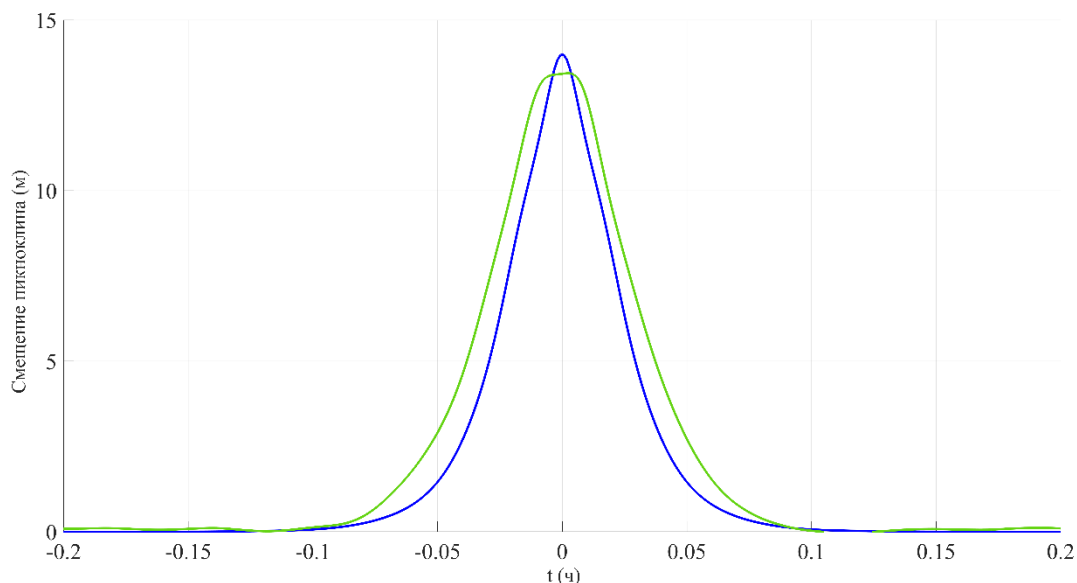
**Рисунок 5. а) Трансформация внутренней волны. Показано смещение верхнего пикноклина  
 б) Пространственно-временная диаграмма процесса трансформации бризера**

Огибающую численного решения можно определить с помощью преобразования Гильберта [Claerbout, 1985]. В начальный момент времени огибающая совпадает с теоретической огибающей (4), которая приведена на рис. 2. Бризер и его огибающая, полученная с помощью преобразования Гильберта в конечный момент времени представлены на рис. 5. Можно заметить, что количество волн в осциллирующем волновом пакете увеличилось, а его ширина несколько увеличилась (рис. 6).



**Рисунок 5. Бризер (голубая линия) и огибающая (красная линия) бризерного решения в начальный момент времени (слева) и в конечный момент (справа)**





**Рисунок 6. Сравнение огибающих бризерного решения в начальный (голубая линия) и конечный (зеленая линия) момент времени**

### **Заключение**

В рамках данной работы проведено моделирование трансформации бризернад донным уступом в жидкости с трехслойной стратификацией плотности. В процессе трансформации бризер сохраняется, ширина его огибающей увеличивается, амплитуда уменьшается, а также увеличивается количество волн в осциллирующем пакете.

Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК-218.2020.5.

### **Библиографический список**

1. **Куркина, О. Е.** / Динамика солитонов в неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза / О.Е. Куркина [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. Вып. 2. С. 98 – 103.
2. **Лобовиков, П.В.** Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости / П.В. Лобовиков [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. №6. С. 182-193.
3. **Миропольский, Ю.З.** Динамика внутренних гравитационных волн в океане / Ю.З. Миропольский. - Ленинград, Гидрометеиздат. 1981. 302с.
4. **Claerbout, Jon F.** Fundamentals of Geophysical Data Processing with Applications to Petroleum Prospecting. // Oxford, UK: Blackwell. 1985. P. 59–62.
5. **Clarke S., Grimshaw R., Miller P., Pelinovsky E., Talipova T.** On the generation of solitons and breathers in the modified Korteweg - de Vries equation. // Chaos. 2000. V. 10. No. 2.P. 383-392

6. **Grimshaw R., Pelinovsky. E., Poloukhina O.** Higher-order Korteweg–de Vries models for internal solitary waves in a stratified shear flow with free surface. // *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2002, V.9, p.221–235.

7. **Kurkina, O., Rouvinskaya, E., Talipova, T. & Soomere, T.** Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin. // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017.V. 185, P. 44–54.

8. **P, Pelinovsky E., Talipova T.** A Generalized Korteweg - de Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. No. C8. P. 18333-18350.

9. **Pelinovsky, D., and Grimshaw, R.** Structural transformation of eigenvalues for a perturbed algebraic soliton potential. // *Phys. Lett.A.* 1997. V. 229. P.165 – 172

10. **Rouvinskaya E., Talipova T., Kurkina O., Tyugin D., Soomere T.** Transformation of internal breathers in the idealised shelf sea conditions // *Continental Shelf Research*. 2015. V. 110. P. 60-71.

11. **Slunyaev, A.** On the optimal focusing of solitons and breathers in long-wave models. // *Studies in Applied Mathematics*, 2019. V. 142(3). P. 385-413.

12. **Talipova, T., Pelinovsky, E., Kurkin, A., Kurkina, O.,** Modeling the dynamics of intense internal waves on the shelf. // *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* 2014 V. 50 (6), P. 630–637.

13. **Talipova, T., Kurkina, O., Kurkin, A., Didenkulova, E., & Pelinovsky, E.** Internal Wave Breathers in the Slightly Stratified Fluid. // *Microgravity Science and Technology*. 2019. P 1-9.

**L. Talalushkina, P. Lobovikov, M. Kokoulina, A. Giniyatullin**

## **TRANSFORMATION INTERNAL BREATHER OVER BOTTOM STEP WITH IN FRAMEWORK GARDNER EQUATION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

In this article showed the dynamics of wave packets (breathers) and study the characteristics of the transformation of the breather over the bottom ledge in a fluid with symmetric three-layer density stratification in the framework of the Gardner equation.

**Keywords:** breather, experiments, internal waves, three-layer system, Gardner equation, bottom step.

М.А. Турцев

## НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Для эффективного решения задач по оптимизации функций многих переменных существует группа алгоритмов, объединенных под общим названием - методы случайного поиска. В статье рассматриваются принципы работы метода с возвратом при неудачном шаге, алгоритма наилучшей пробы и метода статистического градиента. Представлены функции для тестирования алгоритмов и сравнительный анализ результатов тестирования.

**Ключевые слова:** численные методы, оптимизация, минимизация функций, методы случайного поиска, метод с возвратом при неудачном шаге, алгоритм наилучшей пробы, метод статистического градиента.

### Введение

Многие задачи оптимизации сводятся к отысканию наименьшего или наибольшего значения некоторой функции, которую принято называть целевой функцией. В этом случае методы исследования существенно зависят от свойств целевой функции и той информации о ней, которая может считаться доступной до решения задачи и в процессе ее решения.

Нахождение экстремумов функции фактически сводится к решению некоторого уравнения для производной функции. Но такой подход возможен только в случае дифференцируемости функции, такое условие далеко не всегда выполняется особенно для сложных функций описывающих реальные процессы.

В последние десятилетия в условиях научно-технического прогресса круг задач оптимизации, поставленных практикой, существенно расширился. Во многих из них значения целевой функции могут получаться в результате численных расчетов или получаться экспериментально. Такие задачи являются более сложными, при их решении нельзя исследовать целевую функцию с помощью производной. Это привело к разработке специальных методов, рассчитанных на широкое применение ЭВМ.

Численные методы всегда дают приближенный результат, но их преимуществом является то, что большинство из них позволяют находить решение с наперед заданной точностью. Точность зависит от количества итераций (объема вычислений) при условии сходимости метода.

Численные методы находят широкое применение в практике, так как в практических задачах абсолютная точность обычно не требуется, а функция, в большинстве случаев рассматривается на конкретном интервале. То есть и корни и экстремумы обычно интересуют именно на указанном интервале. Эти предпосылки определяют возможность применения численных приближенных методов.

К таким методам можно отнести группу методов, называемых методами случайного поиска. В данной работе рассмотрены следующие алгоритмы: метод с возвратом при неудачном шаге, алгоритм наилучшей пробы, метод статистического градиента.

## Метод с возвратом при неудачном шаге

Опишем этот алгоритм:

С помощью генератора случайных чисел получить некоторую  $n$ -мерную случайную величину  $X$ , имеющую заданное исследователем распределение;

В евклидовом пространстве  $E^n$  найдём точку  $v_k$  по формуле:

$$v_k = u_k + \alpha X,$$

где  $\alpha = const > 0$ .

Если  $v_k$  принадлежит некоторой области  $U$ , представляющей собой некоторую фигуру на плоскости или пространстве, и значение функции  $J$  в точках  $u_k$  и  $v_k$  удовлетворяют следующему неравенству:

$$J(v_k) < J(u_k),$$

то шаг алгоритма удачный, и примем:

$$u_{k+1} = v_k.$$

Если же  $v_k \notin U$ , но значение функции  $J$  в точках  $u_k$  и  $v_k$  удовлетворяют неравенству:

$$J(v_k) \geq J(u_k),$$

или выяснится, что  $v_k \notin U$ , то шаг алгоритма неудачный и положим:

$$u_{k+1} = u_k.$$

Если значения точки  $u_k$  повторяются из шага в шаг, то есть выполняется равенство:

$$u_k = u_{k+1} = \dots = u_{k+N},$$

то при условии, что  $N \gg 1$ , алгоритм считаем завершённым, и  $u_k$  – искомая точка минимума.

## Метод наилучшей пробы

Опишем этот алгоритм:

Сгенерировать  $s$  раз  $n$ -мерную случайную величину  $X$ , имеющую заданное распределение на определенном отрезке.

В евклидовом пространстве  $E^n$  найти точку  $u$  по формуле:

$$u = u_k + \alpha X_i,$$

где  $i \in [1; s]$ ,  $\alpha = const > 0$ .

Там, где  $u$  принадлежит некоторой области  $U$ , представляющей собой некоторую фигуру на плоскости или пространстве, вычислить значение функции  $J$  в этой точке.

Найти значение  $u_{k+1}$  по формуле:

$$u_{k+1} = u_k + \alpha X_{i_0},$$

где  $i_0$  найти из условия:

$$J(u_k + \alpha X_{i_0}) = \min J(u_k + \alpha X_i),$$

при  $u_k + \alpha X_{i_0} \in U$ ;  $i \in [1; s]$ .

Числа  $s > 1$  и  $\alpha = const > 0$  – параметры алгоритма.

## Метод статистического градиента

Генерируется  $m$  независимых реализаций  $X_1, X_2, \dots, X_m$  случайного вектора  $X$ , затем при  $\tau > 0$  для каждой такой реализации запоминаем приращения функции

$$\Delta w_i = w(v^k + \tau X_i) - w(v^k)$$

для всех точек  $v^k + \tau X_i$ , принадлежащих области  $U$ , представляющей собой некоторую гео-

метрическую фигуру евклидовом пространстве  $E^n$ , в которой ищется минимум функции.

После этого вычисляем статистический градиент по следующей формуле:

$$\nabla g_i = \frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^m X_j \Delta w_i,$$

для всех точек  $v^k + \tau X_i$ , принадлежащих области  $U$ .

Если новое приближение при  $\beta > 0$ , найденное посредством формулы:

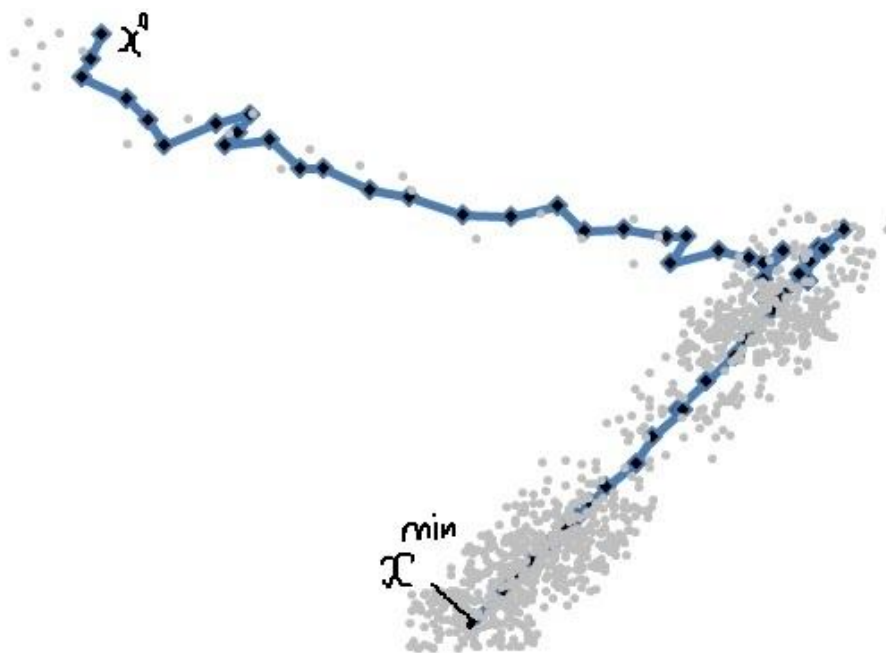
$$v^{k+1} = v^k + \beta \nabla g_i$$

принадлежит области  $U$ , то мы двигаемся в направлении этой точки, иначе – повторяем алгоритм заново.

### Исследование результатов работы алгоритмов

Исследование рассматриваемых методов случайного поиска проводилось на наборе тестовых математических функций без привязки к конкретной прикладной области.

Для каждого из алгоритмов свободные параметры и начальное приближение подбираются случайно, поэтому чтобы оценить эффективность работы конкретного алгоритма, необходимо использовать многократный его прогон. Для тестирования алгоритмов были реализованы программы, позволяющие запускать их на наборе тестовых функций с условной оптимизацией, модифицировать свободные параметры алгоритма, при этом имеется возможность запускать программу несколько раз. На рисунке представлен пример работы программы метода с возвратом при неудачном шаге на примере функции Розенброка.



### Пример работы программы

На данном рисунке серыми точками показаны неудачные шаги при движении к точке минимума функции, а синей линией с точками – удачные шаги.

Работоспособность оптимизационных алгоритмов проверялась на наборе тестовых функций, обладающих специфической топографией. Тестовые функции представлены в таблице.

Название задачи	Постановка задачи
Функция Матьяса	$f_1 = 0.26(x^2 + y^2) - 0,48xy \rightarrow \min$
Функция Химмельблау	$f_2 = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2 \rightarrow \min$
Функция Розенброка	$f_3 = (1 - x)^2 + 100(y - x^2)^2 \rightarrow \min$
Функция Растригина	$f_4 = 20 + x^2 + y^2 - 10(\cos 2\pi x + \cos 2\pi y) \rightarrow \min$
Функция Биля	$f_5 = (1.5 - x + xy)^2 + (2.25 - x + xy^2)^2 + (2.625 - x + xy^3)^2 \rightarrow \min$

### Заключение

В результате тестирования набора функций была подтверждена гибкость и универсальность методов случайного поиска при решении задач оптимизации функций многих переменных. Выявлена хорошая сходимость алгоритмов. Все представленные выше алгоритмы эффективно решают поставленные задачи за относительно короткое время, поэтому их можно применять и для решения практических задач в различных прикладных областях исследования.

### Библиографический список

1. **Васильев, Ф.П.** Численные методы решения экстремальных задач: учеб. пособие для вузов. -2-е изд., перераб. и доп. / Ф.П. Васильев. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1988. – 552 с.
2. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
3. **Пантелеев, А.В.** Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие/ А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.
4. **Гончаров, В.А.** Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов / В. А. Гончаров. — М.: Издательство Юрайт ; ИД Юрайт, 2014. — 191 с. — Серия : Бакалавр. Базовый курс.
5. Тестовые функции для оптимизации // Википедия. [2020—2020]. – URL: <http://ru.wikipe-d>.

**М.А. Turtsev**

### SOME RANDOM SEARCH METHODS FOR MINIMIZING FUNCTIONS OF MANY VARIABLES

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to research the effectiveness of some random search methods for solving continuous optimization problems, selecting parameters for which the result of the algorithms will be most accurate, and also comparing the efficiency of these algorithms.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in testing three random search methods: the method with return on failed step, algorithm of the best trial and the method of statistic

gradient on a set of test problems and make a comparative analysis of the accuracy of the results in comparison with the analytical solution, as well as analyzing the rate of convergence.

**Findings:** When using the same parameter values, the algorithms showed good convergence results on a set of tasks that differ from one another in the presence of certain attributes, as well as with the search area.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for both studying new modifications of this family of algorithms and for applying the current implementation of the algorithms to existing practical optimization problems.

**Originality/value:** Implementations of algorithms created during the research have shown good results in solving test problems and can be used in applied problems or for comparative analysis with new modifications of algorithms.

**Key words:** numerical methods, optimization, random search methods, the method with return on failed step, algorithm of the best trial, the method of statistic gradient.

М.С. Шантин

## О НЕКОРРЕКТНОСТИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород

С помощью численных расчётов и метода Фурье показана некорректность задачи Коши для уравнения теплопроводности.

**Ключевые слова:** метод Фурье, метод сеток, явная схема.

### Введение

Некорректные задачи составляют класс задач, которые нельзя решить известными математическими методами. Для и решения необходимо разрабатывать специальные методы. В данной задаче, численно и с помощью метода Фурье устанавливается некорректность обратной задачи теплопроводности.

### Постановка задачи

Для заданной функции  $\chi(x)$ ,  $x \in [0,1]$ , требуется найти функцию  $\xi(x)$ ,  $x \in [0,1]$ , такую, что для функции  $u(x, t)$ ,  $t \in [0, T]$ , являющейся решением задачи

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right] = 0, \quad (1)$$

$$u(0, t) = u(1, t) = 0, \quad (2)$$

$$u(x, 0) = \xi(x), \quad (3)$$

верно неравенство:

$$\left[ \int_0^1 (u(x, T) - \chi(x))^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \leq \eta, \quad (4)$$

где  $\eta$  – малое заданное число.

Непосредственное решение задачи (1) – (3) невозможно, так как данная задача не является корректной. Проведённые численные расчёты доказывают это.

### Численные расчёты

Пусть

$$a(x) = 1, \\ \xi(x) = x(1 - x).$$

Тогда задача (1) – (3) примет следующий вид:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$



$$u(0, t) = u(1, t) = 0, \quad (6)$$

$$u(x, 0) = x(1 - x), x \in [0, 1], t \in [0, T]. \quad (7)$$

Для решения задачи(5) – (7)будем использовать метод сеток. Для этого покроем область определения искомой функции расчётной сеткой с узлами в точках  $t_n, x_m, n = 0, \dots, N, m = 0, \dots, M$ .

$$t_n = n\tau, x_m = mh, \tau = \frac{T}{N}, h = \frac{1}{M},$$

где  $\tau, h$  –шаги сетки по времени и пространству. Обозначимчерез  $\{u_m^n\}$  – приближённое решение задачи (5) – (7). Явная разностная схема для приближённого решения уравнения во внутренних узлах сетки имеет следующий вид:

$$u_m^{n+1} = u_m^n + \frac{\tau}{h^2} (u_{m-1}^n - 2u_m^n + u_{m+1}^n) \quad (8)$$

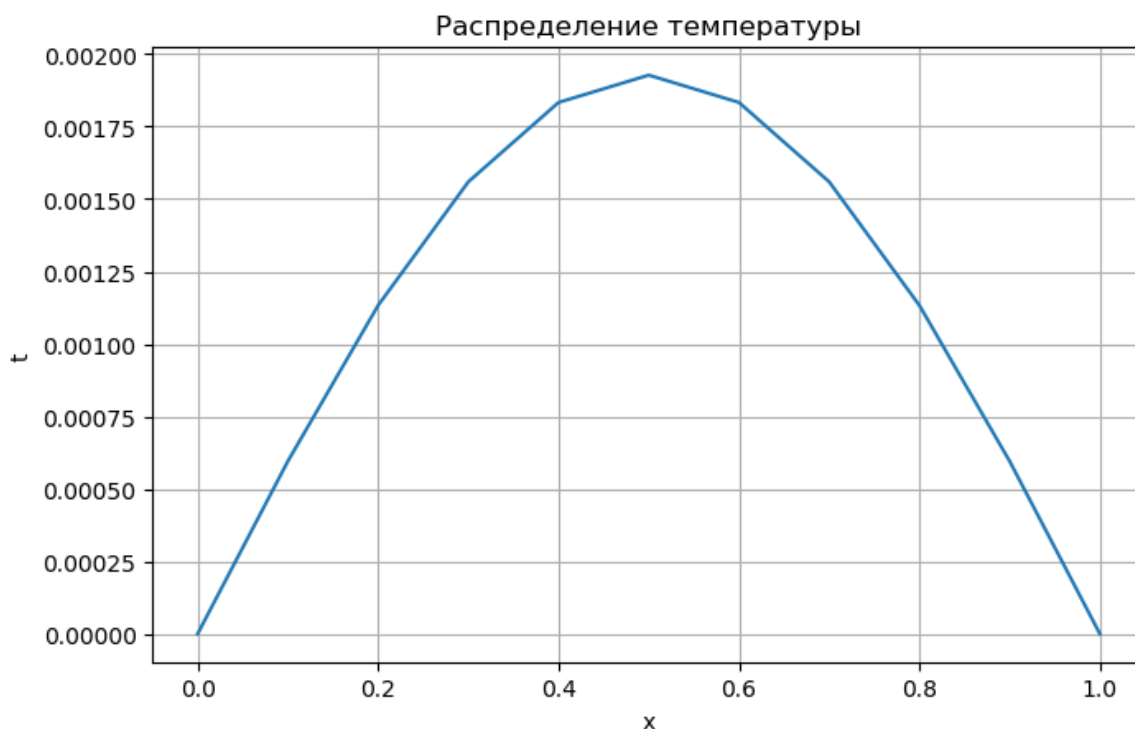
Эта схема аппроксимирует уравнение (5) во внутренних узлах области интегрирования, т.е. при  $n = 1, \dots, N - 1, m = 1, \dots, M - 1$ . Аппроксимируем граничные и начальные условия:

$$u_0^n = u_M^n = 0, \quad (9)$$

$$u_m^0 = x(1 - x), \quad (10)$$

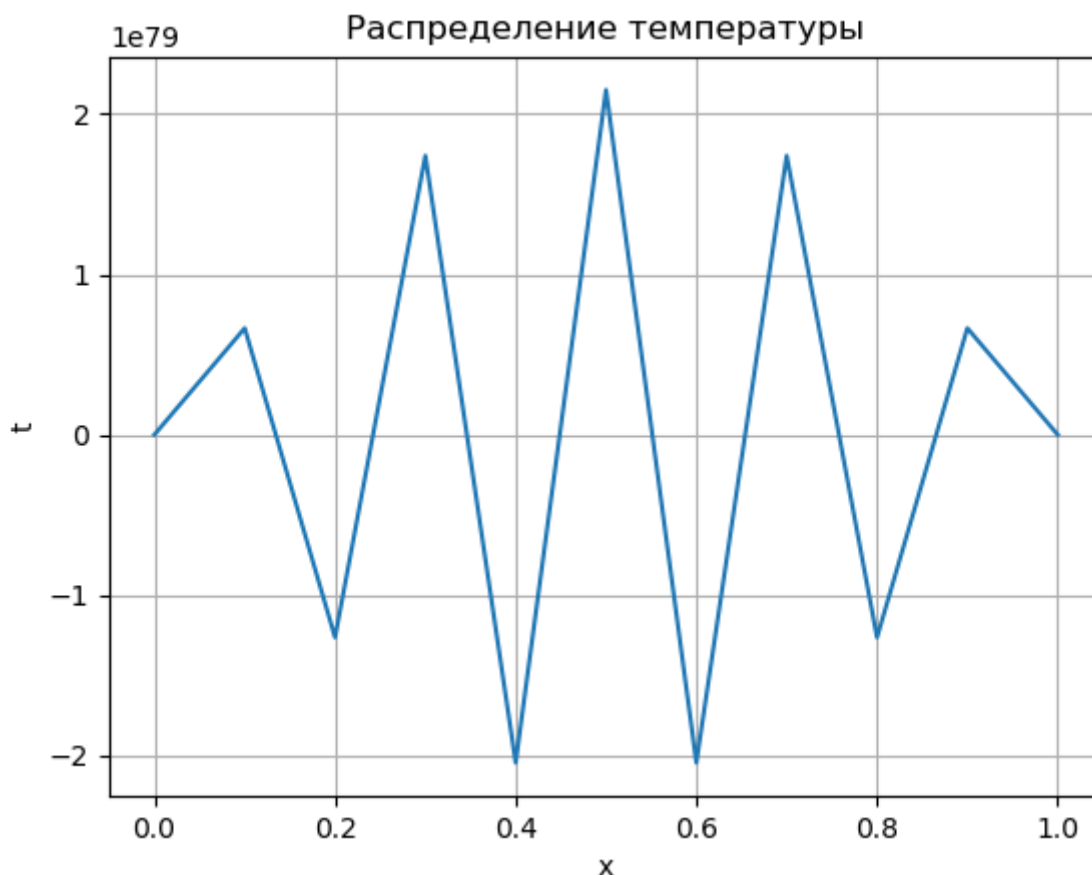
где  $n = 0, \dots, N, m = 0, \dots, M$ .

Вычисления, произведенные с помощью формул (8) – (10), приведены на Рисунок 1 и Рисунок 2.



**Рисунок 1. Распределение температуры для корректно поставленной задачи**

Рисунок 1 соответствует прямой задаче теплопроводности( $t > 0$ ).Из графика видно, что температура распределяется равномерно, без резких скачков, а значит, задача является корректной.



**Рисунок 2 . Распределение температуры для некорректно поставленной задачи**

Рисунок 2 соответствует задаче обратной теплопроводности ( $t < 0$ ). Из графика видно, что физически невозможны такие огромные скачки температуры, а значит, задача является некорректной.

Убедимся в некорректности задачи (5) – (7), используя метод Фурье.

### Метод Фурье

Пусть в задаче (5) – (7) ,  $a(x) = 1, x \in [0, \pi]$  и  $x(0, t) = x(\pi, t) = 0, \forall t \in [0, T]$ . Тогда имеем:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \quad (11)$$

$$u(0, t) = u(\pi, t) = 0, \quad (12)$$

$$u(x, 0) = \xi(x) \quad (13)$$

Пусть  $u(x, t) = X(x)T(t)$ , тогда из(12) вытекают равенства

$$X(0) = X(\pi) = 0, \quad (14)$$

а уравнение(11) примет вид

$$\frac{T'(t)}{T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda < 0.$$

Отсюда получаем два уравнения:

1.  $X''(x) + \lambda X(x) = 0$ , т.е.  $X(x) = c_1 \cos \sqrt{\lambda}x + c_2 \sin \sqrt{\lambda}x$ .  
Используя граничные условия (14), приходим к равенствам

$$X(x) = c_1 = 0, X(\pi) = c_2 \sin \sqrt{\lambda}x = 0.$$

Следовательно,  $\sqrt{\lambda}\pi = \pi k$ , т.е.  $\lambda^2 = k$ , и

$$X(x) = X_k(x) = c_k \sin kx, k = 1, \dots, 2, c_k - \text{постоянные.}$$

2.  $T'(t) + \lambda T(t) = 0, T_k(t) = d_k \exp(-k^2 t), d_k - \text{постоянные, } k = 1, 2 \dots$

Таким образом,

$$u_n(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \exp(-k^2 t) \sin kx. \quad (15)$$

Если в (13)  $\xi(x) \equiv 0$ , то и  $u(x, t) \equiv 0$ .

Пусть теперь  $\xi(x) = \frac{\sin nx}{n}$ . Тогда начальное условие (13) приводит к равенству

$$\frac{\sin nx}{n} = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kx.$$

Значит,  $b_k = 0$  при  $k \neq n$ , т.е.  $u(x, t) \equiv 0$ , и  $b_n = 1/n$ , при  $k = n$ . Таким образом, решение задачи (11) – (13) при  $\xi(x) = \frac{\sin nx}{n}$ , имеет вид

$$u_n(x, t) = \frac{\sin nx}{n} \exp(-n^2 t).$$

Пусть  $X = Y = C[0, \pi]$ . Тогда

$$\|u(x, t) - u_n(x, t)\|_{C[0, \pi]} = \max \left\{ \left| \frac{\sin nx}{n} \exp(-n^2 t) \right| \mid x \in [0, \pi], t < 0 \right\} \rightarrow \infty$$

при любом фиксированном  $t < 0$  и  $n \rightarrow \infty$ . При этом

$$\|u(x, 0) - u_n(x, 0)\|_{C[0, \pi]} = \max \left\{ \left| \frac{\sin nx}{n} \right| \mid x \in [0, \pi] \right\} \rightarrow \infty$$

при  $n \rightarrow \infty$ .

Таким образом, установлена некорректность обратной задачи теплопроводности.

Если имеем прямую задачу теплопроводности, т.е.  $t > 0$ , то

$$\exp(-n^2 t) \rightarrow 0, \text{ при } n \rightarrow \infty, \frac{|\sin nx|}{n} \leq \frac{1}{n} \text{ при всех } x \in [0, \pi],$$

и

$$\|u(x, 0) - u_n(x, 0)\|_{C[0, \pi]} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

Следовательно, прямая задача теплопроводности корректна, т.к. малым возмущениям начального условия (13) соответствуют малые возмущения решения задачи (11) – (13) при  $t > 0$ .

## Методы решения некорректных задач

Одним из способов решения некорректных задач является метод квазиобращения. В данном методе ставится приближённая задача вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x) \frac{\partial U}{\partial x} \right] - \varepsilon \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} = 0, \quad (16)$$

$$U(0, t) = U(1, t) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x) \frac{\partial U}{\partial x} \right] (0, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x) \frac{\partial U}{\partial x} \right] (1, t) = 0, \quad (17)$$

$$U(x, T) = \chi(x);$$

(18)

где в качестве  $\xi(x)$  берётся  $U(x, 0)$ .

Затем с целью проверки оценки (4) интегрируется задача (1) – (3), где в качестве начального условия берётся найденная на первом этапе функция  $\xi(x)$ .

### Вывод

В статье численно и аналитически показана некорректность задачи Коши для уравнения теплопроводности, а также указан один из методов решения данной задачи.

### Библиографический список

1. **Латгес, Р.** Метод квазиобращения и его приложения / Р. Латгес, Ж.-Л. Лионс; перевод с французского Сергеева В.О., В.А. Цецохо. Под редакцией Лаврентьева М.М. - Издательство «МИР». МОСКВА, 1970.
2. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. - Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Изд. 2-е.
3. **Араманович, И.Г.** Уравнения математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. - М.: Наука, 1969. - 288 с.
4. **Alexander Lazarev.** Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
5. Материалы сайта URL: <http://mathemlib.ru/books/item/f00/s00/z0000013/st053.shtml>
6. Материалы сайта URL: <https://pythonworld.ru/numpy/1.html>

**M.S. Shantin**

### ABOUT INCORRECTITY OF THE REVERSE PROBLEM OF HEAT CONDUCTIVITY.

Nizhny Novgorod state technical university. a. R.E. Alekseev

Using numerical calculations and the Fourier method, the Cauchy problem for the heat equation is incorrect.

**Keywords:** Fourier method, grid method, explicit scheme.

## Секция 7. Радиотехнические системы и устройства

УДК 621.37

Л.А. Зинченко<sup>1,2</sup>, Б.С. Сорокин<sup>3</sup>

### МНОЖИТЕЛЬ НАПРАВЛЕННОСТИ АФАР В ОБЛАСТИ ВНЕПОЛОСНЫХ И ПОБОЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

<sup>1</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>ФГУПНИИР, г. Москва

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Представлены оценки уровней нежелательных излучений систем подвижной связи, использующих широкополосные сигналы и АФАР. Показано, что в случае использования АФАР и широкополосных подводимых сигналов в области нежелательных излучений возможно формирование интерференционных максимумов. Предлагаются возможные пути снижения уровня нежелательных излучений систем подвижной связи.

**Ключевые слова:** побочные излучения, внеполосные излучения, АФАР, множитель направленности, нежелательные излучения.

#### Введение

В соответствии с Регламентом радиосвязи [1] внеполосными излучениями называются излучения в частотной области, непосредственно примыкающие к необходимой полосе частот, излучение в которой является результатом процесса модуляции. Под побочными излучениями понимаются излучения на частотах, находящихся за пределами внеполосной области, при этом уровень излучения может быть снижен без ущерба для передачи сообщений. Для повышения скорости передачи информации в современных системах подвижной связи используются широкополосные сигналы. Одним из основных недостатков подобных сигналов заключается в том, что за пределами необходимой для передачи информации полосы частот в области внеполосных и побочных излучений уровень сигнала уменьшается недостаточно сильно. Использование широкополосных сигналов приводит к тому, что помехи системам радиослужб могут создаваться как в полосах частот, примыкающих к полосе, необходимой для передачи сообщения, так и далеко за ее пределами.

В системах подвижной связи 5G базовые станции используют активные фазированные антенные решетки (АФАР). Использование в качестве излучающих систем АФАР позволяет формировать ДН с несколькими максимумами, положение которых может изменяться в пространстве. Использование АФАР с управляемым положением основных лепестков ДН позволяет следить за перемещением абонента в зоне обслуживания и повышает качество приема передаваемого сообщения. Однако использование АФАР для излучения широкополосных

сигналов приводит к возможному дальнейшему повышению уровня внеполосных и побочных излучений.

В связи с этим представляется целесообразным оценить уровень внеполосных и побочных излучений АФАР при излучении широкополосных сигналов.

### Основные расчетные соотношения для множителя направленности АФАР

Если АФАР состоит из однотипных элементов, каждый из которых возбуждается отдельным генератором одинаковой мощности, диаграмма направленности АФАР определяется в виде произведения диаграммы направленности одиночного элемента АФАР на множитель направленности решётки [2], [3]. В области внеполосных и побочных излучений возможность представления ДН АФАР в виде произведения двух сомножителей сохраняется. Диаграмма направленности и частотные свойства одиночного элемента АФАР определяются выбранной конструкцией излучателя и линии питания, обеспечивающей передачу энергии от генератора к одиночному излучателю.

Множитель направленности решетки определяется взаимным расположением элементов АФАР, как и в случае обычной фазированной антенной решетки, в общем случае описывается выражением [2]:

$$G(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{-2\pi i R_n/\lambda}$$

где  $\lambda$  - рабочая длина волны, м,  $N$  – число элементов АФАР,  $i$  – мнимая единица,  $aR_n$  – расстояние от фазового центра излучателя с номером  $n$  до точки определения поля. В случае синфазной эквидистантной линейной антенной решетки представленное ранее выражение для множителя направленности преобразуется к следующему виду [2, 3]:

$$G(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi Nd}{\lambda} \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)},$$

где  $\theta$  - угол, отсчитываемый от перпендикуляра к оси решетки.

Анализ полученного выражения показывает, что его максимальное значение равно количеству элементов рассматриваемой АФАР и достигается в случае, если угол  $\theta$  равен нулю. Ширина диаграммы направленности определяется отношением расстояния между элементами антенной решетки к длине волны ( $d/\lambda$ ) числом элементов АФАР  $N$ . Это же выражение справедливо и для множителя решетки рассматриваемой АФАР в области внеполосных и побочных излучений.

Если для электронного сканирования основного лепестка ДН АФАР между ее соседними элементами существует сдвиг фаз  $\Psi$ , множитель направленности линейной эквидистантной антенной решетки принимает вид:

$$G(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta - \Psi\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta - \Psi\right)\right)},$$

## Результаты моделирования множителя направленности АФАР

В статье исследуется поведение множителя направленности АФАР только для верхней части области нежелательных излучений. При излучении широкополосного сигнала в верхней области нежелательных излучений отношение  $d/\lambda$  будет возрастать, что будет сопровождаться увеличением электрических размеров антенны при неизменном количестве ее элементов. Такое увеличение будет сопровождаться уменьшением ширины основного лепестка множителя направленности системы. На этом рис. 1 показано влияние увеличения частоты излучения на множитель направленности четырехэлементной АФАР. Здесь множитель направленности (кривая 1) соответствует случаю излучения АФАР с расстоянием между ее элементами, равном половине длины волны ( $d/\lambda = 0,5$ ). Множитель направленности (кривая 2) получен для случая, для которого отношение расстояния между элементами АФАР к длине волны составляет 0,6 ( $d/\lambda = 0,6$ ). Кривой 3 соответствует отношению расстояния между элементами АФАР к длине волны, равному 0,7 ( $d/\lambda = 0,7$ ), а кривой 4 соответствует отношению расстояния между элементами АФАР к длине волны, равному 0,8 ( $d/\lambda = 0,8$ ). Анализ полученных результатов показывает, что увеличению отношения расстояния между элементами АФАР к длине волны с 0,5 до 0,8 соответствует уменьшение ширины основного лепестка множителя направленности АФАР по уровню половинной мощности с 28 градусов до 14 градусов. При этом положение максимума основного лепестка множителя направленности АФАР остается неизменным. Другие лепестки, сравнимые по величине с основным лепестком множителя направленности, отсутствуют.

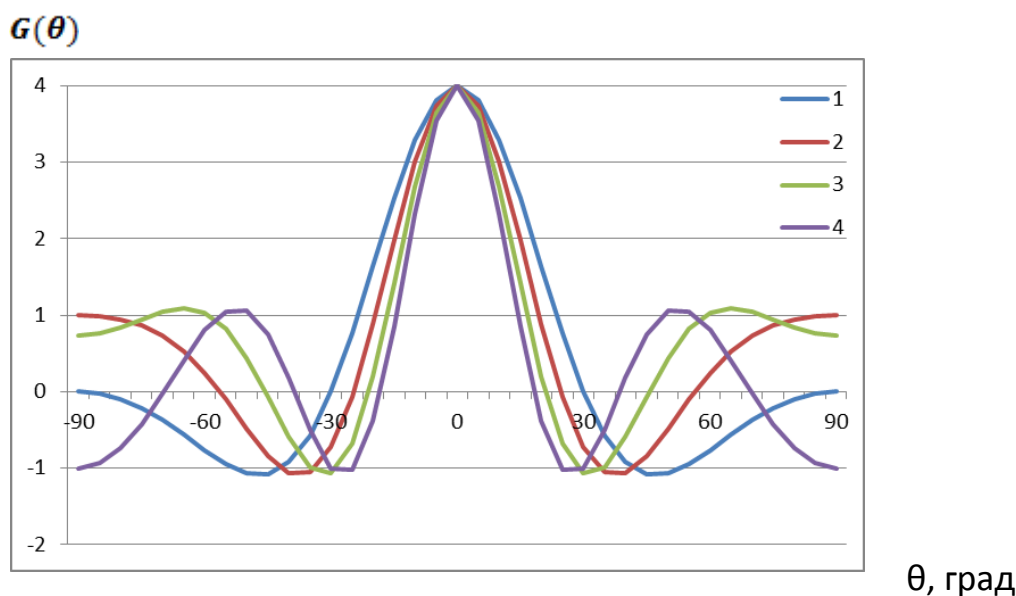
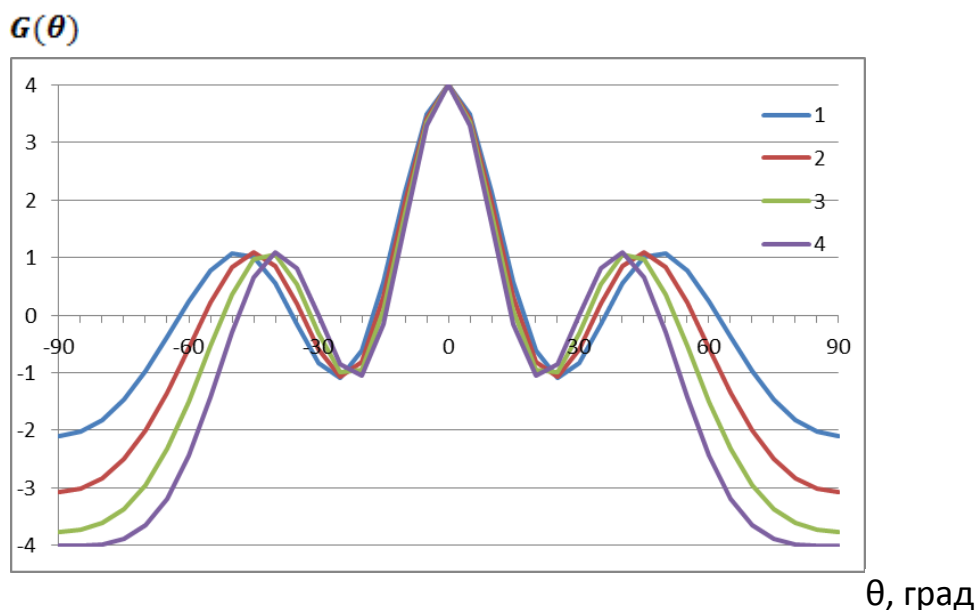


Рисунок 1. Влияние увеличения частоты подводимого сигнала на множитель направленности четырехэлементной АФАР ( $d/\lambda \leq 0,8$ )

Дальнейшее увеличение частоты, при котором отношение  $d/\lambda$  превосходит 0,8, приводит к дополнительному сужению основного лепестка множителя направленности и формированию в направлении оси решетки дифракционных максимумов (рис. 2).



**Рисунок 2. Влияние увеличения частоты излучения на множитель направленности четырех-элементной АФАР ( $d/\lambda > 0,8$ )**

На этом рисунке кривой 1 соответствует отношение  $d/\lambda$ , равное 0,85, кривой 2 – 0,9, кривой 3 – 0,95 и кривой 4 – 1,0 (вторая гармоника). Таким образом, на частоте второй гармоники подводимого сигнала вдоль оси АФАР формируется два интерференционных максимума, ширина которых существенно больше ширины основного лепестка множителя решетки. Максимальная величина модуля интерференционных максимумов равна количеству элементов рассматриваемой АФАР.

Дальнейшее увеличение частоты приводит к тому, что уже сформировавшиеся интерференционные максимумы отклоняются от оси линейной АФАР, а их ширина уменьшается с ростом частоты. В излучении сигнала с частотой четвертой гармоники ( $d/\lambda = 2,0$ ) вдоль оси решетки формируется дополнительная пара интерференционных максимумов. Этот эффект будет достигаться для любой четной гармоники. Таким образом, если в качестве одиночного излучателя АФАР используется достаточно широкополосный слабонаправленный излучатель, на четных гармониках возможно формирование дополнительных интерференционных максимумов, расположенных вдоль оси линейной АФАР. Для нечетных гармоник вдоль оси АФАР формируется нуль множителя направленности.

Аналогичное поведение диаграмм направленности будет наблюдаться и в случае плоских АФАР.

Необходимо отметить, что сдвиг фазы между элементами антенной решетки также приводит к сканированию основного лепестка множителя направленности в области нежелательных излучений. Так, если для резонансной антенны ( $d/\lambda=0,5$ ) сдвиг фазы между элементами АФАР, равный 90 градусов, приводит к отклонению основного лепестка множителя направленности АФАР от нормали к ее оси на 30 градусов, то для второй гармоники ( $d/\lambda=1,0$ ) этот же сдвиг фазы приводит к отклонению основного лепестка множителя направленности на 15 градусов, а для четвертой гармоники ( $d/\lambda=2,0$ ) – на 7,4 градуса. Это расширяет пространственную область, в которой системы подвижной связи 5G способны создавать помехи работе радиосистем.



## Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование широкополосных сигналов, имеющих достаточно высокий уровень мощности в области нежелательных излучений, и АФАР может способствовать увеличению уровня помех. Для уменьшения уровня помех возможны различные подходы. Один из них состоит в выборе сигналов, имеющих меньший уровень в области нежелательных излучений, например GFDM [4]. Второй подход базируется на использовании фильтров для снижения уровня мощности подводимого сигнала в области частот нежелательных излучений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-07-00676.*

## Библиографический список

1. Регламент радиосвязи, т. 1. - Женева: ИТУ, 2016.
2. **Воскресенский, Д. И.** Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. - М., Радиотехника, 2004 г.
3. **Сазонов, Д.М.** Антенны и устройства СВЧ / Сазонов Д.М. - М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
4. **Michailow, N.** et al., Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks//IEEE Transactions on Communications. -2014.- V. 62. - № 9. - P. 3045-3061.

Е.Ю. Гайнулина, В.Н. Иконников, Н.С. Корнев, С.В. Марьевский,  
К.В. Минеев, А.В. Назаров, А.В. Репин, А.В. Родионов

**МАЛОГАБАРИТНАЯ АНТЕННО-ФИДЕРНАЯ СИСТЕМА  
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛОСТЯХ КОНСТРУКЦИЙ**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

В докладе описана малогабаритная антенно-фидерная система (АФС) КВЧ радиоинтерферометра, предназначенная для микроволнового зондирования быстропротекающих процессов. Представленная АФС может быть использована для исследования динамики поверхностей малых полостей конструкций при взрывном нагружении. Приводятся результаты численного моделирования данной АФС.

**Ключевые слова:** антенно-фидерная система, радиоинтерферометр, диэлектрический излучатель, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков.

Перспективным и активно развивающимся методом исследования быстропротекающих газодинамических процессов является микроволновая радиоинтерферометрия. Радиоинтерферометры 3-мм диапазона длин волн, разработанные в НИИИС им. Е.Ю. Седакова, применяются для измерения кинематических и термодинамических параметров фронтов ударных и детонационных волн, исследования движения и деформации металлических пластин, метаемых продуктами взрыва. Кроме того, актуальна задача диагностики реакции конструкций на взрывное нагружение [1,2].

При исследовании динамики поверхностей малых полостей конструкций, АФС вводится через отверстие в металлической или диэлектрической стенке. При этом соединение должно быть герметичным, а излучатель должен удовлетворять достаточно жестким требованиям по габаритам: не более  $2-3\lambda$  по продольной и поперечным координатам при рабочей длине волны  $\lambda=3,2$  мм.

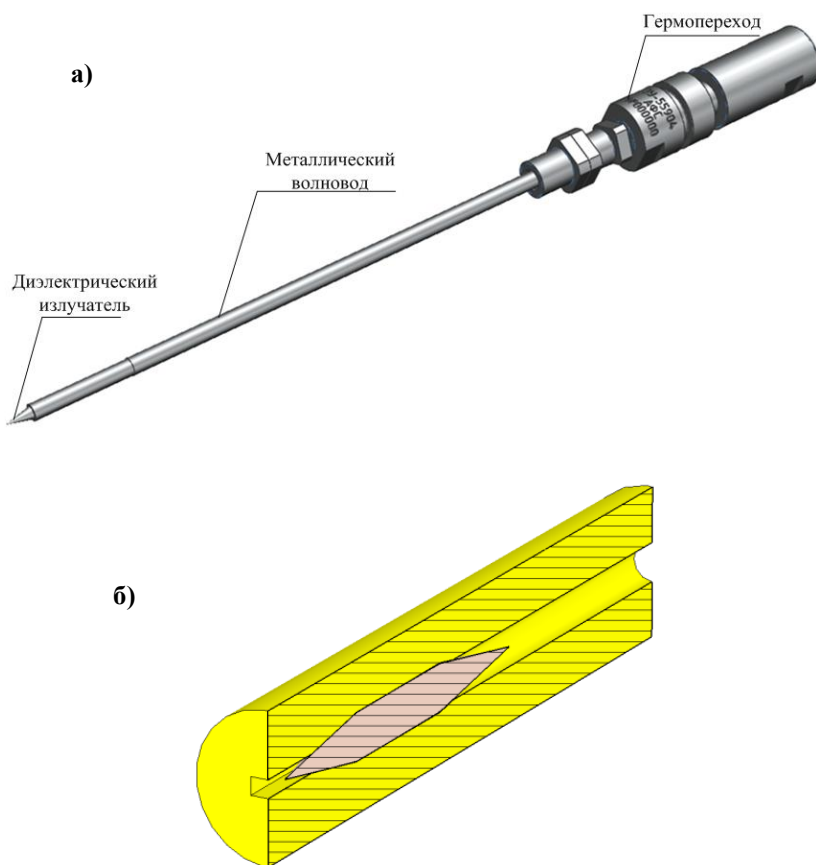
Поскольку микроволновое излучение хорошо отражается от любой достаточно ровной металлической поверхности (с размером шероховатости менее  $\lambda/4$ ), излучение внутри полости будет испытывать многократные отражения. Сама полость при этом является резонатором, что резко снижает точность измерений. Для снижения влияния резонансных явлений АФС должна формировать узкий зондирующий пучок с минимальным пятном зондирования на исследуемом объекте. Кроме того, важно добиться минимального уровня боковых лепестков (УБЛ) формируемой диаграммы направленности (ДН).

В силу жестких ограничений по габаритам, в качестве излучателя может использоваться только одномодовый металлический волновод круглого сечения. Для сужения ДН зондирующего пучка, формируемого на апертуре АФС, используются возбуждаемые волноводом диэлектрические вставки. Направленность волноведущих диэлектрических элементов определяется физической апертурой, то есть поперечным сечением распределения потока мощности волны  $HE_{11}$  со спадом поля на границе сечения на 15..20 дБ. Размер этой пространственной области возрастает с уменьшением сечения стержня, что приводит к сужению ДН и может обеспечивать требуемую ширину ДН. Различные варианты излучателей, выполненных из полистирола, рассмотрены в работе [3].

Возбуждение волны  $HE_{11}$  в диэлектрическом излучателе обеспечивается металлическим волноводом круглого сечения с волной  $H_{11}$ . УБЛ диэлектрического излучателя зависит от согласования полей волн  $H_{11}$  в металлическом волноводе и  $HE_{11}$  в диэлектрической вставке на торце металлического волновода.

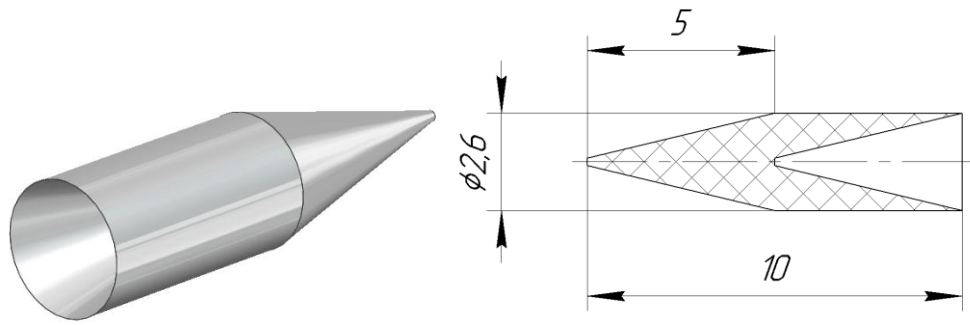
Представленная АФС (рис.1, а) состоит из гермоперехода, фидерной линии, и стержневого излучателя. Гермопереход (рис. 1, б) обеспечивает прохождение зондирующего излучения через АФС и блокирует возможность прохождения газов по волноводному каналу. Он представляет собой волноводный переход с прямоугольного сечения на круглое, в котором на клей установлена изолирующая вставка из кварцевого стекла, имеющая вид стержня с двумя коническими заострениями.

В качестве фидерной линии используется металлический волновод круглого сечения. Внутренний диаметр волновода ограничен снизу значением 1,87 мм, что соответствует критической частоте возникновения основной волны  $H_{11}$ . В представленной АФС внутренний диаметр волновода составляет 2,4 мм.



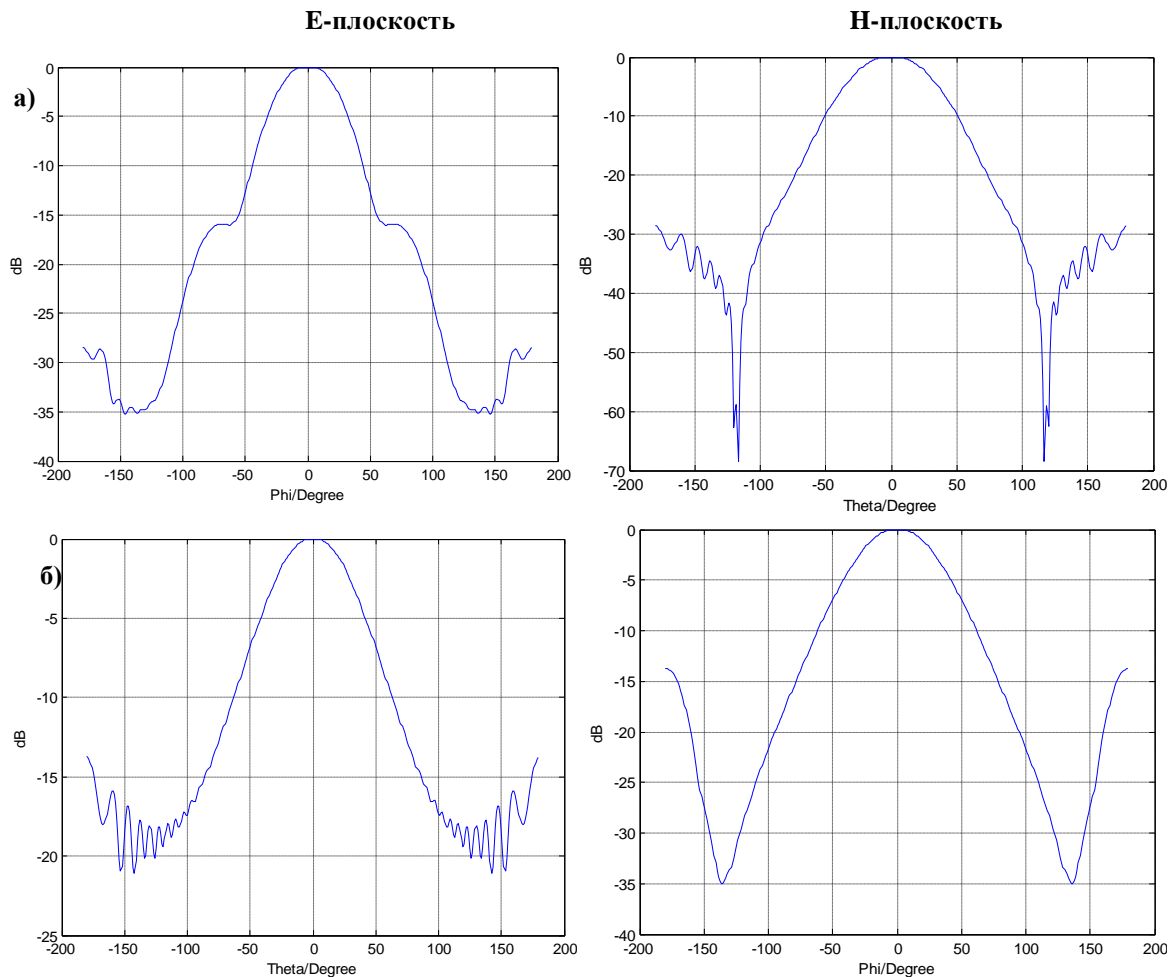
**Рисунок 1.** Малогабаритная АФС: а) общий вид; б) гермопереход в разрезе

Фидерная линия возбуждает излучатель (рис. 2) выполненный из полистирола ( $\epsilon = 2,5$ ) и представляющий собой стержень длиной 10 мм, заостренный на одном конце и имеющий коническое углубление на другом. Помимо формирования зондирующего пучка, полистироловая вставка, закрепленная на клей, обеспечивает дополнительную герметизацию АФС.



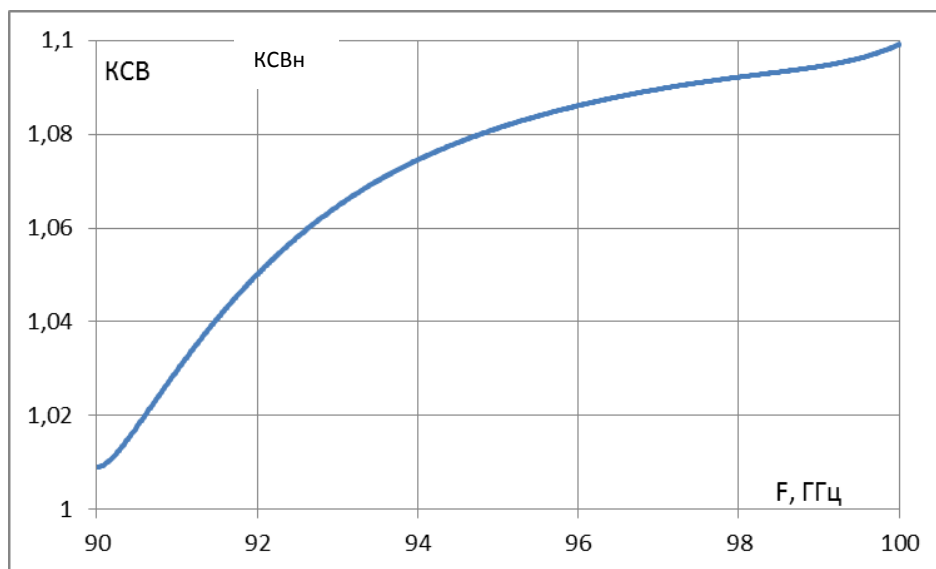
**Рисунок 2. Внешний вид и габаритные размеры стержневого излучателя**

В работе было проведено численное моделирование разработанной АФС в среде CSTMWS[4]. На рис. 3, а приведена ДН, формируемая описанным ранее стержневым излучателем. Ширина главного лепестка составляет  $51,7^\circ$  в Е-плоскости,  $56,1^\circ$  – в Н-плоскости, УБЛ не превышает -16 дБ. Для сравнения, ширина главного лепестка ДН открытого конца круглого волновода составляет  $65,2^\circ$  в Е-плоскости,  $66,1^\circ$  – в Н-плоскости, УБЛ достигает -12,7 дБ.



**Рисунок 3. Диаграмма направленности, формируемая стержневым излучателем (а) и открытым концом волновода (б)**

УБЛ определяется в значительной степени согласованием диэлектрического излучателя на выходе из металлического волновода, что определяет как КСВн (коэффициент стоячей волны по напряжению) тракта АФС, так и уровень паразитного излучения, а следовательно влияет на динамический диапазон интерферометра. Результаты моделирования показывают, что данный стержневой излучатель практически не излучает в заднюю полуплоскость, что означает хорошее согласование с фидерной линией. Из рис.4 видно, что КСВн настоящей АФС в диапазоне 90-100 ГГц не превышает 1,1.



**Рисунок 4. Зависимость КСВн стержневого излучателя от частоты**

Таким образом, разработана малогабаритная АФС КВЧ радиоинтерферометра для микроволнового зондирования быстропротекающих процессов в полостях конструкций. Представленный стержневой излучатель позволил улучшить ДН АФС по сравнению с открытым концом круглого волновода и снизить. АФС обладает электрическими характеристиками, позволяющими повысить информативность микроволнового зондирования в замкнутых объемах, свободное пространство внутри которых сильно ограничено.

Герметизация волноводного тракта малогабаритной АФС обеспечивается за счёт использования гермоперехода со стороны фидерного тракта радиоинтерферометра и за счёт вклейки диэлектрического излучателя в металлический волновод со стороны исследуемого объекта.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

#### **Библиографический список**

1. **Бельский, В.М.** Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов / В.М. Бельский [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 6. – С. 29-41.
2. **Канаков, В.А.** Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов / В.А. Канаков [и др.] // Антенны. – 2016. – Вып. 1 (221). – С. 49-54.

3. **Гайнулина, Е.Ю.** Малогабаритная антенно-фидерная система КВЧ радиоинтерферометра для диагностики газодинамических процессов в замкнутых объемах / Е.Ю. Гайнулина [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 3. – С. 69–75.

4. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

**E.Yu. Gainulina, V.N. Ikonnikov, N.S. Kornev, S.V. Maryevsky,  
K.V. Mineev, A.V. Nazarov, A.V. Repin, A.V. Rodionov**

**SMALL-SIZED ANTENNA-FEEDER SYSTEM FOR MICROWAVE SENSING  
OF FAST-FLOWING PROCESSES IN CAVITIES OF STRUCTURES**

FSUE Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Research Institute of Experimental Physics

The article describes a small-sized antenna-feeder system (AFS) of a EHF radio interferometer designed for microwave sensing of fast-flowing processes. The presented AFS can be used to research the dynamics of small cavities surfaces of structures under explosive loading. The results of numerical simulation of the AFS are presented.

**Key words:** antenna-feeder system, radio interferometer, dielectric emitter, radiation pattern, side lobe level.

**В.Н. Иконников, Н.С. Корнев, Н.А. Макарычев, С.В. Марьевский,  
К.В. Минеев, А.В. Назаров**

## **МЕТОД ПОВЕРКИ РАДИОМЕТРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Описывается предложенный авторами метод поверки радиометров миллиметрового диапазона длин волн, предназначенных для измерения термодинамической температуры газодинамических процессов. На основе предложенного метода возможна разработка методик поверки радиометров в диапазоне температур свыше 2000 К, где использование физических эталонов термодинамической температуры затруднено или невозможно.

**Ключевые слова:** радиометр, яркостная температура, коэффициент отражения, термодинамическая температура, погрешность измерений, поверка.

Основы дистанционных измерений нагретых тел были заложены Карлом Шееле в конце XVIII века в исследованиях так называемой «лучистой теплоты», которую впоследствии стали называть тепловым излучением [1]. Все физические тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля, являются источниками теплового излучения, которое имеет непрерывный электромагнитный спектр во всем диапазоне частот, случайные поляризацию и направление распространения, нормальное с нулевым средним распределение вероятности мгновенных значений поля с дисперсией, прямо пропорциональной мощности излучения [2].

В миллиметровом диапазоне длин волн для измерения мощности теплового излучения применяются радиометры, работающие по принципу измерения средней мощности сигнала на приемной антенне, спектральная плотность которой в приближении Релея-Джинса пропорциональна яркостной температуре исследуемого объекта. Однако, для получения значения истинной (термодинамической) температуры необходимо, кроме измерения яркостной температуры, измерять еще и коэффициент отражения от поверхности исследуемого объекта, то есть реализовывать активно-пассивный режим измерений [3]. Здесь и далее по тексту статьи под активно-пассивным режимом работы понимается использование в качестве зондирующего сигнала подсветки узкополосного сигнала передатчика с частотой, попадающей в рабочую полосу широкополосного приемника.

В этом случае термодинамическая температура рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{T_y}{1 - R^2}, \quad (1)$$

где  $T_y$  – яркостная температура исследуемого объекта,  $R$  – коэффициент отражения от поверхности объекта (по амплитуде).

При разработке радиометра как измерительного прибора встает вопрос обеспечения единства измерений. В Российской Федерации в соответствии с ГОСТ 8.061-80 передача размера единицы физической величины от эталонов рабочим средствам измерений осуществляется с помощью поверочных схем. Поэтому для поверки активно-пассивного радиометра необходимо иметь эталонный эквивалент термодинамической температуры, у которого погреш-

ность воспроизведения термодинамической температуры минимум в 3 раза меньше, чем погрешность ее измерения поверяемым прибором.

Согласно ГОСТ 8.558-2009, рабочие эталоны обеспечивают физическое воспроизведение термодинамической температуры только до 1800 °С. Однако эталонные излучатели в микроволновой области спектра, являющиеся электронными эквивалентами абсолютно-черных тел, позволяют воспроизводить температуру до 100 000 °С, но с их помощью можно провести поверку радиометров только в режиме измерений яркостной температуры.

Ввиду отсутствия аттестованных физических источников термодинамической температуры свыше 1800 °С для поверки радиометра миллиметрового диапазона длин волн по термодинамической температуре авторами предлагается метод поверки с разделением измерений яркостной температуры и коэффициента отражения.

Суть предложенного метода заключается в следующем: с помощью эталонного генератора шума и градуированного перестраиваемого аттенюатора перекрывается рабочий диапазон измерений яркостной температуры  $T_{я}$ , с помощью набора поверочных мер КСВН перекрывается рабочий диапазон измерений коэффициента отражения  $R$ . Каждому значению  $T_{я}$  сопоставляется значение  $R$  и по формуле (1) рассчитывается воспроизводимая термодинамическая температура  $T_{воспр}$ , где устанавливаемая с помощью генератора шума и перестраиваемого аттенюатора яркостная температура рассчитывается по формуле:

$$T_{я} = \frac{T_{ГШ}}{G}, \quad (2)$$

$T_{ГШ}$  – паспортное значение воспроизводимой генератором шума яркостной температуры;  $G$  – линейный коэффициент ослабления перестраиваемого аттенюатора ( $G > 1$ ).

Значение коэффициента отражения от поверочной меры КСВН рассчитывается по паспортному значению КСВН используемой меры:

$$R = \frac{КСВН - 1}{КСВН + 1}. \quad (3)$$

Погрешность воспроизведения термодинамической температуры будет определяться как погрешность косвенных измерений яркостной температуры и коэффициента отражения:

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{T_{я}}^2 + \Delta T_R^2}, \quad (4)$$

где:

$$\Delta T_{T_{я}} = \left| \frac{\partial T}{\partial T_{я}} \right| \Delta T_{я} = \frac{\Delta T_{я}}{1 - R^2}, \quad (5)$$

$$\Delta T_R = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \Delta R = \frac{2R \Delta R T_{я}}{(R^2 - 1)^2}, \quad (6)$$

$\Delta T_{я}$  – абсолютная погрешность установки яркостной температуры генератором шума и перестраиваемым аттенюатором;

$\Delta R$  – абсолютная погрешность установки коэффициента отражения поверочной мерой КСВН.

Абсолютная погрешность установки яркостной температуры определяется по формуле:



$$\Delta T_{я} = T_{я} \sqrt{\varepsilon_G^2 + \varepsilon_{ГШ}^2}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_G$  – паспортное значение относительной погрешности установки ослабления аттенюатора (в линейной шкале);  $\varepsilon_{ГШ}$  – паспортное значение относительной погрешности воспроизведения яркостной температуры генератором шума.

Абсолютная погрешность установки коэффициента отражения поверочной мерой КСВН выражается через паспортную погрешность воспроизведения значения КСВН по формуле:

$$\Delta R = \left( \frac{1}{КСВН + 1} - \frac{КСВН - 1}{(КСВН + 1)^2} \right) \cdot \varepsilon_{КСВН} \cdot КСВН, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{КСВН}$  – предел допускаемой относительной погрешности аттестации меры по КСВН.

Перед началом поверки радиометр калибруется по опорному источнику яркостной температуры, в качестве которого, как правило, используются термостабилизированные эквиваленты абсолютно черных тел, ламповые или полупроводниковые генераторы шума.

На первом этапе поверки собирается схема для измерения воспроизводимой яркостной температуры, представленная на рис. 1.

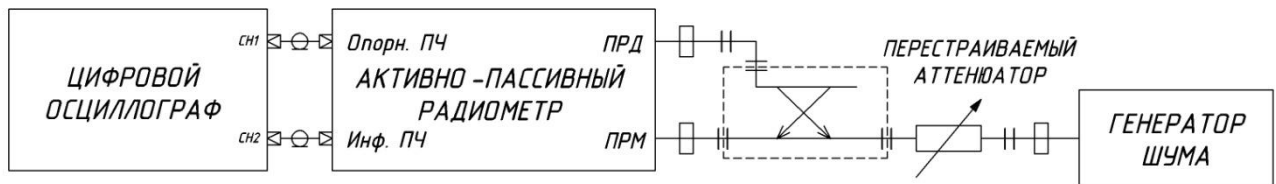


Рисунок 1. Схема измерений яркостной температуры

С помощью перестраиваемого аттенюатора в рабочем диапазоне измеряемых яркостных температур радиометра последовательно устанавливаются несколько дискретных значений воспроизводимой яркостной температуры  $T_{я i}$  от  $T_{я \min}$ , которое не может быть меньше значения температуры окружающей среды, до  $T_{я \max}$ , которое не может превышать паспортного значения яркостной температуры генератора шума, и проводятся соответствующие измерения.

На втором этапе поверки генератор шума вместе с перестраиваемым аттенюатором отсоединяется от фидерной системы радиометра, а на их место устанавливается нагрузка короткозамкнутая подвижная из набора поверочных мер КСВН, как представлено на рис. 2.



Рисунок 2. Схема измерений амплитуды отраженного сигнала

В данном случае короткозамкнутая нагрузка выступает в качестве эталонной отражающей поверхности, имеющей коэффициент отражения, близкий к единице, по которой происходит калибровка амплитудных измерений активно-пассивного радиометра.

В процессе измерений оператор вращает микрометрический винт нагрузки короткозамкнутой и регистрирует изменения амплитуды, вызванные рассогласованием тракта (в пределах одной длины волны погонными потерями в закрытом тракте можно пренебречь). В случае наличия в приеме-передатчике активно-пассивного радиометра вывода промежуточной частоты (ПЧ) опорного сигнала по зарегистрированным цифровым осциллографом опорному и информационному сигналам производится квадратурная обработка с последующим вычислением амплитуды отраженного сигнала. В случае невозможности регистрации опорного сигнала ПЧ амплитуда отраженного сигнала вычисляется как медианное значение между минимумом и максимумом в пределах одного периода биений. Стоит отметить, что в данном случае квадратурная обработка является наиболее предпочтительной, так как позволяет полностью исключить погрешность, вносимую рассогласованием фидерного тракта и поверочной меры КСВН.

Затем в схеме из рис.2 нагрузка короткозамкнутая подвижная заменяется на нагрузку рассогласованную подвижную с известным значением коэффициента отражения, и амплитудные измерения повторяются. В зависимости от поверяемого рабочего диапазона активно-пассивного радиометра выбирается необходимое количество нагрузок.

Для каждой рассогласованной нагрузки вычисляется измеренный коэффициент отражения по формуле:

$$R_j = \frac{U_{нагр j}}{U_{кз}}, \quad (9)$$

где  $U_{нагр j}$  – амплитуда сигнала, отраженного от  $j$ -й нагрузки рассогласованной;  $U_{кз}$  – амплитуда сигнала, отраженного от нагрузки короткозамкнутой.

Затем каждому значению  $T_{я i}$  сопоставляется значение  $R_j$  и по формуле (1) рассчитывается измеренная радиометром термодинамическая температура  $T_{изм ij}$ .

Если для каждой пары значений  $T_{я i}$  и  $R_j$  термодинамическая температура  $T_{изм ij}$  попадает в доверительный интервал ( $T_{воспр} \pm 3\Delta T$ ), считается, что поверка пройдена успешно. Для более точного контроля цикл измерений необходимо повторить несколько раз.

Преимуществом предложенного метода поверки является относительная простота реализации поверочных схем. Благодаря полному перекрытию рабочего диапазона измеряемых термодинамических температур не требуется отдельного доказательства линейности амплитудной характеристики приемного тракта радиометра.

Из недостатков стоит отметить отсутствие на данный момент высокостабильных широкополосных генераторов шума, у которых равномерность спектральной плотности мощности избыточного шума в рабочей полосе составляет менее 5%, а также невозможность поверки радиометров со штатной антенной системой.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

2. Краус, Дж.Д. Радиоастрономия; пер. с английского под. ред. Железнякова В.В. – М.: Изд-во «Сов. Радио», 1973. – 456 с.

3. Ботов, Е.В. Измерение кинематических и тепловых характеристик быстропротекающих газодинамических процессов с помощью комплекса микроволнового зондирования / Е.В. Ботов [и др.] // Труды Международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения: в двух томах. – Саров: ФНЦП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018. – Т.2. – С. 300-302.

**V.N. Ikonnikov, N.S. Kornev, N.A. Makarichev, S.V. Maryevsky,  
K.V. Mineev, A.V. Nazarov**

## **METHOD OF VERIFICATION MILLIMETER-WAVES RADIOMETERS**

Branch of the FSUE Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics Research Institute of Measuring Systems n.a. Yu. Ye. Sedakov,  
Nizhny Novgorod, Russia

The article describes the method proposed by the authors for verification millimeter-waves radiometers designed to measure the thermodynamic temperature of gas-dynamic processes. Based on the proposed method it is possible to develop methods for verification radiometers in the temperature range above 2000 K where the use of physical standards of thermodynamic temperature is difficult or impossible.

**Key words:** radiometer, brightness temperature, reflection coefficient, thermodynamic temperature, measurement error, verification.

А.Д. Дорогов, С.Е. Минеев, А.В. Назаров, Р.Р. Османов, Д.К. Рыбаков

## К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ТЕПЛОВОЙ БАТАРЕИ ТБ-27-В ДЛЯ ПИТАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

В докладе представлены результаты исследования тепловой батареи ТБ-27-В. Показана возможность её применения в качестве источника тока для малогабаритного радиолокационного датчика.

**Ключевые слова:** источник питания, тепловая батарея, радиолокационный датчик.

В настоящее время все большую актуальность приобретает минимизация массы и габаритов радиолокационных систем ближнего действия, в частности радиолокационных датчиков (РД) различного назначения.

Одним из узлов, значительно влияющих на массогабаритные характеристики РД, является источник питания. Для питания РД используются химические источники тока (ХИТ) различного типа [1]. Они подразделяются на первичные, вторичные и топливные элементы. Первичные ХИТ предназначены для одноразового использования. Такие ХИТ содержат определенное количество активных веществ, после их израсходования первичные ХИТ теряют работоспособность. Процесс генерации энергии в ХИТ называется разрядом. Обычно свежесготовленный или хранившийся на складе ХИТ сразу готов к работе. Однако существует определенная категория резервных ХИТ, которые хранятся в не активированном состоянии. В таких ХИТ электролит либо хранится в жидком виде в отдельных емкостях и заливается в элементы непосредственно перед началом эксплуатации, либо электролит является твердым и не проводит ток, а активация элемента состоит в его разогреве до температуры, превышающей температуру плавления электролита [2]. После расплавления электролит приобретает высокую ионную проводимость и становится готовым к работе. В связи с этим такие ХИТ не имеют саморазряда и способны к длительному хранению.

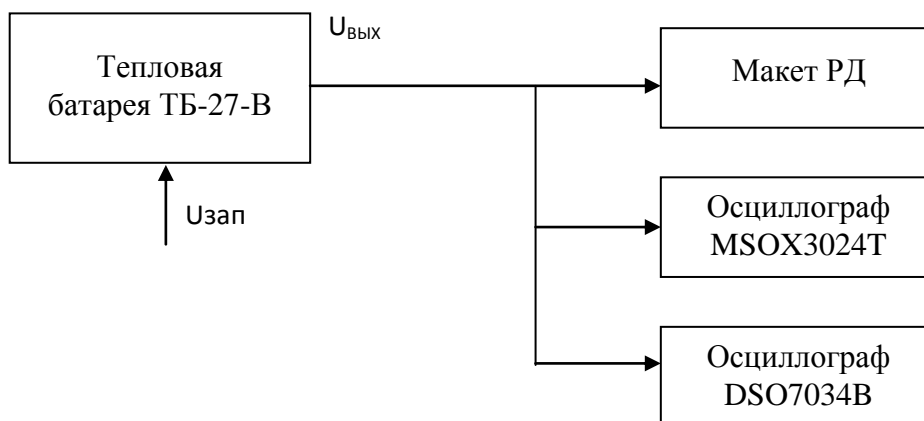
Далее представлены результаты исследования электрических характеристик тепловой батареи (ТБ) ТБ-27-В производства ОАО «Энергия», г. Елец. Габариты ТБ: диаметр 27 мм, длина 32 мм. Внешний вид батареи приведен на рис. 1.



Рисунок 1. Внешний вид ТБ - 27 - В

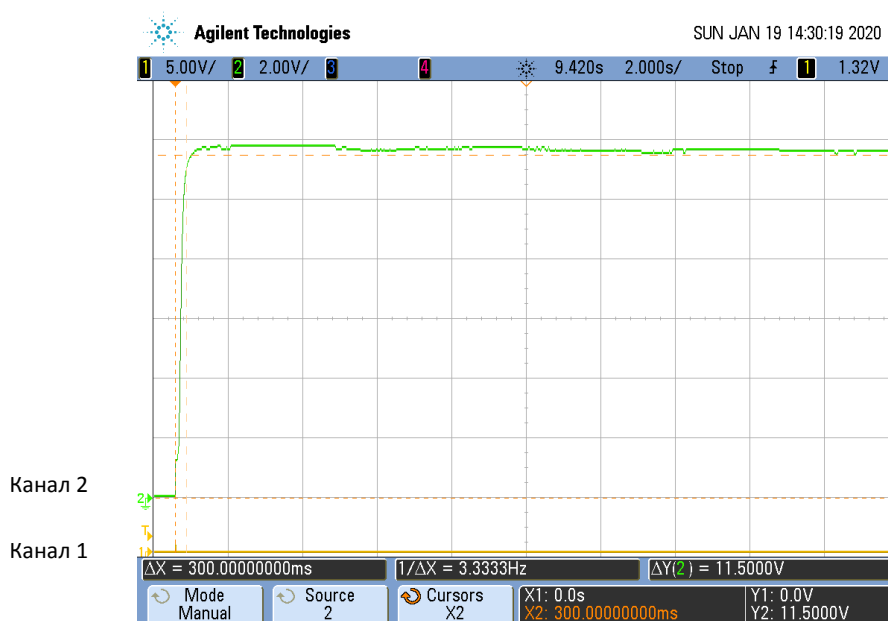
В данной тепловой батарее анодная и катодная части электрохимических элементов разделены перегородкой, которая при активации расплавляется теплом пиротехнической смеси [3]. Достоинством ТБ являются высокая удельная мощность, широкий температурный рабочий диапазон (-60...+70 °С) и длительный срок хранения без саморазряда.

В ходе проведенных работ исследовалась зависимость выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) батареи от времени её работы. Схема измерения представлена на рис. 2.



**Рисунок 2. Схема измерения выходного напряжения батареи как функции времени ее работы**

В качестве нагрузки батареи использовался макет радиодатчика с током потребления около 0,5 А. Осциллографы были установлены в режим однократного запуска. Скорость развертки осциллографа MSOX3024T - 20 с/деление, осциллографа DSO7034B - 2 с/деление. Для включения тепловой батареи и запуска развертки осциллографов использовался прямоугольный импульс напряжения амплитудой не менее 3 В и длительностью около 3 мс.



**Рисунок 3. Сигнал запуска тепловой батареи**

На рис. 3 представлены эпюры напряжения, соответствующие запуску и первым секундам работы тепловой батареи. Канал 1 - запускающий импульс, канал 2 - выходное напряжение тепловой батареи. Масштаб по горизонтали - 2 с/деление, по вертикали - 5 В/деление для канала 1 и 2 В/деление для канала 2. Из рис. 3 видно, что примерно через 0,3 мс на выходе тепловой батареи устанавливается напряжение около 11,7 В.

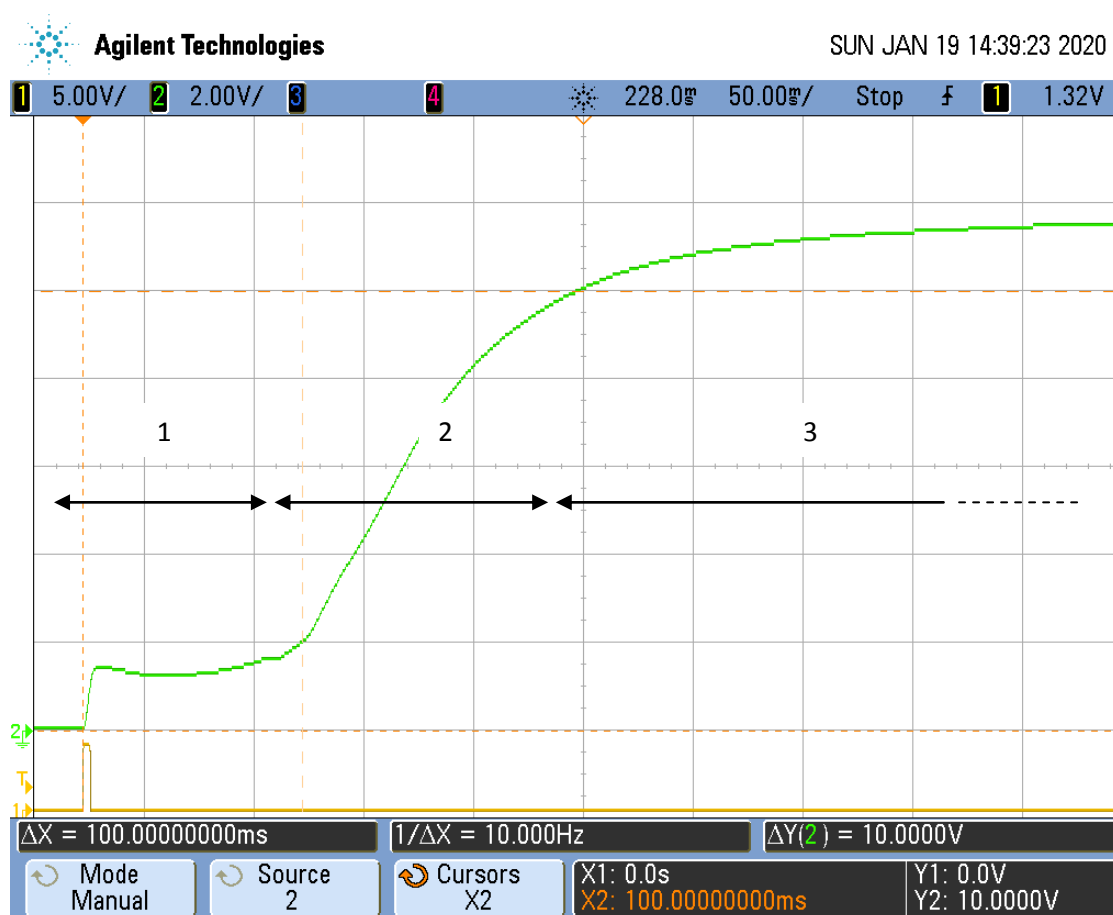
На рис. 4 более подробно представлен запуск тепловой батареи (масштаб по горизонтали - 50 мс/деление).

На данном рисунке можно выделить три характерные области:

1 - запуск (длительностью 0,1 мс). Выходное напряжение тепловой батареи при этом не превышает 2 В.

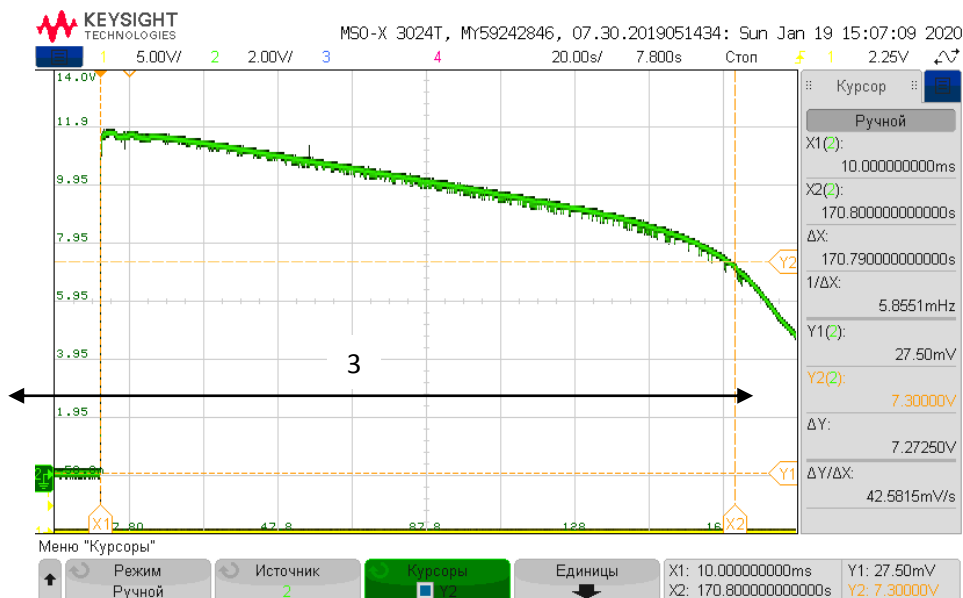
2 - выход на рабочий режим (длительностью 0,13 мс). Выходное напряжение тепловой батареи возрастает от 2 до 10 В.

3 - рабочий режим.



**Рисунок 4. Переходная характеристика, соответствующая запуску тепловой батареи**

На рис. 5 представлена разрядная характеристика тепловой батареи. Выходное напряжение тепловой батареи быстро достигает максимума, составляющего примерно 11,7 В, и начинает плавно уменьшаться. Радиодатчик продолжает работать вплоть до момента времени, соответствующего курсору X2 (170,8 с). Здесь выходное напряжение тепловой батареи начинает снижаться более резко и становится недостаточным для работы радиодатчика.



**Рисунок 5. Разрядная характеристика тепловой батареи**

Следует отметить, что для устойчивой работы РД напряжение питания должно быть не менее 9 В. Таким образом, проведенные исследования показали, что тепловая батарея обеспечивает работу радиодатчика в течение не менее двух минут. При этом выходное напряжение изменяется в пределах (11,7 - 9) В. Время выхода на рабочий режим составляет около 0,23 с.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### **Библиографический список**

1. Химические источники тока : справочник / под ред. Н.В. Коровина. - М. : Изд-во Моск. энерг. ин-та, 2003. - 740 с.
2. **Кукоз, Ф.И.** Тепловые источники тока / Ф.И. Кукоз, Ф.Ф. Труш, В.И. Кондратенков. - Ростов н/Д : Изд-во Рост. ун-та, 1989. - 208 с.
3. Современные проблемы пиротехники : мат. III Всерос. конф., Сергиев Посад, 20-22 октября 2004 г. - Сергиев Посад : Весь Сергиев Посад, 2005. 376 с.

**A.D. Dorogov, S.E. Mineev, A.V. Nazarov, R.R. Osmanov, D.K. Rybakov**

### **ON THE ISSUE OF USING THE TB-27-V THERMAL BATTERY TO POWER RADAR SENSORS**

RFNC-VNIIEF

The report presents the results of a study of the TB-27-b thermal battery. The possibility of using it as a current source for a small-size radar sensor is Shown.

**Key words:** current source, thermal battery, radar.

**Н.В. Сильянов**

**АПРОБАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНИЧНОГО СКАНИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСХЕМ  
1890ВМ8Я И 1914ВА018А**

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Показана возможность автоматизированного тестирования электронных модулей с некоторыми российскими микросхемами, поддерживающими технологию граничного сканирования. Проведена верификация микросхем 1890ВМ8Я и 1914ВА018А на соответствие стандарту IEEEStd. 1149.1.

**Ключевые слова:** технология граничного сканирования, JTAG ProVision, 1890ВМ8Я, 1914ВА018А, автоматизация тестирования.

**Цель исследований**

Проверка применимости инструментов граничного сканирования для автоматизированного решения задач технической диагностики электронных модулей разработки НИИИС, обладающих затрудненным тестовым доступом из-за высокой плотности монтажа и использования микросхем в BGA-корпусах. Под инструментами граничного сканирования понимается как встроенная в некоторые микросхемы дополнительная тестовая логика по стандарту IEEEStd. 1149.1 [1], так и внешние программно-аппаратные средства на примере продукции компании JTAG Technologies [2].

**Объекты исследований**

Объекты исследований представляют собой электронные модули, разработанные и изготовленные в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», с применением СБИС в BGA-корпусах:

- плата системная контроллера ЧПУ 9У-3825 (рис. 1) с микропроцессором 1890ВМ8Я разработки НИИСИ РАН,
- модуль обработки малогабаритного вычислителя 9У-3743 (рис. 2) с микроконтроллером 1914ВА018А разработки НИИИС.

**Задачи исследований**

- верификация тестовых моделей (bsdl-файлов) для микросхем с поддержкой граничного сканирования 1890ВМ8Я, 1914ВА018А,
- автоматический анализ тестового покрытия электронных модулей 9У-3743, 9У-3825,
- проверка тестового доступа к электронным модулям 9У-3743, 9У-3825 через цепи граничного сканирования (тест инфраструктуры),
- определение соответствия тестовой логики микроконтроллера 1914ВА018А и микропроцессора 1890ВМ8Я стандарту IEEE 1149.1,



- автоматическая генерация и проведение тестов внутриплатных соединений, разъемов высокоскоростной памяти (DIMM), микросхем запоминающих устройств,
- проверка тестового доступа к ARM-ядру микроконтроллера 1914BA018A с помощью средств Core Commander.



Рисунок 1. Плата системная с микропроцессором 1890M8Я

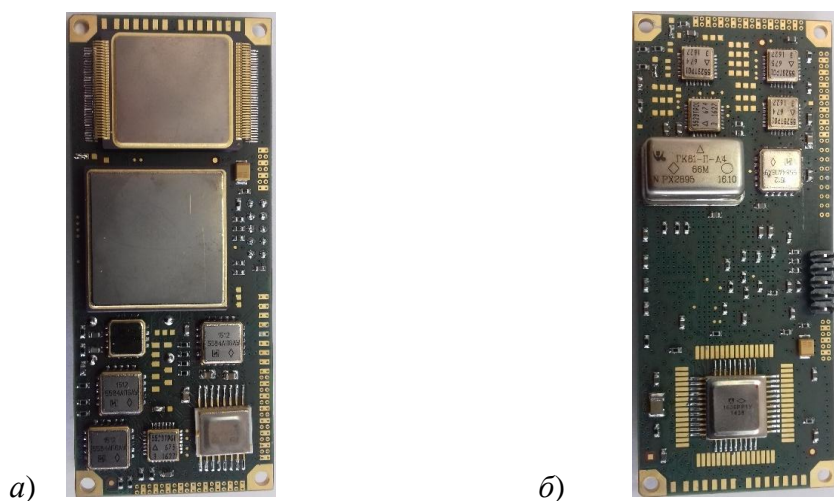


Рисунок 2. Верхняя (а) и нижняя (б) стороны модуля обработки на основе СБИС 1914BA018A

## Список применяемых программно-аппаратных средств

- САПР JTAG ProVision,
- Контроллер граничного сканирования JT37x7 с разветвителем JT2148 и оконечными устройствами JT2149,
- модуль цифрового ввода-вывода DIOS JT2111/MPV,
- модуль цифро-аналогового ввода-вывода MIOS JT5112,
- модуль цифрового ввода-вывода для тестирования разъемов динамической памяти DIMM Dios JT2127/240-3,
- ноутбук Acer Aspire 4830TG,
- источник питания Agilent E3630A,
- источник питания 10У-3748,
- дополнительные блоки питания, жгуты и кабели.

## Методика исследований

- анализ bsd1-файлов на микросхемы 1890BM8Я, 1914BA018A с помощью BSD1 Verifier,
- анализ списков соединений электронных модулей 9У-3743, 9У-3825 и расчет тестового покрытия в САПР JTAG ProVision,
- выполнение теста инфраструктуры электронных модулей, анализ соответствия реализации логики граничного сканирования стандарту 1149.1,
- генерация тестов в САПР JTAG ProVision, запуск тестов на выполнение, анализ результатов,
- тест доступа к ядру ARM-Cortex-M через Core Commander.

## Результаты исследований

Верификация bsd1-файлов для микросхемы 1890BM8Я (для ядра и для системного контроллера) прошла успешно. Для микроконтроллера 1914BA018A в bsd1-файле были уточнены обозначение корпуса, описание типа двунаправленных портов, добавлен атрибут команды захвата, исправлены синтаксические ошибки и опечатки. После внесения перечисленных изменений верификация файла для 1914BA018A прошла успешно.

На основе списков соединений электронных модулей 9У-3743, 9У-3825 в JTAG ProVision был проведен анализ их тестового покрытия. Для платы системной контроллера ЧПУ 9У-3825 покрытие составило 46% цепей от их общего количества. Для модуля обработки малогабаритного вычислителя 9У-3743 тестовое покрытие составило 31%.

Тест инфраструктуры для платы системной контроллера ЧПУ прошел успешно (рис. 3). Из рисунка видно, что для СБИС 1890BM8Я в цепочку граничного сканирования объединены два MIPS-ядра и системный контроллер.

Для модуля обработки малогабаритного вычислителя тест инфраструктуры прошел с ошибками. Тест инструкции захвата для СБИС 1914BA018A закончился с результатом «хх10» вместо «хх01», что является нарушением стандарта IEEE 1149.1. Тест регистра граничного сканирования прошел успешно, что позволяет перейти к следующему этапу исследований.

Для обоих электронных модулей с помощью JTAG ProVision были автоматически сгенерированы тесты внутрисхемных соединений.

При запуске тестов для платы контроллера ЧПУ 9У-3825 были обнаружены ошибки (рис. 4). Последующий анализ показал, что ошибки обусловлены дополнительным навесным монтажом, который никак не учитывался в используемом ProVision списке соединений платы.

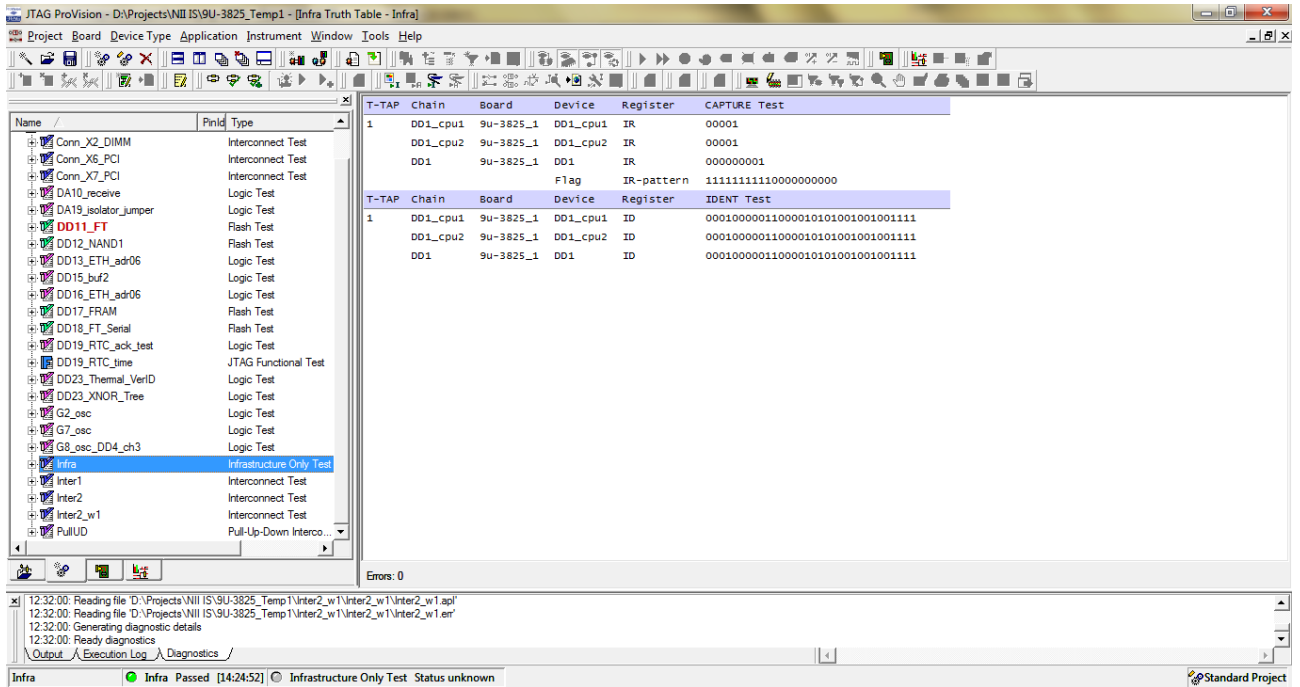


Рисунок 3. Пример результата теста инфраструктуры

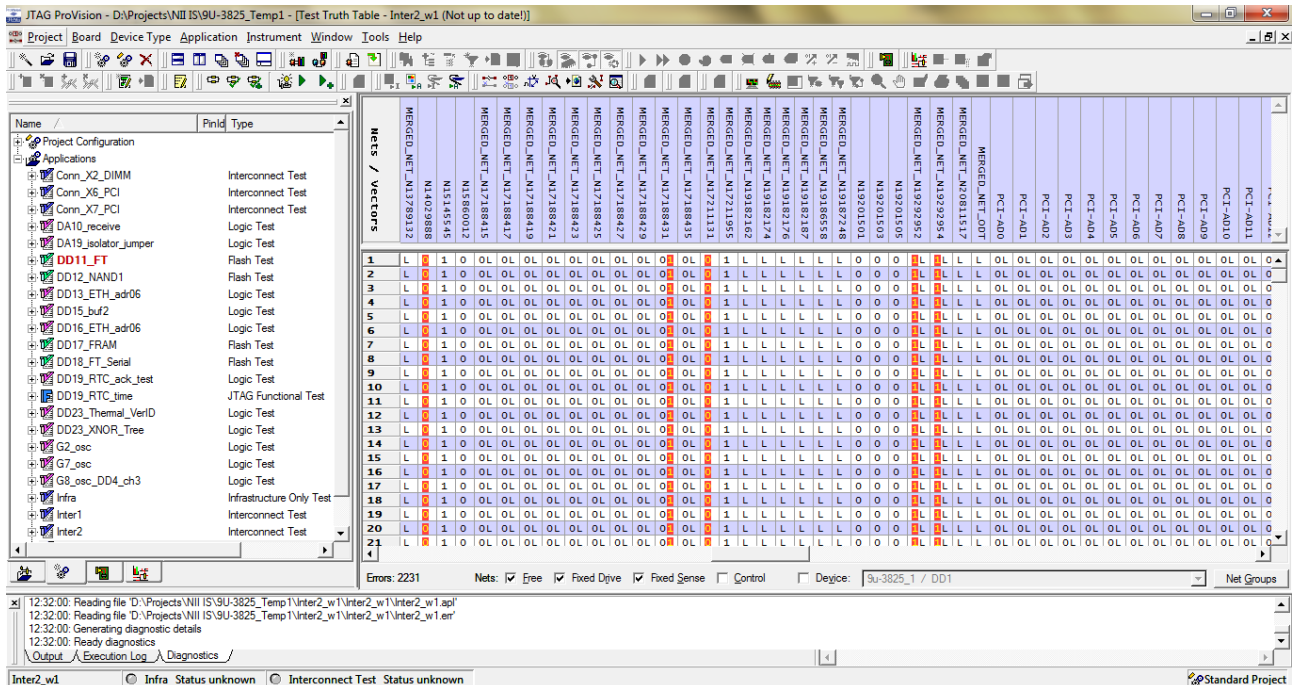


Рисунок 4. Пример результатов теста соединений

Кроме этого, обнаружено перепутывание выводов на шине PCI в цепи PCI\_AD20, которая для конфигурирования устройства соединена через переключатель с цепью PCI\_IDSEL. Вместо контакта PCI\_AD20 ProVision отображает контакт PCI\_AD11 (рис. 5). Проведенный анализ

показал, что в bsd1-файле на СБИС 1890ВМ8Я приведено неправильное описание порта PCI\_AD: при заданном перечислении контактов в атрибуте PIN\_MAP порт PCI\_AD должен быть определен как bit\_vector (31 downto 0) вместо bit\_vector (0 to 31).

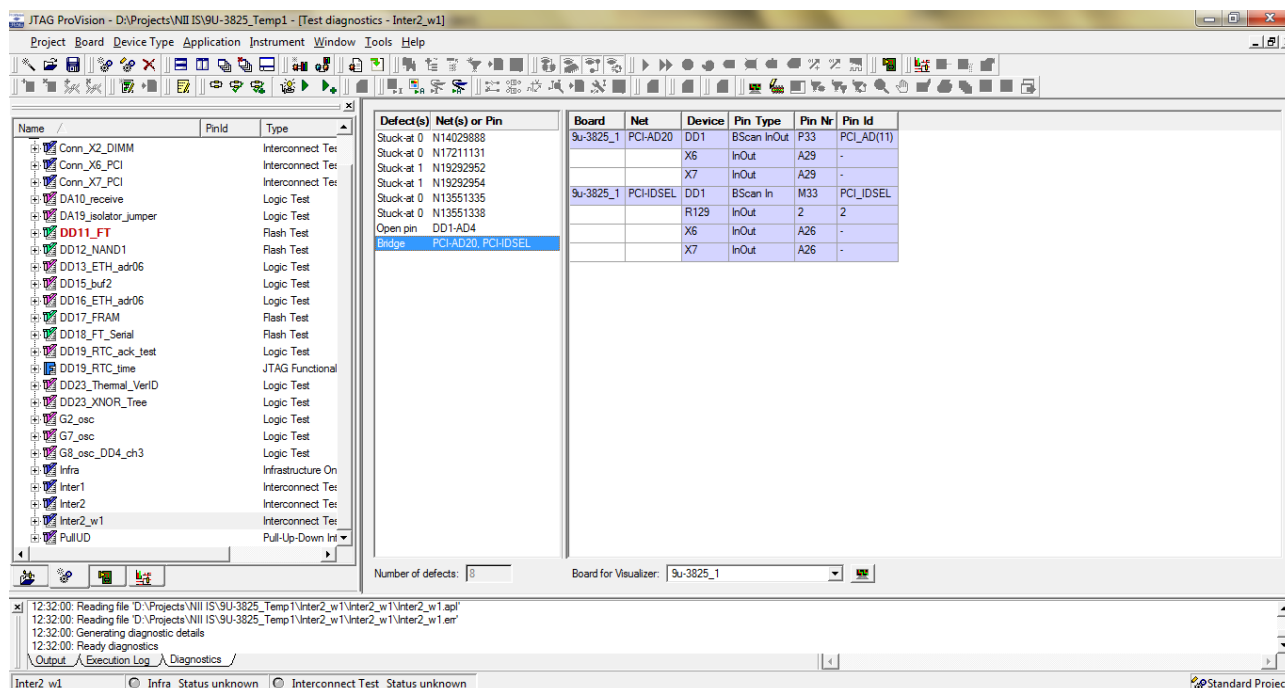


Рисунок 5. Пример детализации дефекта

Аналогичное несоответствие для цепей DDRx\_DQ не позволило наблюдать успешное выполнение теста разъема DRAM-памяти с помощью специализированного модуля ввода-вывода DIMMDiosJT2127.

При запуске тестов соединений для модуля обработки малогабаритного вычислителя 9У-3743 ошибок обнаружено не было. Далее было внесено короткое замыкание на шине данных между линиями D0-D1. Последующее тестирование с помощью JTAG ProVision показало наличие лишней цепи между соответствующими контактами.

Дополнительно для модуля обработки были созданы (на основе имеющихся прототипов) модели микросхем ОЗУ 1668РА024 (512Кx8) и flash-памяти 1636PP1У (512Кx8). После этого были сгенерированы соответствующие тесты памяти, и наблюдалось их успешное выполнение. Также для СБИС 1914ВА018А модуля обработки был успешно опробован тестовый доступ к ARM-ядру с помощью надстройки Core Commander.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что электронные модули разработки филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (плата системная контроллера ЧПУ 9У-3825 и модуль обработки малогабаритного вычислителя 9У-3743) могут быть диагностированы с использованием технологии граничного сканирования,

Выявленные в ходе исследований несоответствия в моделях микросхем и списке цепей одной из плат не позволили в полной мере продемонстрировать преимущества программно-аппаратных средств компании JTAGTechnologies (неудачные тесты инфраструктуры для 9У-3743 и тесты DRAM-разъема для 9У-3825). Несмотря на это, была показана эффективность

рассматриваемых инструментов для решения широкого круга задач технической диагностики (анализ тестового покрытия, автоматическая генерация тестовых векторов для поиска коротких замыканий, обрывов и других неисправностей цепей, автоматическое тестирование микросхем запоминающих устройств, прямой тестовый доступ к ядру через CoreCommander),

Внедрение данной технологии с рассмотренными программно-аппаратными средствами обеспечит ряд преимуществ при проверке правильности сборки электронных модулей серийных приборов, поиске неисправностей в виде коротких замыканий или обрывов цифровых цепей:

- 1) увеличит достоверность и полноту контроля,
- 2) снизит влияние человеческого фактора,
- 3) снизит время и трудоемкость процессов проверки,

В ходе исследований было экспериментально установлено, что СБИС 1914ВА018А разработки НИИИС соответствует стандарту IEEE 1149.1 в части реализации регистра граничного сканирования и функционирования конечного автомата управления тестовым доступом. Не соответствие стандарту, выявленное тестом инфраструктуры, не препятствует решению задач диагностики с использованием ячеек граничного сканирования,

В ходе исследований экспериментально установлено, что СБИС 1890ВМ8Я разработки НИИСИ РАН соответствует стандарту IEEE 1149.1, однако для достоверного диагностирования модулей необходима коррекция определений многоуровневых портов ввода-вывода в bsd1-файле на микросхему.

### Рекомендации

При разработке СБИС микроконтроллеров, ПЛИС, БМК, многокристальных сборок независимо от типа корпуса необходимо внедрять в микросхемы тестовую логику по стандарту IEEE 1149.1, при разработке СБИС с LVDS-интерфейсами дополнительно внедрять тестовые средства по стандарту IEEE 1149.6,

При выборе элементной базы для разработки новых электронных модулей предпочтение следует отдавать микросхемам с поддержкой технологии граничного сканирования по стандартам IEEE 1149.1, 1149.6.

*Исследования выполнены в рамках обучающего семинара по технологии тестирования и диагностике дефектов на сложных цифровых платах, проведенного на базе филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова». Автор благодарит за помощь в организации и проведении исследований Иванова А.В., Чхутиашивили Г.И. (JTAG TechnologyRussia, г. Санкт-Петербург), Шиндера Е.Я. (Остек-Электро, г. Москва), Степанова А.Н. (филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород).*

### Библиографический список

1. IEEEStd 1149.1-2001. IEEE Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture / The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2001.
2. **Иванов, А.В.** Инструменты для периферийного сканирования: тестирование плат и отладка функциональных узлов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9. – С. 162-166.

**N.V. Sil'yanov**

**APPROBATION OF BOUNDARY SCAN SUPPORT FOR ELECTRONIC MODULES  
BASED ON 1890VM8YA AND 1914VA018A CHIPS**

Branch of the RFNC-VNIIEF "NIIS n.a. Yu.Ye. Sedakov", Nizhniy Novgorod

Automated fault locating in electronic modules with several Russian chips supporting boundary scan is shown. 1890VM8YA and 1914VA018A chips are verified to compliance with the requirements of IEEE Std. 1149.1.

**Keywords:** boundary scan, JTAG ProVision, 1890VM8YA, 1914VA018A, fault locating automation.



Я.А. Игошев, Р.А. Ершов, В.Р. Фидельман

**АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЗАИМНОЙ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ MPI И NVIDIA CUDA**

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Среди решаемых задач современной цифровой обработки сигналов огромное значение имеет проблема обнаружения и позиционирования излучающего объекта в реальном масштабе времени методами пассивной пеленгации. Решение данной проблемы, например, разностно-дальномерным методом, требует оценки взаимных временных задержек распространения сигнала, для определения которых обычно применяют методы корреляционного анализа. Однако в системах связи с подвижными объектами, применение корреляционных методов требует компенсации искажения спектра сигнала, вызванного влиянием эффекта Доплера. Так, для широкополосных сигналов непосредственное применение алгоритмов вычисления взаимной функции неопределённости, которая традиционно используется для компенсации доплеровского смещения несущей частоты сигналов при определении временной задержки, затруднено вследствие резкого уменьшения степени выраженности главного максимума при увеличении значения доплеровского смещения несущей частоты и масштабирования спектра. Для повышения точности оценки взаимной временной задержки и частотного сдвига алгоритмы построения взаимной функции неопределённости требуют своей модификации. Поскольку расчёт данной функции характеризуется высокой вычислительной сложностью, необходима разработка и реализация новых алгоритмов с применением технологий параллельного и распределённого программирования для использования в практических задачах. В данной работе предлагается алгоритм вычисления взаимной функции неопределённости широкополосных сигналов с применением технологий MPI и NVIDIA CUDA.

**Ключевые слова:** взаимная функция неопределённости, взаимная временная задержка, доплеровское смещение, широкополосные сигналы, частотно-временные параметры сигналов, параллельные и распределённые вычисления, MPI, NVIDIA CUDA.

**Введение**

При определении местоположения источника радиоизлучения в реальном масштабе времени методами пассивной пеленгации возникает проблема определения взаимной временной задержки (ВВЗ) сигналов. Знание данной величины позволяет позиционировать источники излучения, а также получать важную информацию о структуре среды распространения сигналов. Обычно данная задача решается методами корреляционного анализа. Однако в системах связи с подвижными объектами, в частности с использованием космического сегмента, применение корреляционных методов требует компенсации искажения (масштабирования) спектра сигнала, вызванного влиянием эффекта Доплера [1].

Для повышения надёжности передачи информации и её помехозащищённости в современных цифровых системах связи широкое применение находят сигналы с расширенным спектром [2]. Расширение спектра может достигаться, например, за счет использования

большого количества поднесущих в сигнале (OFDM-модуляция), перестройки рабочей частоты в полосе, включающей в себя набор частотных каналов (ППРЧ) [3] и т.д.

Для широкополосных сигналов непосредственное применение алгоритмов вычисления взаимной функции неопределённости (ВФН) [4-6], традиционно используемой для компенсации доплеровского смещения несущей частоты сигналов при определении временной задержки, затруднено вследствие резкого уменьшения степени выраженности главного максимума данной функции при увеличении значения доплеровского смещения несущей частоты и масштабирования спектра.

В настоящей работе предлагается алгоритм вычисления ВФН широкополосных сигналов с использованием технологий параллельного (CUDA – Compute Unified Device Architecture) [7] и распределённого программирования (MPI – Message Passing Interface) [8]. Использование данных технологий при расчёте ВФН существенно повышает вычислительную эффективность алгоритма, что является привлекательным для использования его в реальном масштабе времени.

### Взаимная функция неопределённости в задаче определения частотно-временных параметров широкополосных сигналов

Традиционным подходом для совместной оценки ВВЗ и частотного сдвига между принимаемыми сигналами является метод, основанный на вычислении ВФН. Для узкополосных сигналов положение главного максимума ВФН соответствует ВВЗ и доплеровскому сдвигу между сигналами, при этом эффектами масштабирования спектра обычно можно пренебречь. Однако для широкополосных сигналов ВФН не позволяет точно компенсировать частотное смещение, поскольку сигналы каждого частотного канала характеризуются своим значением смещения несущей частоты.

Для обработки сигналов систем связи с технологией расширения спектра требуется модифицировать алгоритм построения ВФН, чтобы получить оптимальное значение ВВЗ и частотного сдвига. Предлагается разбивать принимаемые широкополосные сигналы на  $M$  частотных каналов (рис. 1) при помощи алгоритма цифровой фильтрации сигналов с последующим вычислением сечений ВФН различных частотных каналов. Поскольку набор несущих частот определяется протоколом конкретной системы связи и считается заранее известным, синтез цифровых фильтров, настроенных на каждую из возможных центральных частот, может быть произведен заранее [5].

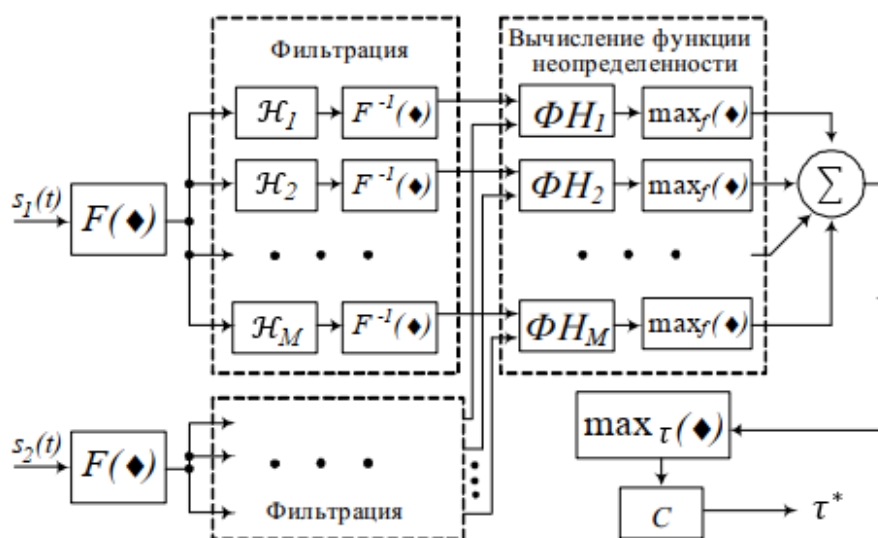


Рисунок 1. Структурная схема алгоритма вычисления ВФН широкополосных сигналов



Для полученного набора сигналов можно применять алгоритм построения ВФН, однако степень выраженности главного максимума, соответствующего ВВЗ между сигналами и доплеровскому смещению в данном канале, будет низкой вследствие малой длины информационной части и достаточно высокого уровня шума.

В данной работе рассматривается алгоритм вычисления ВФН путем параллельного вычисления и последующего суммирования модулей сечений ВФН для каждого частотного канала.

### Алгоритм вычисления взаимной функции неопределённости широкополосных сигналов с применением MPI и NVIDIA CUDA

Для вычисления сечений ВФН предлагается использовать алгоритм с применением NVIDIA CUDA, предлагаемый в [6]. Кратко поясним его суть.

В дискретном виде ВФН можно определить следующим образом:

$$A(n, m) = \sum_{k=0}^{N_1/K-1} p_{k, k-n} \exp \left( -j \frac{2\pi k K m}{N_1} \right),$$

где  $N_1$  – длина сигнала в опорном канале в отсчетах,  $K$  – шаг децимации. Значения  $p_{k, k-n}$  представляют собой диагональные элементы матрицы  $\tilde{P}$ , вычисляемой перемножением матриц  $\hat{S}_1$  и  $\hat{S}_2^H$ , составленных из опорного  $s_1$  и исследуемого  $s_2$  сигналов. Чтобы получить отсчёты ВФН, необходимо преобразовать диагонали матрицы  $\tilde{P}$  в строки, и затем выполнить преобразование Фурье каждой строки.

Поскольку размер матрицы  $\tilde{P}$  сильно увеличивается при перемножении матриц широкополосных сигналов, возрастает объем памяти, требуемый для хранения матриц  $\hat{S}_1$ ,  $\hat{S}_2^H$  и  $\tilde{P}$  на GPU. Для оптимизации работы с памятью в [6] предлагается выполнять построение ВФН по независимым друг от друга блокам, размер которых должен соответствовать объёму памяти данного GPU. При этом недиагональные элементы матрицы  $\tilde{P}$  не рассчитываются. В каждой строке такой матрицы находится максимальный элемент, который заносится в соответствующий массив. Данный массив будет представлять собой сечение из максимумов ВФН для каждого временного сдвига.

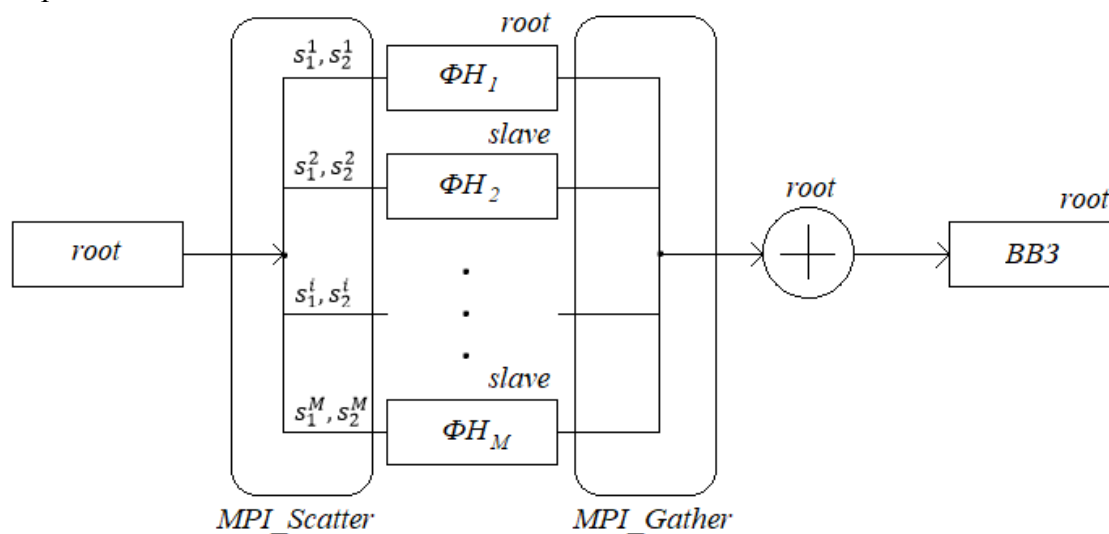


Рисунок 2. Структурная схема алгоритма построения ВФН широкополосных сигналов с использованием MPI и NVIDIA CUDA

Для повышения вычислительной эффективности предлагается вычислять сечение ВФН для каждого частотного канала на отдельном узле (машине). Данный подход может быть организован с помощью технологии распределённых вычислений MPI. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 2.

Главный процесс (root), работающий на одном узле, рассылает (MPI\_Scatter) сигналы каждого из частотных каналов другим процессам, работающим на своих машинах. При этом root сохраняет сигналы одного из каналов у себя. Каждый процесс параллельно рассчитывает сечение ВФН своего частотного канала, как показано в [6]. Далее root собирает (MPI\_Gather) у себя полученные сечения ВФН и производит их поэлементное суммирование. Полученный массив будет представлять собой сечение из максимумов ВФН широкополосных сигналов, максимальный элемент которого будет соответствовать ВВЗ.

### Исследование алгоритма вычисления взаимной функции неопределённости широкополосных сигналов

Предлагаемый в работе алгоритм был реализован со следующими параметрами:

- $M = 4$ , один процесс на каждый вычислительный узел (master и 3 slave) (эксперимент №1);
- $M = 4$ , четыре процесса (master и 3 slave) на одном вычислительном узле (эксперимент №2);
- $M = 2$ , один процесс на каждый вычислительный узел (master и slave) (эксперимент №3);
- $M = 2$ , два процесса (master и slave) на одном вычислительном узле (эксперимент №4);
- число отсчетов  $N_1$  широкополосного сигнала изменялось от 32768 до 1048576;
- $K = 16$ .

На рис. 3. представлены зависимости времени вычисления ВФН широкополосных сигналов для каждого из случаев, где  $f_1$  соответствует эксперименту №1,  $f_2$  – эксперименту №2,  $f_3$  – эксперименту №3,  $f_4$  – эксперименту №4. При этом ось времени  $t$  имеет логарифмический масштаб, чтобы подчеркнуть различие временных зависимостей на тех значениях  $N_1$ , где времена вычисления ВФН имеют близкие значения.

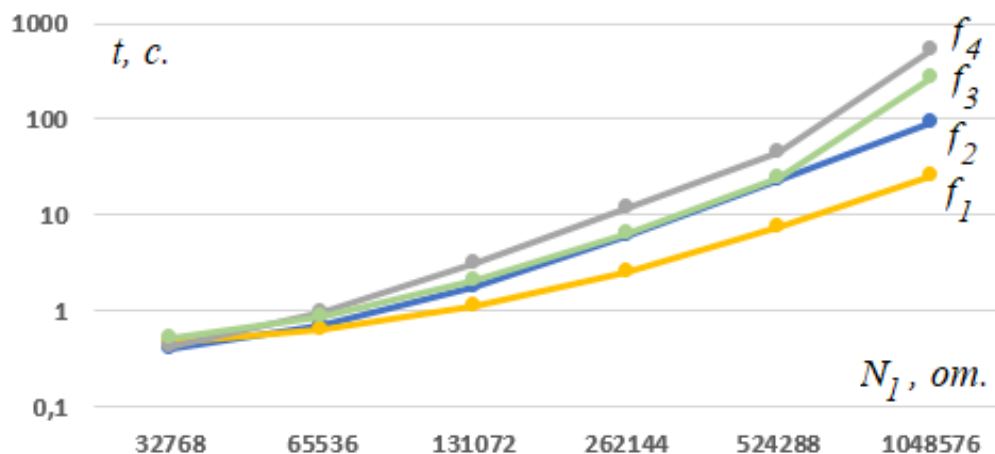


Рисунок 3. Зависимости времени вычисления ВФН от числа отсчётов в опорном широкополосном сигнале

Далее представлена таблица времен  $t_1, t_2, t_3, t_4$  для каждой из зависимостей  $f_1, f_2, f_3, f_4$ , соответственно, с коэффициентами ускорения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  относительно наилучшего случая (эксперимент №1).

$N_1$ , от.	32768	65536	131072	262144	524288	1048576
$t_1$ , с.	0.471	0.646	1.099	2.515	7.483	26.069
$t_2$ , с.	0.4	0.724	1.822	6.065	22.977	90.779
$t_3$ , с.	0.528	0.87	2.059	6.541	24.24	275.05
$t_4$ , с.	0.418	0.984	3.119	11.596	45.523	537.043
$\alpha_1 = t_2/t_1$	0.849	1.121	1.658	2.412	3.071	3.482
$\alpha_2 = t_3/t_1$	1.121	1.347	1.874	2.601	3.239	10.551
$\alpha_3 = t_4/t_1$	0.887	1.523	2.838	4.611	6.084	20.601

Видно, что в сравнении с наилучшим (эксперимент №1) и наихудшим (эксперимент №4) случаями получилось достигнуть максимального коэффициента ускорения  $\alpha_3 = 20.601$  при  $N_1 = 1048576$ .

Повышая количество используемых узлов для вычисления сечения ВФН своего частотного канала, можно увеличить вычислительную эффективность предлагаемого алгоритма, что будет являться предпосылкой для использования данного алгоритма в реальном масштабе времени.

### Заключение

Определение местоположения источника излучения является одной из важнейших задач цифровой обработки сигналов. Для её решения необходимо вычисление ВВЗ сигналов, что, в свою очередь, ведёт к построению ВФН. Поскольку расчёт данной функции обусловлен высокой вычислительной сложностью, необходима разработка новых алгоритмов с применением технологий параллельных и распределённых вычислений. Предлагаемый в настоящей работе алгоритм может позволить существенно уменьшить время вычисления ВФН сигналов, что является очень важным при решении реальных задач.

### Библиографический список

1. **Иванов, Н.М.** Баллистика и навигация космических аппаратов./ Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
2. **Варакин, Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. / Л.Е. Варакин – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с
3. **Борисов, В.И.** Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев – М.: Радиософт, 2008. – 512 с.
4. **Stein, S.** Algorithms for ambiguity function processing // IEEE Transaction on acoustics, speech and signal processing. 1981. Vol. ASSP-19, №3. P. 588.

5. **Ершов, Р.А.** Вычислительно-эффективный алгоритм оценки взаимной временной задержки широкополосных сигналов. / Р.А. Ершов, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия Самарского научного центра РАН, Т.16, №4(2), 2014. – С. 384-387.

6. **Игошев, Я. А.** Вычислительно эффективный алгоритм расчёта взаимной функции неопределённости в задаче определения взаимной временной задержки сигналов при больших объемах выборок. / Я.А. Игошев, Р.А. Ершов // Труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2019. – С. 342-346.

7. **Боресков, А.В.** Основы работы с технологией CUDA. / А.В. Боресков, А.А. Харламов – М.: ДМК Пресс, 2010. С. 232.

8. **Gropp, W.** Using MPI – 3rd Edition: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface (Scientific and Engineering Computation). / W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum. – MIT Press.2014.

**Y.A. Igoshev, R.A. Ershov**

## **THE ALGORITHM OF COMPUTATION OF THE CROSS-AMBIGUITY FUNCTION FOR BROADBAND SIGNALS USING MPI AND NVIDIA CUDA TECHNOLOGIES**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The problem of detecting and positioning a radiating object within real time with methods of passive direction-finding has a great significance among issues resolved of the modern digital signal processing. Resolving of this problem, for example, by differential rangefinder method, requires evaluation of differential time offsets of signal propagation, for evaluation of ones usually apply methods of correlational analysis. However, within communication systems with moving objects, use of correlational methods requires a compensation of distortion of the signal spectrum caused by impact of Doppler effect. So, direct using algorithms of computation of the cross-ambiguity function for broadband signals, which is traditionally used to compensate Doppler offset of carrier frequency of signals when evaluation of time delay, is difficult due to sharp decreasing magnitude of the main maximum of the cross-ambiguity function when increasing Doppler offset of carrier frequency and spectrum scaling. To enhance a precision of evaluation of the differential time offset and differential frequency offset algorithms of computation of the cross-ambiguity function require their modification. Since calculation of that function is computationally complex problem, it is required to developing and implementing new algorithms using parallel and distributed technologies to use ones within the practice issues. In this article, the algorithm of computation of the cross-ambiguity function is suggested using MPI and NVIDIA CUDA technologies.

**Key words:** cross-ambiguity function, differential time offset, differential frequency offset, broadband signals, frequency-time parameters of signals, parallel and distributed computations, MPI, NVIDIA CUDA.

В.В. Котлякова, И.В. Кузьмина

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТРИБУТИВА DOCKER

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

На сегодняшний день изучение технологий автоматизации инфраструктуры распределенных многопроцессорных систем и применение их на всех этапах разработки, тестирования и эксплуатации является актуальной задачей. К таким задачам относится развертывание и инициализация нового сервера, а также миграция сконфигурированного, работающего сервера в другое хост-пространство в условиях ограниченных временных ресурсов. При решении таких задач широко применяется контейнерная виртуализация. В данной работе был автоматизирован процесс функционального тестирования распределенной информационной системы с использованием дистрибутива Docker на базе ОС Astra Linux.

**Ключевые слова:** распределенная система, виртуализация, автоматизация конфигурирования, Docker, Astra Linux.

### Введение

Сложность распределенных информационных систем обусловлена многими факторами, такими как необходимость поддержки контрактов протоколов, периодическая недоступность сервисов, сложность управления распределенными транзакциями. Также к этим факторам относится необходимость развертывания большого количества сервисов в различных окружениях на всех этапах разработки.

Для решения этих проблем широко применяется виртуализация — предоставление набора вычислительных ресурсов или их логического объединения, абстрагированное от аппаратной реализации, и обеспечивающее при этом логическую изоляцию друг от друга вычислительных процессов, выполняемых на одном физическом ресурсе [1]. Кроме того, важным направлением является автоматизация развертывания приложений и конфигурирования операционной системы, обеспечивающая возможность быстрого развертывания большого количества сервисов как на тестовом, так и в целевом окружении.

Помимо этого, при разработке распределенных систем важной задачей является обеспечение информационной безопасности, реализующей доступность, целостность и конфиденциальность данных. Актуальность проблемы защиты информации связана с ростом возможностей вычислительной техники. Развитие средств, методов и форм автоматизации процессов обработки информации, массовость применения ПЭВМ резко повышают ее уязвимость. Основными факторами, способствующими повышению этой уязвимости, являются:

- резкое увеличение объемов информации, накапливаемой, хранимой и обрабатываемой с помощью ЭВМ и других средств автоматизации;
- сосредоточение в единых базах данных информации различного назначения и различной принадлежности;
- резкое расширение круга пользователей, имеющих непосредственный доступ к ресур-

сам вычислительной системы и находящимся в ней массивам данных;

- автоматизация межмашинного обмена информацией, в том числе и на больших расстояниях.

В связи с этим в последние годы растёт потребность в защищённых решениях для структур, работающих с информацией ограниченного доступа. Одним из них является Astra Linux Special Edition - операционная система специального назначения на базе Linux-ядра, созданная для нужд учреждений, работающих с информацией ограниченного доступа, обладающая такими особенностями как мандатное разграничение доступа, изоляция модулей, маркировка документов, режим ограничения действий пользователя, контроль целостности [2].

Использование ОС Astra Linux Special Edition в качестве базовой платформы для разработки сложных программно-аппаратных комплексов накладывает ограничения на использование программных продуктов не прошедших процедуру сертификации по требованиям информационной безопасности. Этот факт делает невозможным использование открытых программных продуктов при разработке и тестировании систем, в том числе и при решении задач автоматизации и виртуализации.

Распределенная информационная система – это совокупность приложений, осуществляющих информационный обмен в рамках описанных протоколов. Для тестирования подобных систем разрабатываются тестовые приложения, также являющиеся сетевыми службами, которые в рамках тестового сценария осуществляют информационный обмен с сетевыми службами из состава тестируемой системы и анализируют правильность их поведения. Для запуска каждого тестового сценария необходимо сконфигурировать тестовое окружение (рис. 1), а именно:

- запустить один или несколько экземпляров docker-контейнера тестируемого приложения, сконфигурировав его в соответствии со сценарием;
- запустить docker-контейнер с хранилищем данных, таким как PostgreSQL, часто необходимой для работы тестируемого приложения;
- сконфигурировать распределенную сетевую среду, которая позволяет организовать изолированное пространство для тестирования;
- запустить тест;
- проанализировать результат;
- очистить тестовое окружение (корректно остановить все экземпляры docker-контейнеров).

Очевидно, что автоматизация этих этапов позволит более эффективно использовать временные, человеческие ресурсы, избежать ошибок при выполнении того или иного шага, упростит анализ полученных результатов.

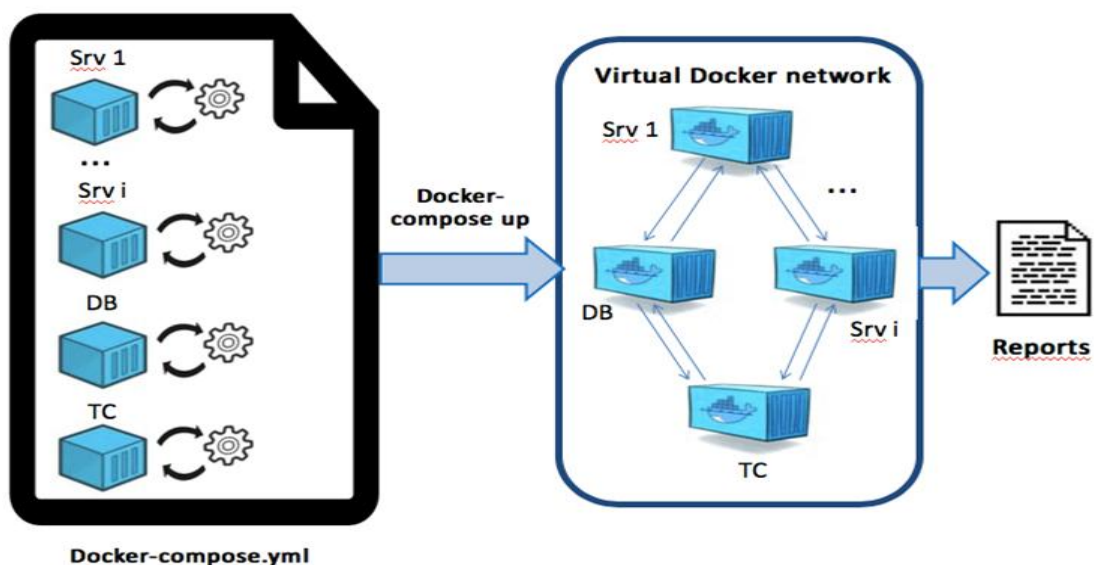
### **Экспериментальная часть**

На первом этапе автоматизации процесса функционального тестирования была решена задача создания дистрибутивов Docker и Docker-Compose из открытого исходного кода с целью использования этих инструментов для управления виртуальными контейнерами при разработке и тестирования ПО на базе ОС Astra Linux Special Edition 1.6.

После того как набор тестов реализован, необходимо запустить каждый тест, эмулирующий работу одного из узлов распределенной системы, а также тестируемую сетевую службу в изолированных контейнерах Docker, объединенных в единую сеть с помощью инструмента Docker-Compose.

Для каждого контейнера был описан конфигурационный файл Dockerfile, для совокупно-

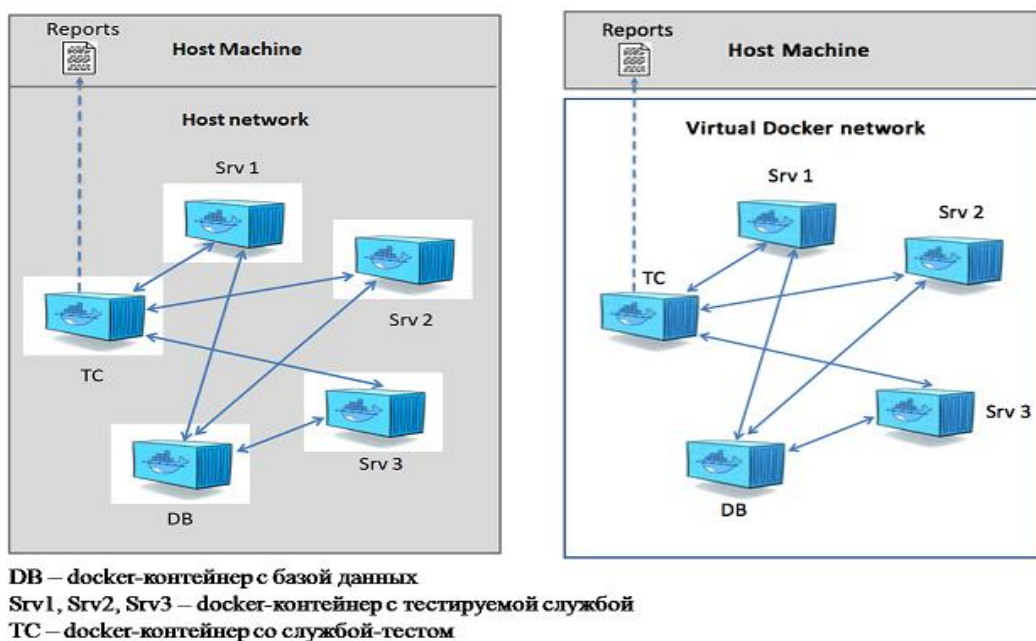
сти контейнеров был описан конфигурационный файл `docker-compose.yml`, в котором конфигурируются сетевые настройки всех контейнеров, параметры их запуска и остановки. После этого тестирование компонента распределенной системы выполняется одной командой.



**Рис. 1. Схема создания автоматизированного стенда функционального тестирования с использованием Docker-Compose**

На рис. 1 представлена схема процесса создания и запуска `docker`-контейнеров с помощью дистрибутива `Docker-Compose`.

На следующем этапе было реализовано два варианта тестирования сетевой службы с использованием `docker`-контейнеров: с конфигурированием виртуальной сети `docker` и с использованием локальной сети тестового сервера (рис. 2).



**Рис. 2. Варианты тестирования компонента распределенной системы с использованием контейнеров Docker**

**Выводы**

В данной работе решена задача создания дистрибутива Docker и Docker-Compose из открытого исходного кода для использования при разработке и тестирования ПО на базе ОС Astra Linux Special Edition 1.6. Полученные инструменты виртуализации использованы для автоматизации процесса тестирования распределенной информационной системы. Разработан подход к автоматизации тестирования компонента сложной распределенной информационной системы с помощью полученных инструментов и реализовано два сценария тестирования функциональности.

Полученные результаты могут быть использованы при выполнении научно-исследовательских работ [3] в процессе разработки и тестирования сложных программно-аппаратных комплексов.

### **Библиографический список**

1. **Leung, F.** Intel Virtualization Technology / F. Leung, G. Neiger, D. Rodgers et al.// Intel Technology Journal. 2006. Vol. 10.
2. Astra Linux Special Edition. Релиз «Смоленск»- URL:<https://astralinux.ru/information>
3. **Кузьмина, И.В.** Разработка программного обеспечения сложных аппаратно-программных комплексов с использованием принципов непрерывной интеграции / И.В. Кузьмина, В.Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 2. С. 44.

**V.V. Kotlyakova, I.V. Kuzmina**

### **AUTOMATION OF THE FUNCTIONAL TESTING PROCESS OF A DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM USING THE DOCKER DISTRIBUTION**

**Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod**

Nowadays the study of automation technology, distributed multiprocessor systems and their application at all stages of development, testing and exploitation is an actual task. These tasks include the deployment and initialization of new servers and migration of the configured server running in other host for a limited time. To solve these problems container virtualization is widely used. In this work, the process of functional testing of a distributed information system using the Docker distribution based on the Astra Linux Special Edition 1.6 OS was automated.

**Key words:** distributed system, virtualization, automation, configuration, Docker, Astra Linux Special Edition.



М.С. Королев, С.А. Минеев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЛОНАСС/GPS ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

В космической связи и других прикладных областях, где применяются искусственные спутники Земли, широко используются алгоритмы прогнозирования положения космических аппаратов (КА) по измеренным ранее координатам КА на участках орбит и алгоритмы прогнозирования параметров положения и движения КА относительно наземного (околоземного) объекта. Данным алгоритмам присущи проблемы верификации и проверки работоспособности. Актуальным представляется исследование возможности применения открытых данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), публикуемых на регулярной основе, для верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования положения КА, а также исследование возможности использования «сырых» данных навигационных приемников для оперативной верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования параметров положения и движения КА относительно наземного (околоземного) объекта. В данной работе приводятся результаты проведенных исследований возможности применения открытых данных ГНСС и «сырых» данных приемника для верификации и проверки работоспособности алгоритмов.

**Ключевые слова:** алгоритмы прогнозирования положения космических аппаратов, алгоритмы прогнозирования параметров положения и движения космических аппаратов относительно наземного (околоземного) объекта, проблемы верификации и проверки работоспособности.

### Введение

Передаваемые спутниками ГНСС эфемериды (таблицы координат) являются экстраполяцией наиболее свежих данных о движении космического аппарата по орбите и имеют достаточно большую погрешность (около 50 метров, [1]), поэтому применять их для верификации алгоритмов прогнозирования положения КА нельзя. В отличие от «сырых», точные эфемериды являются результатом постобработки измерений, полученных многими станциями наблюдения. Они представляют собой набор координат спутников и их скоростей в известные моменты времени. В настоящее время точные эфемериды распространяются несколькими научными организациями и специализированными службами через сеть «Интернет» в формате «SP3». Различают три типа точных эфемерид: «сверхбыстрые», «быстрые» и «окончательные». Подробное описание типов приведено в [2, 3]. Поскольку при верификации алгоритмов прогнозирования положения КА не стоит задача прогнозирования в реальном времени, предпочтительно использовать «окончательные» эфемериды для минимизации погрешностей в вычислениях.

Орбиты спутников ГНСС периодически корректируются, сами спутники выводятся из эксплуатации для проведения регламентных работ и технического обслуживания. Моменты внесения каких-либо изменений в работу системы фиксируются в альманахах[4]. Поэтому перед использованием точных эфемерид, важно уточнить их пригодность.

Необходимую информацию для спутников GPS можно получить из альманахов типа *Yuma* [5]. Данный тип альманахов публикуется ежедневно и содержит статусную информацию о работе системы за прошедшие сутки. Информация о пригодности данных, получаемых со спутника GPS, содержится в строке «Health». Если напротив этой строки стоит «000», то эфемериды пригодны для использования в вычислениях, в противном случае их использование не допускается.

В случае с ГЛОНАСС статусную информацию можно получить из *Health-файлов* [6]. Данные файлы публикуются ежедневно и содержат информацию о пригодности спутника в течение прошедших суток. Каждый спутник в данном файле может иметь один из пяти статусов. При любом статусе, кроме «здоров», использование точных эфемерид для вычислений не допускается. В отличие от *Yuma* альманаха, *Health-файл* содержит конкретный участок времени, когда данные со спутника считаются непригодными. Это позволяет отбросить лишь часть непригодных эфемерид, а не все эфемериды за последние сутки.

Используя точные эфемериды ГНСС, можно обеспечить точную настройку наземного (околоземного) оборудования для наблюдения за некоторым КА. Однако, точные эфемериды публикуются с некоторой задержкой и поэтому не могут быть использованы при оперативных работах. Требуется оценить возможность оперативной настройки оборудования на основе «сырых» данных, получаемых с приемника ГНСС.

В качестве приемника ГНСС можно использовать сенсор «HERE+ RTK GNSS», который способен получать сообщения от спутников ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Бэйдоу) ежесекундно.

Среди основных параметров, содержащихся в полученных сообщениях от спутников ГНСС, выделяют [7]:

- **«Псевдодальность»** – это расстояние от приемной антенны до антенны спутника, включая сдвиги шкалы времени приемника и спутниковых часов (и другие сдвиги, такие как атмосферные задержки). «Псевдодальность» отражает реальное поведение часов приемника и передатчика. Единица измерения – метры.
- **Время измерений** – время приемника в момент приема сигналов. Оно одинаково для измерений фазы и «псевдодальности» и одинаково для всех наблюдаемых спутников в данную эпоху.
- **Фаза** – это фаза несущего сигнала, измеренная в целых циклах. Изменения фазы положительно коррелированы с изменениями дальности.
- **Доплеровский сдвиг** – изменение частоты волн, регистрируемых приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приемника. Знак доплеровского сдвига частоты положительный при приближении спутника к навигационному приемнику.

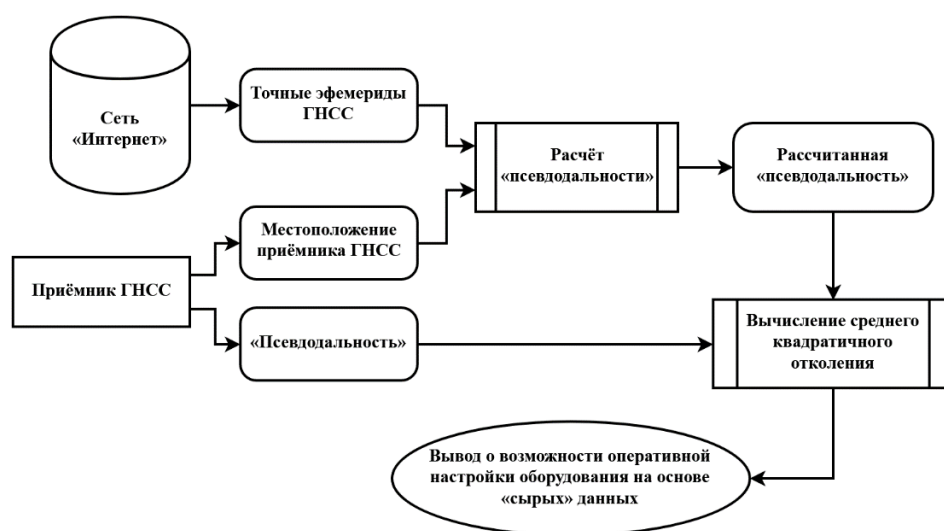
Зная текущее местоположение приемника и точные эфемериды в некоторый момент времени, можно вычислить «псевдодальность» как модуль вектора между точкой приемника и точкой спутника ГНСС по формуле:

$$R = \sqrt{(X_{\text{пр}} - X_{\text{точн. эф}})^2 + (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{точн. эф}})^2 + (Z_{\text{пр}} - Z_{\text{точн. эф}})^2}$$

Так как точное местоположение приемника ГНСС получить невозможно, то имеет смысл получить местоположение, приближенное к точному, путем усреднения всех полученных местоположений за одни полные сутки.

Поскольку приемники ГНСС, как правило, принимают свое текущее местоположение в системе «WGS-84» (в том числе и сенсор «HERE+ RTK GNSS»), для работы с данными, полученными из системы ГЛОНАСС, потребуется их перевод в систему «ПЗ-90.11». Отметим также, что приемник ГНСС записывает координаты своего местоположения в геодезической системе координат, тогда как точные эфемериды содержат данные о положении спутника в декартовых координатах. Поэтому, перед расчетом модуля вектора потребуется выполнить преобразование геодезических координат точки в декартовые координаты. Матрицы перевода координат между системами, а также формулы преобразования координат приведены в документации к координатным системам [8, 9].

Получив «псевдодальность» с приемника и рассчитав «псевдодальность» (по формуле, приведенной ранее), можно вычислить среднее квадратичное отклонение между ними и сделать вывод о пригодности использования «сырых» данных (рис. 1).



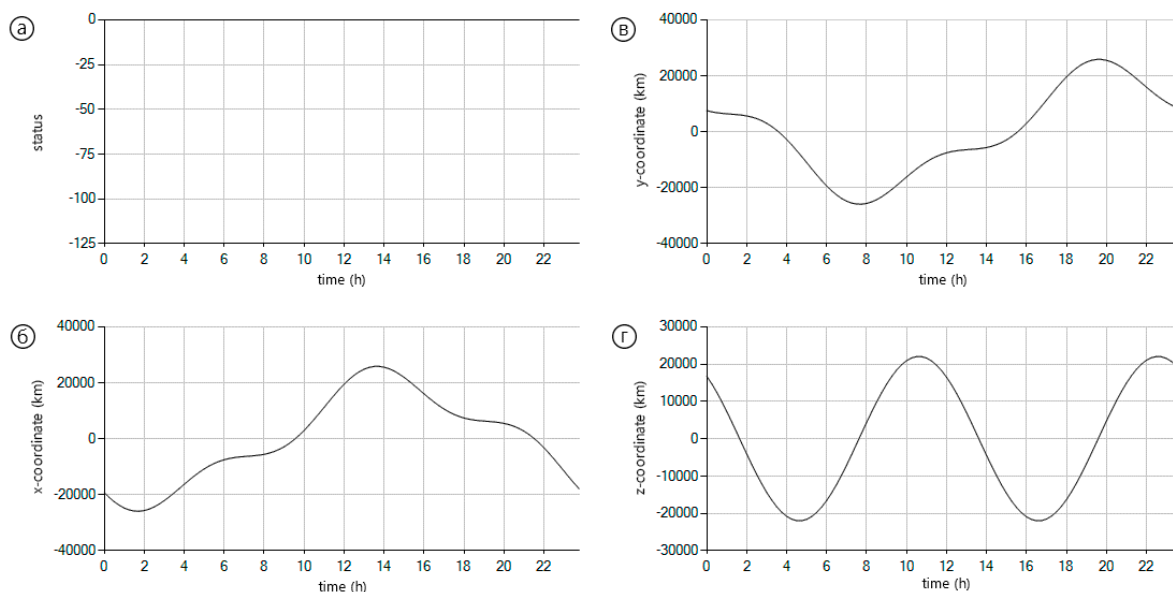
**Рисунок 1. Процесс оценки возможности оперативной настройки оборудования на основе «сырых» данных приемника ГНСС**

### **Исследование возможности применения навигационной информации, публикуемой в официальных открытых источниках ГНСС, для верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования положения КА**

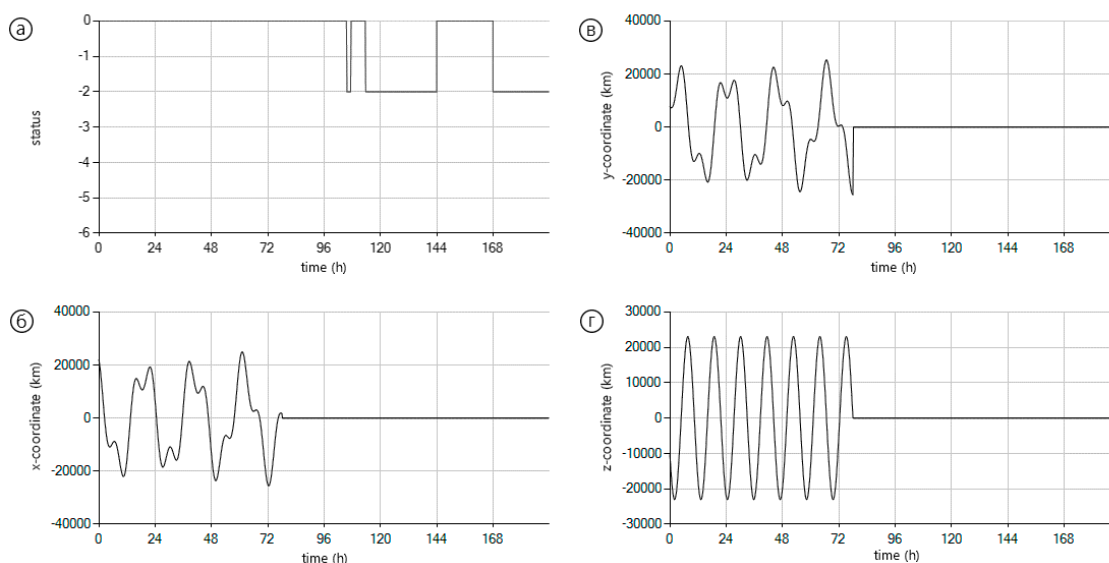
Точные эфемериды могут быть использованы в алгоритмах прогнозирования только если они обладают критерием регулярности. Под регулярностью в данной работе подразумевается наличие ненулевых координат через равные и известные промежутки времени. Проверим наличие данного критерия, рассмотрев несколько наборов точных эфемерид.

Рассмотрим набор точных эфемерид спутника №6 навигационной системы GPS за 15 ноября 2019 года (см. рис.2). Убедившись, что спутник имеет статус «здоров», проанализируем регулярность его эфемерид. Визуально регулярность хорошо видна, поэтому данный набор эфемерид возможно использовать для подачи на вход алгоритмов прогнозирования.

Рассмотрим набор точных эфемерид спутника №4 навигационной системы ГЛОНАСС за период времени с 22 августа 2019 года по 29 августа 2019 года (рис.3):



**Рисунок 2. Зависимости статуса (а) и координат (б-г) точных эфемерид от времени (по данным GPS-спутника №6 за 15 ноября 2019 года)**



**Рисунок 3. Зависимости статуса (а) и координат (б-г) точных эфемерид от времени (по данным ГЛОНАСС-спутника №4 за период времени с 22 августа 2019 года по 29 августа 2019 года)**

На рис. 3 видно, что спутник начал переход в режим «вывод из системы», однако также наблюдался необычный эффект, произошедший 28 августа, когда спутник начал внезапно передавать разрешенный для работы с точными эфемеридами статус «здоров» в течение суток. Данный пример показывает, что в процессе анализа точных эфемерид необходимо постоянно отслеживать их регулярность для обеспечения корректной работы алгоритма.

Проводить визуальную оценку больших объемов данных на регулярность неудобно и не всегда возможно, однако, как отмечено выше, проведение оценки на регулярность обязательно. Автоматизация оценки регулярности возможна путем проведения расчетов отклонений текущих отсчетов от предыдущих.

## Исследование возможности применения данных навигационных приемников ГНСС для оперативной верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования параметров положения и движения КА относительно наземного (околоземного) объекта непосредственно для точки расположения навигационного приемника ГНСС

Первым этапом в исследовании является получение «псевдодальности» приемником ГНСС для наземного (околоземного) объекта, а также его местоположения. В роли наземного объекта был 3-й корпус Университета Лобачевского, расположенный по адресу: Нижегородская обл., Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, к.3.

Усреднив получаемые ежесекундно геодезические координаты за 12 ноября 2019 года, получим местоположение наземного объекта: широта – 43,9811 градусов с.ш., долгота – 56,2985 градусов в.д, высота – 213,772 м. Следующим этапом в исследовании является перевод полученных геодезических координат системы «WGS-84» в систему пространственных прямоугольных «WGS-84» и «ПЗ-90.11».

После публикации точных эфемерид в официальных источниках ГНСС можно переходить к заключительным этапам исследования, а именно: вычислению модуля вектора между точкой на поверхности Земли и точным положением КА (по формуле 1), его построению и расчету отклонений между ним и полученной «псевдодальностью».

Отметим, что расчет отклонений выполнялся только для данных с «разрешённым» статусом. Рассмотрим результаты проделанных измерений:

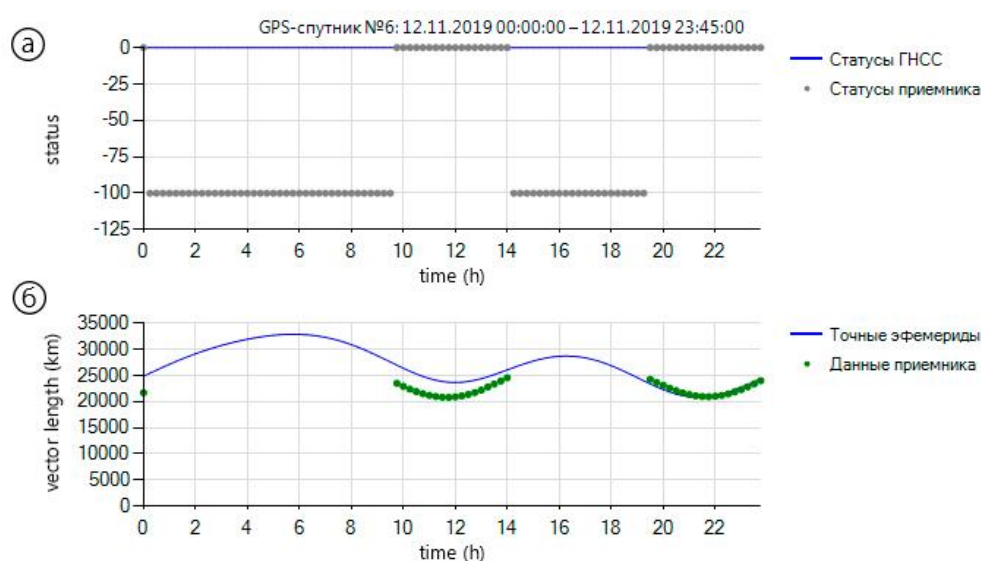
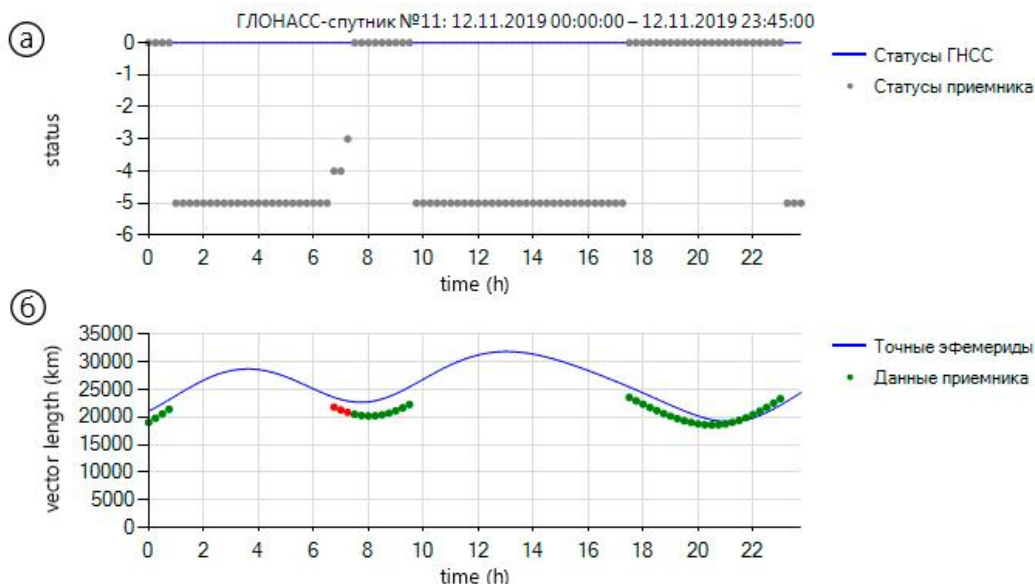


Рисунок 4. Зависимости статусов (а) и «псевдодальностей» (б) от времени (по данным GPS-спутника №6 за 12 ноября 2019 года)

Полученные отклонения между полученной приемником и рассчитанной «псевдодальностью» по данным GPS-спутника №6 за 12 ноября 2019 года:

- среднее квадратичное отклонение: 2035,879 км;
- максимальное квадратичное отклонение: 3489,140 км.



**Рисунок 5. Зависимости статусов (а) и «псевдодальностей» (б) от времени (по данным ГЛОНАСС-спутника №11 за 12 ноября 2019 года)**

Полученные отклонения между полученной приемником и рассчитанной «псевдодальностью» по данным ГЛОНАСС-спутника №11 за 12 ноября 2019 года:

- среднее квадратичное отклонение: 1920,696 км;
- максимальное квадратичное отклонение: 3186,896 км.

Визуально траектория полученной «псевдодальности» похожа на траекторию рассчитанной, однако полученные отклонения между данными достаточно велики, следовательно, использовать данные с приемника ГНСС для точной настройки наземного (околоземного) оборудования для наблюдения за КА нельзя.

### Заключение

Показано, что применение навигационной информации, публикуемой в официальных открытых источниках ГНСС, для верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования положения КА допускается, так как точные эфемериды регулярны. Однако, перед применением точных эфемерид для целей тестирования алгоритмов прогнозирования положения КА их требуется проверить, проведя дополнительный анализ статусной информации о работоспособности КА и проверку регулярности точных эфемерид.

Установлено, что применение данных навигационных приемников ГНСС для оперативной верификации и проверки работоспособности алгоритмов прогнозирования параметров положения и движения КА относительно наземного (околоземного) объекта не допускается из-за наличия в «псевдодальности», измеряемой навигационным приемником, медленно меняющейся систематической погрешности неизвестной природы.

### Библиографический список

1. Информация о движении спутника [Электронный ресурс]. – URL: <https://spacegeodesy.ru/dvizheniesputnik.html> (дата обращения 21.01.2020).
2. Информация о продуктах IGS. – URL: <https://www.igs.org/products> (дата обращения 21.01.2020).

3. ГОСТ Р 56410-2015. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие требования к центрам точных эфемерид. Москва: Стандартинформ, 2015. – 6 с.

4. **Маханьков, А.** GPS: основные понятия и термины // Беспроводные технологии. – 2006. – №1. – С. 7-9.

5. Celes Trak: Definition of a Yuma Almanac. – URL: <https://celestrak.com/GPS/almanac/Yuma/definition.php> (датаобращения 21.01.2020).

6. Описание формата Health. – URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/FORMAT/Format.hlt> (датаобращения 21.01.2020).

7. RINEX (The Receiver Independent Exchange Format): Аппаратно-независимый формат обмена навигационными данными [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteolab.ru/doc/rinex211rus.pdf> (дата обращения 21.01.2020).

8. World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual / International Civil Aviation Organization— Электрон. текстовые дан. – Второе издание, 2002. – Режим доступа: <https://gis.icao.int/egamp/webpdf/REF08-Док9674.pdf> (дата обращения 21.01.2020).

9. «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11): Справочный документ / Военно-топографическое управление генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации— Электрон. текстовые дан. – Москва, 2014. – Режим доступа: <https://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf> (дата обращения 21.01.2020).

**M.S. Korolev, S.A. Mineev**

## **RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USE GLONASS/GPS DATA FOR TESTING SPACECRAFT MOTION PREDICTION ALGORITHMS**

**National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod**

This work is devoted to the research of the possibility of use global navigation satellite systems open data and receiver data to solve problems of verification algorithms. The methodology consists in the analysis of status information and final ephemeris obtained from global navigation satellite systems open sources and in the assessment of deviation between calculated pseudorange from final ephemeris and received pseudorange. Final ephemeris must be checked before use for testing spacecraft position prediction algorithms. Use of receiver data for operational verifying the operability of algorithms for predicting spacecraft parameters (position and motion) relative to a ground (near-ground) object is not allowed due to the slowly varying systematic error of an unknown nature. The present work provides a starting-point for further research in the field of solving problems of verification algorithms. This work shows the need for additional check final ephemeris. The results can be used to compare with the results of further studies.

**Key words:** spacecraft position prediction algorithms, algorithms for predicting spacecraft parameters relative to a ground (near-ground) object, problems of verification algorithms.

В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛНОЙ КАНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ГИБРИДНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

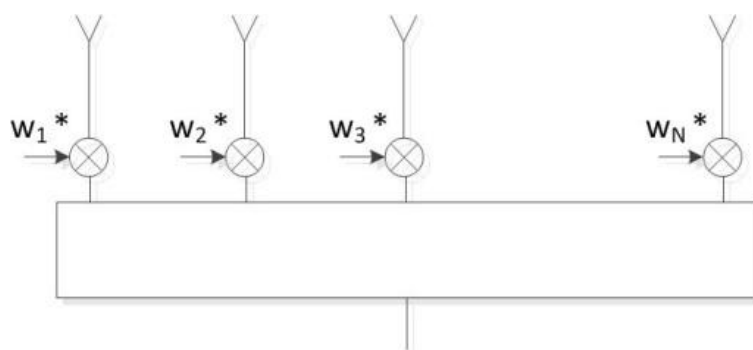
В работе рассмотрена проблема восстановления полной канальной матрицы в системах радиосвязи, использующих комбинированные аналогово-цифровые диаграммообразующие схемы. Предложен итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы. Рассмотрен метод улучшения эффективности предложенного алгоритма для случая динамически меняющегося канала. Исследована зависимость точности восстановления полной канальной матрицы от скорости абонента системы связи. С помощью численного моделирования показано, что предложенный алгоритм позволяет добиться высокой точности восстановления полной канальной матрицы, в том числе и для случая динамически меняющегося канала.

**Ключевые слова:** восстановление канальной матрицы, гибридная диаграммообразующая схема, LTE, предсказание канала.

**Введение**

Современные тенденции развития беспроводных технологий передачи данных включают в себя активное использование многоэлементных антенных решёток [1,2]. Использование таких антенных решёток позволяет повысить скорость передачи данных и качество связи, т.к. они дают возможность формировать диаграмму направленности, обеспечивающую усиление мощности принимаемого сигнала.

Управление диаграммой направленности антенной решётки осуществляется путём задания различных амплитудно-фазовых соотношений между сигналами, излучаемыми или принимаемыми различными элементами антенной решётки. Данные амплитудно-фазовые соотношения могут быть представлены в виде вектора комплексных весовых коэффициентов (рис. 1), который назовём диаграммообразующим [3].

**Рисунок 1**



Обеспечить высокую гибкость системы при относительно невысоких аппаратных, вычислительных и денежных затратах, можно путём создания комбинированной схемы управления диаграммой направленности [4]. Такая гибридная антенная решётка включает в себя последовательное применение к передаваемому/принимаемому сигналу диаграммообразующих векторов в цифровой и аналоговой областях (см. рис. 2). При этом число аналоговых фазовращателей больше либо равно числу элементов антенной решётки, а количество АЦП/ЦАП значительно меньше [5,6].



**Рисунок 2**

Для систем связи с комбинированной аналого-цифровой схемой управления диаграммой направленности задача формирования диаграммообразующего вектора разбивается на две подзадачи: выбор аналоговых весовых коэффициентов и выбор цифровых весовых коэффициентов.

В настоящей работе предложен итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы на основе пилотных сигналов, передаваемых пользователем. Данный алгоритм является универсальным с точки зрения различных коммуникационных стандартов, так как базируется на имеющихся практически во всех системах пилотных сигналах обратного канала связи. Предложенный алгоритм не требует дополнительных частотных и временных ресурсов. Также в работе произведен анализ работы предложенного алгоритма для различных взаимных скоростей движения приёмника и передатчика. Предложен метод оптимизации итеративного метода для условий динамического канала на основе алгоритмов предсказания.

Эффективность предложенного алгоритма исследована с помощью численного моделирования на модели канала 3GPP 3D Urban Macro [7].

### **Итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы**

Рассмотрим дуплексную систему связи с временным разделением каналов. Для простоты описания будем полагать, что система состоит из двух приемо-передающих станций. Антенная система первой станции представляет собой антенную решётку с комбинированной диаграммообразующей схемой, включающую в себя МАЦП/ЦАП,  $P$  антенных элементов и  $S$  аналоговых фазовращателей. Антенные элементы объединены в группы по  $L$  элементов, так как показано на рис. 2. Элементы одной группы подключены к одному и тому же АЦП/ЦАП с помощью сумматора/делителя. Антенная система второй станции представляет собой цифровую антенную решётку с  $N$  элементами.

Определим полную матрицу канальных коэффициентов  $\mathbf{H}$  размерности  $(P \times N)$  и представим её в блочном виде. Рассмотрим  $\mathbf{H}_{mn}$  – блок полной канальной матрицы, соответствующий группе антенных элементов первой станции, подключенной к АЦП/ЦАП с индексом  $m$ , и антенному элементу второй станции с индексом  $n$ . Матрица  $\mathbf{H}_{mn}$  имеет размерность  $(L \times 1)$ . В каждый момент времени  $t$  блок  $\mathbf{H}_{mn}$  может быть представлен в виде разложения в некотором векторном базисе  $\mathbf{F}$ :

$$\mathbf{H}_{mn}(t) = \sum_{k=1}^L a_{mnk}(t) \cdot \mathbf{f}_k = \mathbf{F} \mathbf{a}_{mn}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \dots \quad \mathbf{f}_L], \quad \mathbf{a}_{mn} = [a_{mn1} \quad a_{mn2} \quad \dots \quad a_{mnL}]^T \quad (2)$$

Для вычисления коэффициентов разложения  $\mathbf{a}_{mn}$  необходимо решить систему линейных уравнений(1). Если базис  $\mathbf{F}$  является ортогональным, то коэффициенты разложения могут быть найдены через скалярное произведение блока канальной матрицы  $\mathbf{H}_{mn}$  и векторов базиса  $\mathbf{F}$  следующим образом:

$$a_{mnk}(t) = \mathbf{f}_k^H \mathbf{H}_{mn}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_{mn}(t) = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{H}_{mn}(t) = \mathbf{F}^H \mathbf{H}_{mn}(t) \quad (4)$$

Скалярное произведение может быть реализовано аппаратно с помощью векторов весовых коэффициентов аналоговых фазовращателей, подключаемых к одному АЦП/ЦАП, и сумматора. Значения коэффициента разложения  $a_{mnk}$  может быть оценено в момент приема пилотного сигнала, передаваемого по каналу обратной связи от второй станции к первой, с помощью стандартных алгоритмов оценки канала [2,8,9]. При этом в качестве весового вектора  $\mathbf{w}$  должен использоваться вектор  $\mathbf{f}_k$ .

При приеме одного пилотного сигнала может быть применен только один вектор аналоговых весовых коэффициентов, и как следствие. То есть для вычисления  $L$  коэффициентов разложения необходимо последовательно  $L$  раз при приеме пилотных сигналов применять соответствующие вектора аналоговых коэффициентов из базиса  $\mathbf{F}$ . На каждой временной итерации алгоритма обновляется один из коэффициентов разложения, и блок канальной матрицы может быть восстановлен в соответствии с формулой:

$$\hat{\mathbf{H}}_{mn}(t) = \sum_{k=1}^L a_{mnk}(t-k+1) \cdot \mathbf{f}_k \quad (5)$$

где за единицу времени принят период следования пилотных сигналов.

Следует отметить, что последовательное вычисление коэффициентов ведет к тому, что для процедуры восстановления блока канальной матрицы используются значения коэффициентов разложения, измеренные в предыдущие моменты времени. В случае статического канала представленный алгоритм позволяет точно восстановить канальную матрицу. Однако, в реальных условиях, канал связи меняется со временем, и между оцененными значениями  $a_{mnk}$  и их действительными значениями в текущий момент времени возникает ошибка. Величина данной ошибки зависит от скорости изменения канала и оказывается особенно существенной при высокой скорости движения одной станции относительно другой.

Ошибки при оценке коэффициентов разложения ведут к уменьшению точности восстановления полной канальной матрицы. Для повышения эффективности предложенного ите-

ративного алгоритма в условиях динамически меняющегося канала целесообразно применять его совместно с методами предсказания.

### Алгоритм предсказания

Каждый из коэффициентов разложения  $a_{mnk}$  измеряется с периодичностью  $L \cdot T$ , где  $L$  – размер базиса, используемого для ортогонального разложения,  $T$  – период следования пилотных сигналов в канале обратной связи. Для повышения эффективности итеративного алгоритма предлагается осуществлять предсказание каждого из коэффициентов разложения для моментов времени  $T, 2T, \dots, (L-1) \cdot T$ , считая от последнего измерения. Таким образом, задача предсказания значений коэффициентов разложения сводится к задаче предсказания на дробный (относительно периода оценки коэффициента разложения) шаг  $d$ . Данный подход использует модель авторегрессии для процедуры предсказания [10].

В работе [11] предложен алгоритм линейного предсказания действительного сигнала непосредственно на дробный шаг, основанный на интерполяционной формуле Уиттекера-Шеннона (ряд Котельникова). Обобщим предложенный в [11] вывод для случая комплексного сигнала.

Значения коэффициента разложения представляются в виде линейной комбинации его  $J$  предыдущих измерений. Величину  $J$  называют порядком предсказания. За единицу времени для удобства представления возьмем величину равную периоду измерения коэффициента  $L \cdot T$ .

$$\hat{a}_{mnk}(t+d) = \sum_{j=0}^{J-1} b_j^* a_{mnk}(t-j) = \mathbf{B}^H \mathbf{A}_{mnk}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = [b_0, b_1, \dots, b_{J-1}]^T \quad \mathbf{A}_{mnk}(t) = [a_{mnk}(t), a_{mnk}(t-1), \dots, a_{mnk}(t-J+1)]^T \quad (7)$$

Коэффициенты авторегрессионной модели могут быть вычислены с помощью критерия минимума средней квадратичной ошибки (МСКО). Средняя квадратичная ошибка  $\varepsilon$  равна:

$$\varepsilon = \langle |a_{mnk}(t+d) - \hat{a}_{mnk}(t+d)|^2 \rangle = \langle |a_{mnk}(t+d) - \mathbf{B}^H \mathbf{A}_{mnk}(t)|^2 \rangle \quad (8)$$

Для нахождения значений  $b_j$  необходимо продифференцировать выражение (8).

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{B}^H} \varepsilon = \langle \mathbf{A}_{mnk}(t) \mathbf{A}_{mnk}^H(t) \rangle \mathbf{B} - \langle a_{mnk}^*(t+d) \mathbf{A}_{mnk}(t) \rangle = \mathbf{R} \mathbf{B} - \mathbf{r} = 0 \quad (9)$$

В результате значения коэффициентов авторегрессии могут быть найдены из решения системы уравнений Юла-Уокера.

$$\mathbf{R} \mathbf{B} = \mathbf{r} \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r(0) & r^*(1) & \dots & r^*(J-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r^*(J-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(J-1) & r(J-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} r(d) \\ r(1+d) \\ \vdots \\ r(J-1+d) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Для вычисления значений элементов корреляционного вектора целесообразно использование техники интерполяции.

Зависимость комплексного коэффициента  $a_{mnk}$  от времени может быть представлена в виде бесконечного ряда [11]:

$$a_{mnk}(t+d) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_{mnk}(q) \frac{\sin(\pi(t+d-q))}{\pi(t+d-q)} = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_{mnk}(q) \frac{(-1)^{t-q} \sin(\pi d)}{\pi(t+d-q)} \quad (12)$$

Полагая процесс стационарным, получим интерполяционную формулу для корреляционной функции:

$$r(t+d) = \langle a_{mnk}(0) a_{mnk}^*(t+d) \rangle = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} r(q) \frac{(-1)^{t-q} \sin(\pi d)}{\pi(t+d-q)} \quad (13)$$

На практике произвести оценку бесконечного числа слагаемых представленного ряда не представляется возможным, поэтому приходится ограничиться конечным количеством отсчетов корреляционной функции, связанным с размером скользящего окна  $Q$ .

$$\hat{r}(t+d) = \sum_{q=-Q+1}^{Q-1} \hat{r}(q) \frac{(-1)^{t-q} \sin(\pi d)}{\pi(t+d-q)} \quad (14)$$

Для получения удовлетворительного качества предсказания необходимо брать размер скользящего окна  $Q \gg J$ .

### Результаты компьютерного моделирования

Эффективность работы предложенного итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы была проверена с помощью численного моделирования на модели канала 3GPP 3D Urban Macro [7]. В качестве несущей была выбрана частота 3.5 ГГц. Период пилотных сигналов в канале обратной связи при этом составлял 10 мс. Антенная система первой приёмно-передающей станции представляла собой прямоугольную 32-х элементную антенную решётку ( $P = 32$ ), состоящую из 4 строк и 8 столбцов. Период антенной решётки составлял  $0.9\lambda$  по вертикали и  $0.5\lambda$  по горизонтали, где  $\lambda$  – длина волны. Элементы решётки задавались в виде электрических диполей с вертикальной поляризацией. Сигнал каждого элемента антенной решётки подвергался аналоговому взвешиванию с помощью аналогового фазовращателя ( $S = 32$ ). Элементы одной колонки группировались и подключались к одному АЦП/ЦАП ( $M = 8$ ). Схема объединения элементов AP изображена на рис. 3. Антенная система второй приёмно-передающей станции представляла собой один электрический диполь с вертикальной поляризацией.

В качестве метрики эффективности исследуемого алгоритма была выбрана метрика  $\rho$ , характеризующая среднюю потерю мощности, вызванную ошибками в выборе диаграммообразующего вектора  $\mathbf{w}$  на основе восстановленного канала.

$$\rho = \left\langle \frac{\hat{\mathbf{w}}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \hat{\mathbf{w}}}{\mathbf{w}_{opt}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{w}_{opt}} \right\rangle \quad (15)$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица канальных коэффициентов в момент передачи информационных данных первой станцией,  $\hat{\mathbf{w}}$  – выбранный для передачи вектор весовых коэффициентов,  $\mathbf{w}_{opt}$  – оптимальный весовой вектор, максимизирующий ОСШ на входе второй станции, ведущей

приём сигнала. Вектора  $\hat{\mathbf{w}}$  и  $\mathbf{w}_{opt}$  выбирались в виде SVD-векторов от восстановленной и актуальной канальной матрицы соответственно. Оценка коэффициентов разложения (3) в момент приёма пилотного сигнала предполагалась точной (то есть ошибки оценки канала, вызванные шумами приёмника, исключались из рассмотрения). Значение метрики усреднялось по различным реализациям канала и времени.

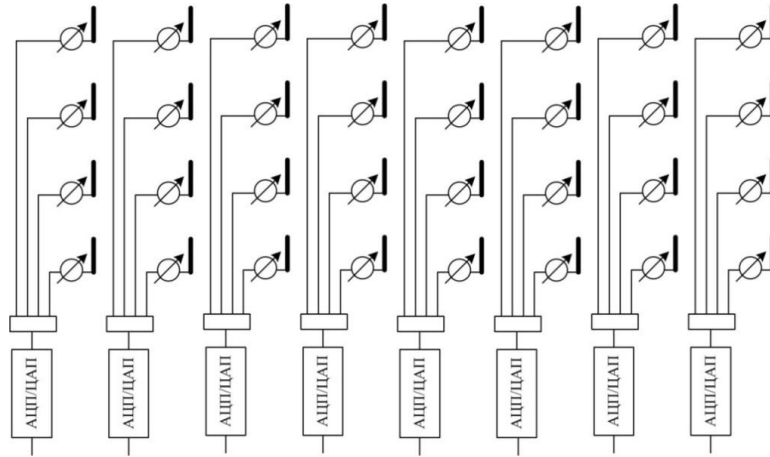


Рисунок 3

На рис. 4 представлена полученная по результатам моделирования зависимость значения метрики эффективности от относительной скорости движения приёмо-передающих станций. Кривая I соответствует предложенному итеративному алгоритму восстановления полной канальной матрицы без применения техник предсказания. Результаты для алгоритма восстановления, применённого совместно с алгоритмом предсказания на дробный шаг, представлены кривой II (порядок предсказания  $J = 5$ , размер окна  $Q = 30$ ). Кривая III задаёт верхнюю границу для алгоритма восстановления канала и соответствует полностью цифровой антенной решётке.

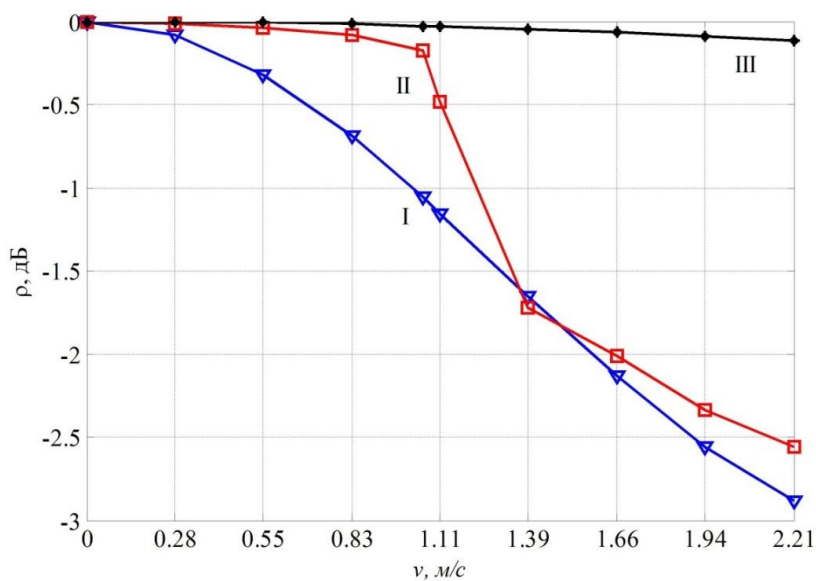


Рисунок 4

Из рисунка видно, что применение алгоритма предсказания позволило уменьшить величину потерь при скоростях менее 1.39м/с. Так при скорости 0.83м/с, величина потерь составляет 0.69 дБ для алгоритма без предсказания, 0.08 дБ для алгоритма с предсказанием. Таким образом, применение алгоритмов предсказания позволило получить выигрыш по мощности на 0.61 дБ и существенно приблизиться к случаю идеально известного канала. Падение эффективности алгоритмов предсказания на участке 1.11-1.39м/с связано с превышением определёнными гармониками доплеровского спектра канала границы Найквиста, определяющей возможность интерполяции сигнала [10].

## Выводы

В настоящей работе предложен итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы на основе пилотных сигналов, передаваемых пользователем, в системе связи использующей комбинированную схему диаграммообразования для антенных решёток. Эффективность предложенного алгоритма испытана с помощью численного моделирования на модели канала 3GPP 3D Urban Macro. Результаты моделирования показали, что применение предложенного итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы совместно с алгоритмом предсказания на дробный шаг позволяет достаточно точно восстановить канальную матрицу для последующего назначения вектора весовых коэффициентов. Для относительных скоростей движения приёмника и передатчика, максимальная доплеровская частота которых не превосходит границу Найквиста, потери в ОСШ при приёме сигнала, вызванные неточностью назначения диаграммообразующего вектора на основе восстановленного канала составили не более 0.17 дБ.

Таким образом, применение предложенного итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы для систем с комбинированной схемой диаграммообразования позволяет добиться точности представления канала близкого к потенциальной границе полностью цифровой антенной решётки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-07-00211.*

## Библиографический список

1. **Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Thomas L.** // IEEE Communications Magazine. 2014. V. 52, No. 2. P. 186.
2. **Ермолаев, В.Т.** Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи /В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. - Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. - 368 с.
3. **Ермолаев, В.Т.** Методы обработки сигналов в адаптивных антенных решетках и компенсаторах помех / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. - 194 с.
4. **Rozé, A., Crussière M., Hélard M., Langlais C.** // 2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) Conf. Proc. 2016. P. 86.
5. **Sun, S., Rappaport T. S., Shaft M.** // IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) Conf. Proc. 2018. P. 589.

6. **Vook, F. W., Ghosh A., Thomas T. A.** // *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014) Conf. Proc.* 2014, P. 1.
7. 3GPP TR 36.873 (V12.1.0): “Study on 3D channel model for LTE (Release 12)”. March, 2015.
8. **Pratschner, S., Schwarz S., Rupp M.** // *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) Conf. Proc.* 2017. P. 1.
9. **Chen, C., Lin D. W.** // *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) Conf. Proc.* 2014. P. 6484.
10. **Прокис, Дж.** Цифровая связь. Пер. сангл. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио-исвязь, 2000. 800 с.
11. **Ortiguera, M.D., Matos C.J.C., Moises S., Piedade M.S.**// *Nonlinear dynamics.* Kluwer Academic Publishers. 2002. V. 29. P. 173.

**V.V. Kuptsov, O.A. Shmonin, S.N. Trushkov, A.S. Mikhailova**

## **FULL CHANNEL MATRIX RECONSTRUCTION IN COMMUNICATION SYSTEMS WITH HYBRID ANTENNA ARRAYS**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky

The paper is dedicated to the full channel matrix reconstruction problem in the wireless communication system with the combined analog-digital (hybrid) beamforming scheme. An iterative channel reconstruction algorithm is proposed. The algorithm efficiency is studied in case of the dynamic channel. A channel prediction method is applied to improve the reconstruction quality. The accuracy of the channel reconstruction is investigated for a wide range of user mobility values. It is shown via numerical simulation that the proposed algorithm provides a high accuracy of the full channel matrix reconstruction even in case of the dynamically changing channel.

**Key words:** channel matrix reconstruction, hybrid beamforming scheme, LTE, channel prediction.

А.В. Пучков, А.П. Евсеев, И.Я. Орлов

**ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ  
ДЛЯ «СВЕРХРАЗРЕШАЮЩИХ» ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК  
И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

Предлагается метод синтеза апертуры антенны, основанный на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах и расчёте мгновенных отсчётов сигнала для дополнительных («виртуальных») элементов эквидистантной линейной антенной решётки со значительно увеличенным размером апертуры. Благодаря такому алгоритму данный метод обеспечивает сужение главного лепестка диаграммы направленности. Предлагаемый подход смоделирован в имитационной модели в среде «LabVIEW», а также апробирован в натуральных экспериментах в дециметровом диапазоне и на гидроакустических сигналах. Предварительные результаты дают выигрыш в угловом разрешении в  $10\div 100$  и более раз.

**Ключевые слова:** алгоритм полигармонической экстраполяции, синтез апертуры, угловое «сверхразрешение», адаптация к существенно нестационарной электромагнитной обстановке, экстраполяция суперпозиции гармонических сигналов, цифровые приёмные антенные решётки, компьютерное моделирование в среде «LabVIEW».

При создании радиолокационных устройств ширина главного лепестка антенны является важнейшим фактором эффективности системы в целом, однако, традиционный путь влечёт неизбежное увеличение размеров апертуры, а, следовательно, габаритов, веса, стоимости и конструктивной сложности. Цифровые антенные решётки в значительной степени решают проблему, но влекут за собой свои специфические отрицательные моменты. Задача максимизации углового разрешения антенных устройств, при их ограниченных линейных размерах, с давних времён и по настоящее время актуальна в различных областях радиоэлектроники, а также гидроакустики, сейсморазведки, медицинской диагностики и других.

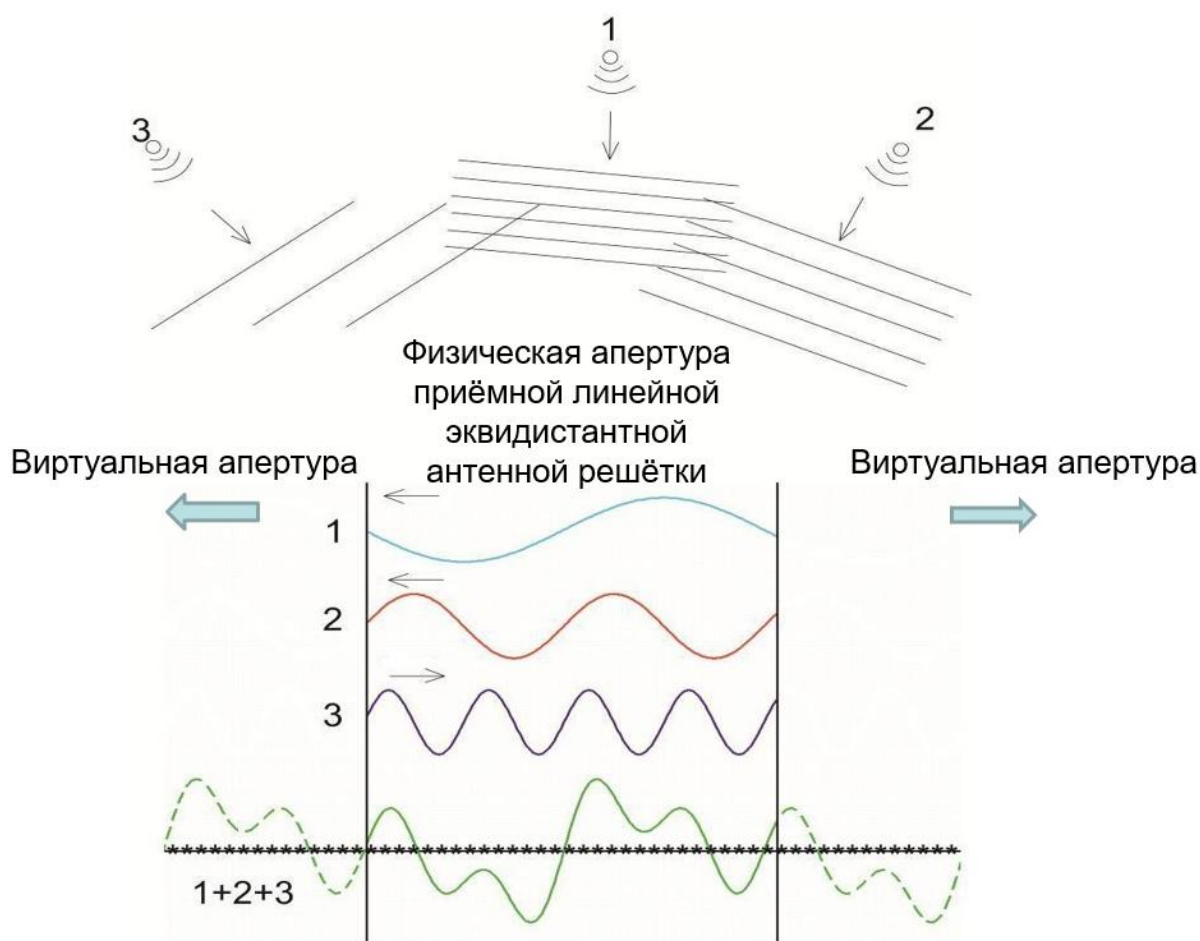
Наряду с подходами использованными в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой (РСА) и многочисленных методах нелинейного спектрального анализа для антенных решёток, которые при всей их сложности и дороговизне реализации, несомненно, дают существенный выигрыш относительно известного релеевского критерия [1, 2, 3], известны попытки решения задачи углового «сверхразрешения» использующие различные алгоритмы синтеза виртуальных (дополнительных) участков апертуры с целью последующего включения дополнительных отсчётов в окончательный алгоритм диаграммообразования [4, 5, 6].

Рассмотрим реализуемость предложенного нами в работе [7] метода синтеза апертуры антенны основанного на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах.

Принцип получения эффекта «сверхразрешения» при полигармоническом синтезе апертуры поясним на примере падения плоской монохроматической волны на одномерную, линейную, эквидистантную антенную решётку, состоящую из двух приёмных эле-



ментов – диполей/микрофонов (в общем случае будем называть «сенсором») и отображенную на рис. 1.



**Рисунок 1. Постановка задачи**

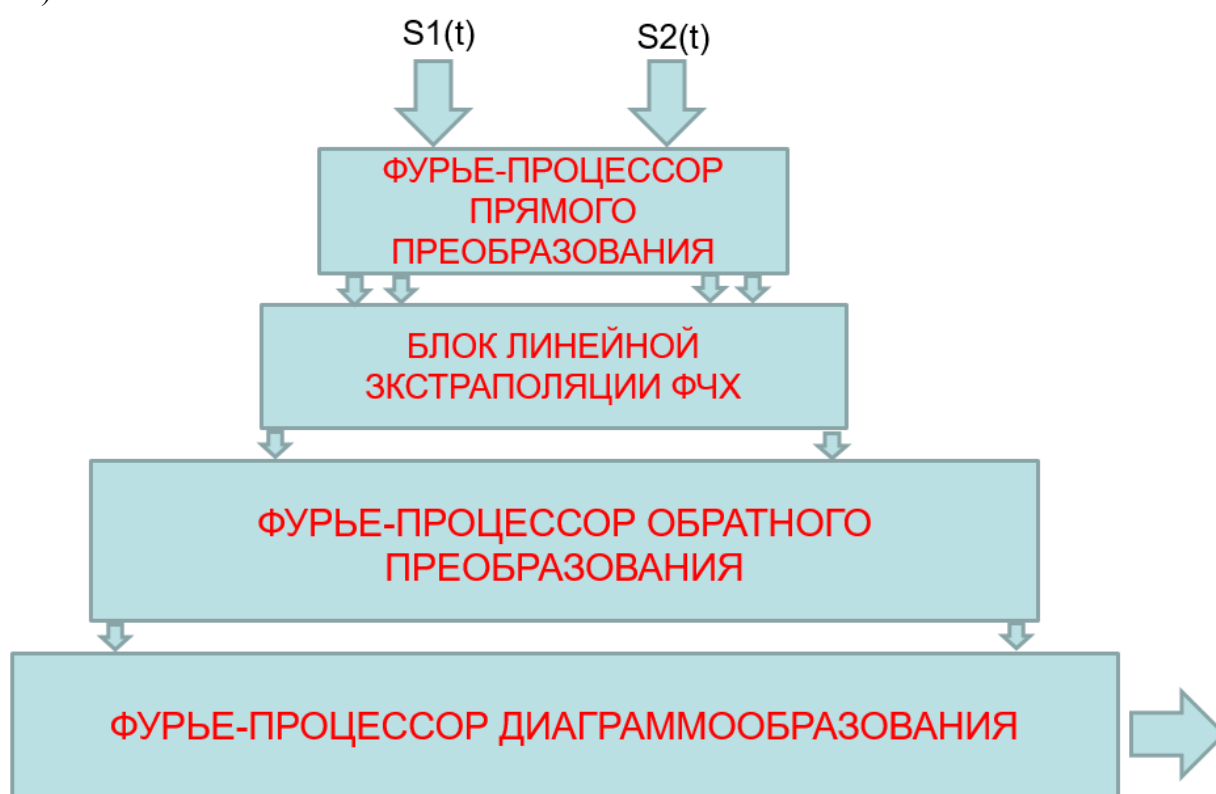
Для плоской волны и линейной решётки закон изменения фазы вдоль апертуры – линейный. Это позволяет вычислить спектры в виртуальных каналах, а при переходе к временным реализациям использовать полученные отсчёты в алгоритме диаграммообразования. Заметим, что расстояние между сенсорами не должно превышать половины длины волны для устранения неоднозначности. Выходные аналоговые сигналы от сенсоров поступают на входы аналого-цифровых преобразователей, работающих строго синхронно и отправляющих оцифрованные сигналы на регистры сдвига, тактируемые стабильным генератором импульсов. Эти требования объясняются условием минимизации фазовых искажений при последующем Фурье-преобразовании получаемых последовательностей отсчётов. Фурье-преобразование выполняется в режиме скользящего окна над последовательностью оцифрованных отсчётов реальных сенсоров.

Исходя из принятой конфигурации легко заметить, что плоский фронт падающей волны при отклонении от перпендикулярного падения на прямую, соединяющую фазовые центры реальных сенсоров, достигает их в разное время, что отображается в разном фазовом сдвиге гармоник спектра при выполнении процедуры Фурье-преобразования. Характер изменения набега фазы в зависимости от номера канала - линейный. При этом амплитуды гармоник в спектрах сигналов одного и другого сенсора практически отличаются лишь на величину

внутренних шумов каждого канала и, при достаточном большом количестве точек включаемых в окно БПФ, совпадают для каждой гармоники. Таким образом, для получения полного спектра сигнала в ближайшем виртуальном канале необходимо провести линейную экстраполяцию значений фазы для каждой гармоники, а амплитуды гармоник заменить их полусуммой.

Далее, при выполнении обратного Фурье-преобразования над вычисленным спектром получим последовательность отсчётов сигнала для виртуального канала. Повторяя указанную процедуру необходимое число раз получим желаемое число элементов виртуальной апертуры, которые могут использоваться наряду с реальными. После выполнения процедуры диаграммообразования, которая может выполняться, как путём прямого Фурье-преобразования по упорядоченным номерам одноимённых отсчётов реальных и виртуальных последовательностей с целью получения полного пространственного спектра, так и простого суммирования полученных отсчётов и получения при этом отклика антенны в центре главного лепестка диаграммы направленности [7, 8, 9, 10, ].

Применение одной и той же последовательности операций к каждой из компонент спектра позволяет применить термин «полигармонический» к данному способу синтеза апертуры (рис. 2).

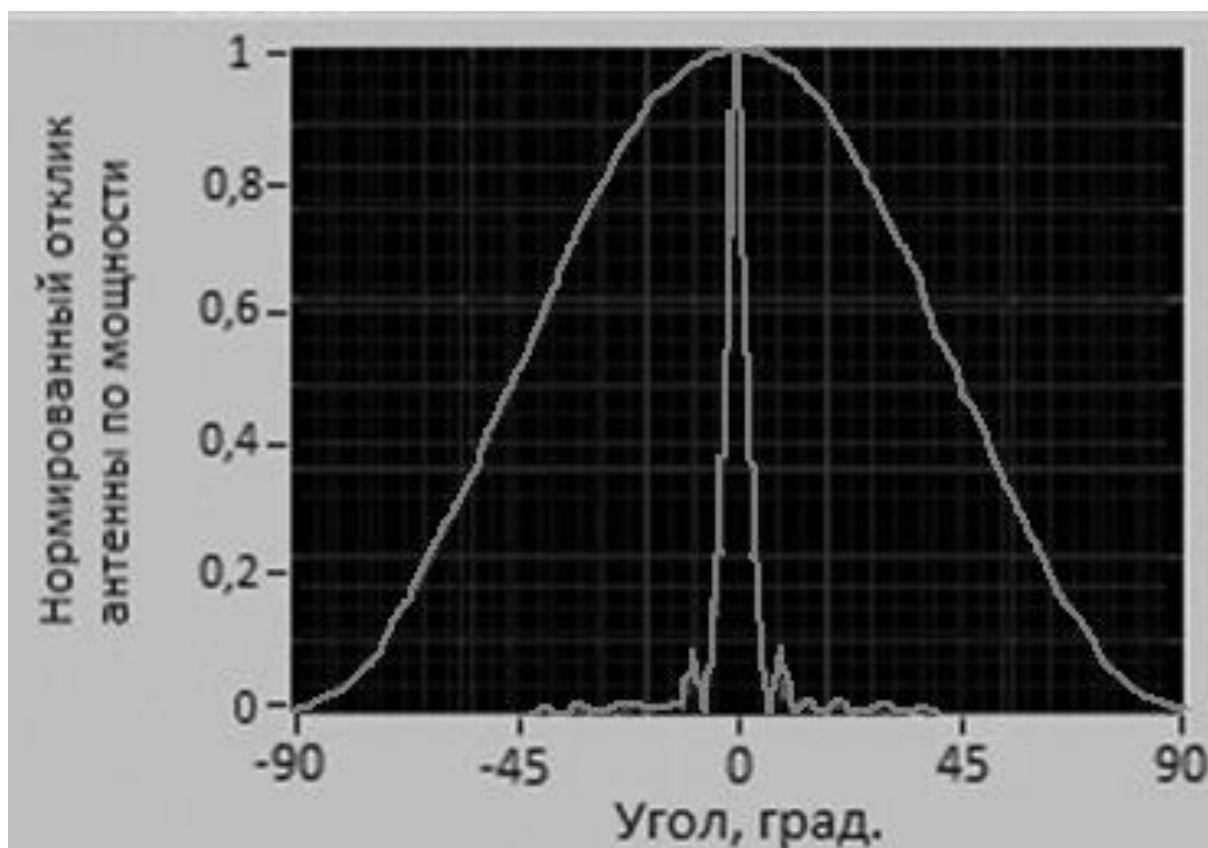


**Рисунок 2. Схема алгоритма полигармонического синтеза апертуры**

Расчёты в среде графического программирования «LabVIEW» иллюстрируют работоспособность предложенного подхода (рис. 3).

Для оценки реализуемости полученных результатов моделирования предложенного алгоритма была проведена серия экспериментов с использованием реальных волновых сигналов различной физической природы. Для проведения исследования эффективности работы алгоритма при приёме гидроакустических сигналов использовался экспериментальный гидроаку-

стический бассейн кафедры акустики радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского.



**Рисунок 3. Диаграммы направленности 2-х элементной и 50-ти элементной антенных решёток**

При проведении экспериментов использовалось оборудование диапазона гидроакустических колебаний вблизи 90 кГц. Пьезокерамический излучатель со сферической диаграммой направленности возбуждался от генератора Tektronix AFG 3102 через усилитель У7-5 в режиме амплитудно-импульсной модуляции. Длительность импульса модуляции и период повторения выбирались из условий надёжной отстройки от сигналов реверберации для имеющейся геометрии рабочего объёма бассейна и составили 5,0 и 20,0 миллисекунд, соответственно. В противном случае это могло бы затруднить интерпретацию полученных результатов. Приём сигналов проводился парой гидроакустических микрофонов с круговой диаграммой направленности и усилителями BSK 2690, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга, что составило 0,4 длины волны для сигнала с выбранной несущей частотой и образующих двухэлементную антенную решётку. Регистрация сигналов для последующей обработки выполнялась двухканальным цифровым осциллографом Tektronix DPO 4032 с хорошим запасом по частоте и разрядности дискретизации. Образцы зарегистрированных сигналов приведены на рис. 4 и 5, соответственно.

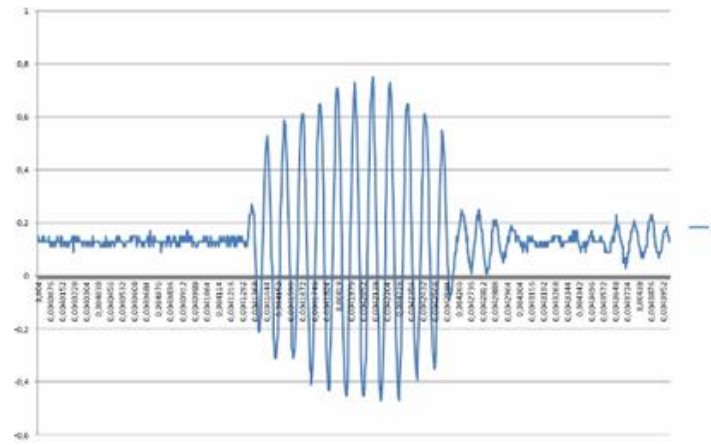


Рисунок 4. Зарегистрированный сигнал с левого микрофона

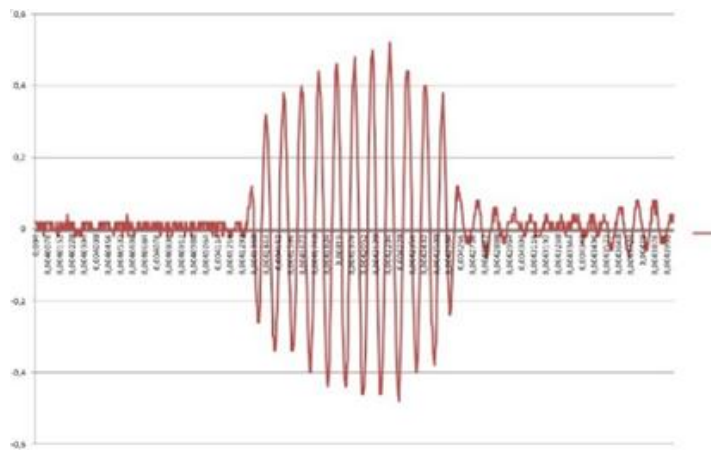


Рисунок 5. Зарегистрированный сигнал с правого микрофона

Приведённые рисунки (рис. 6-10), показывают диаграммы направленности по мощности, вычисленные через Фурье-преобразование наборов отсчётов соответствующего разному количеству сенсоров (2; 20; 50 и 100 сенсоров), пришедшего на оба микрофона квазиплоского волнового фронта.

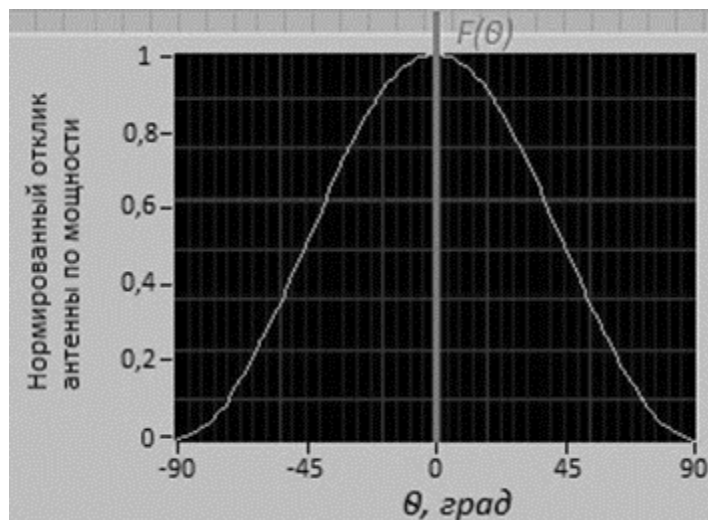


Рисунок 6. Диаграмма направленности реальной 2-х элементной антенной решётки

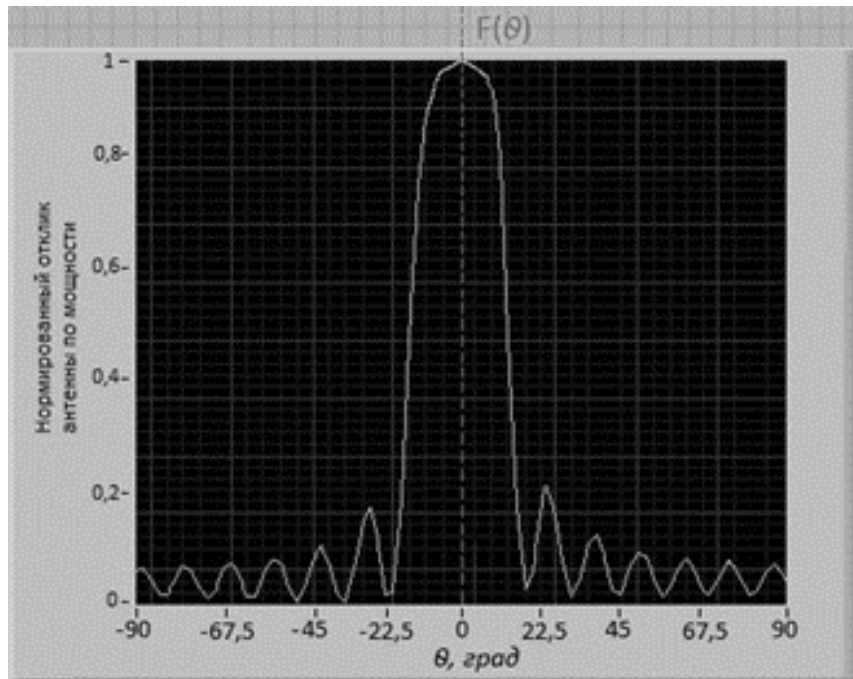


Рисунок 7. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки, при добавлении 18-ти «виртуальных» отсчётов

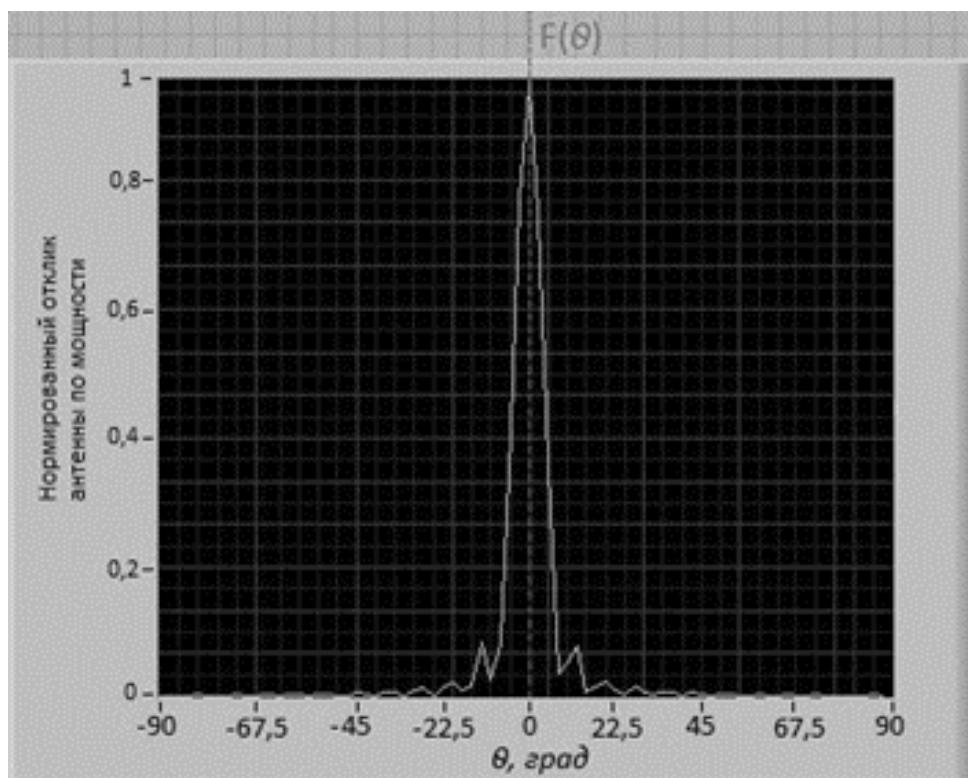


Рисунок 8. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки, при добавлении 48-ми «виртуальных» отсчётов

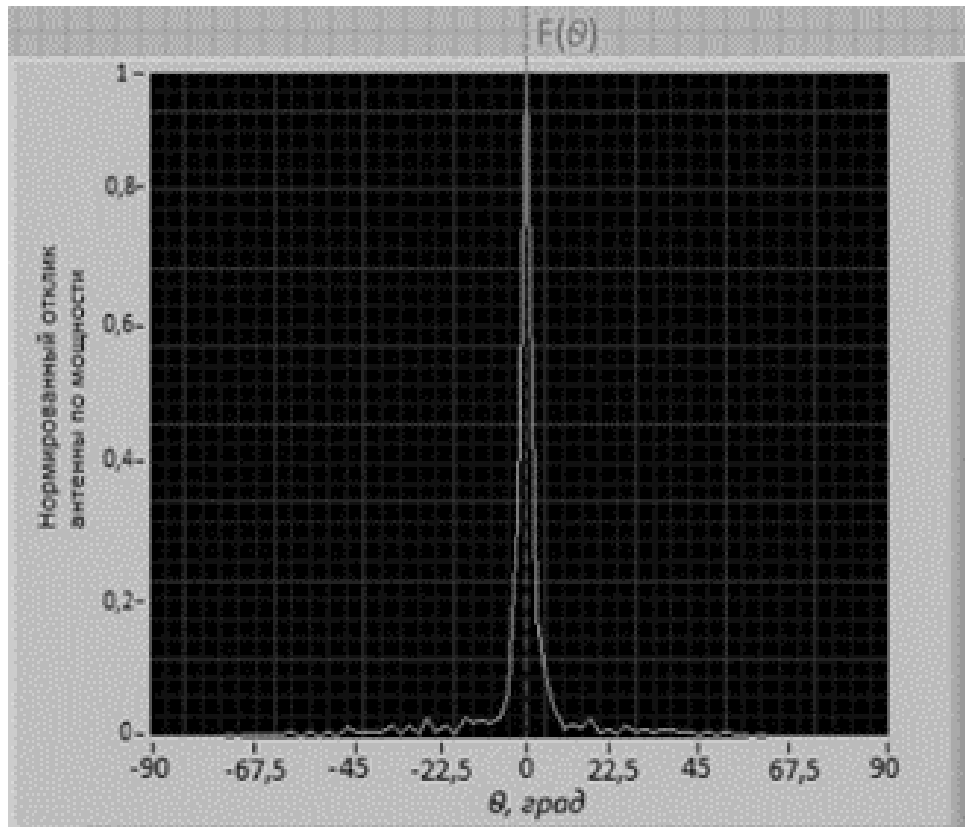


Рисунок 9. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решётки, при добавлении 98-ми «виртуальных» отсчётов

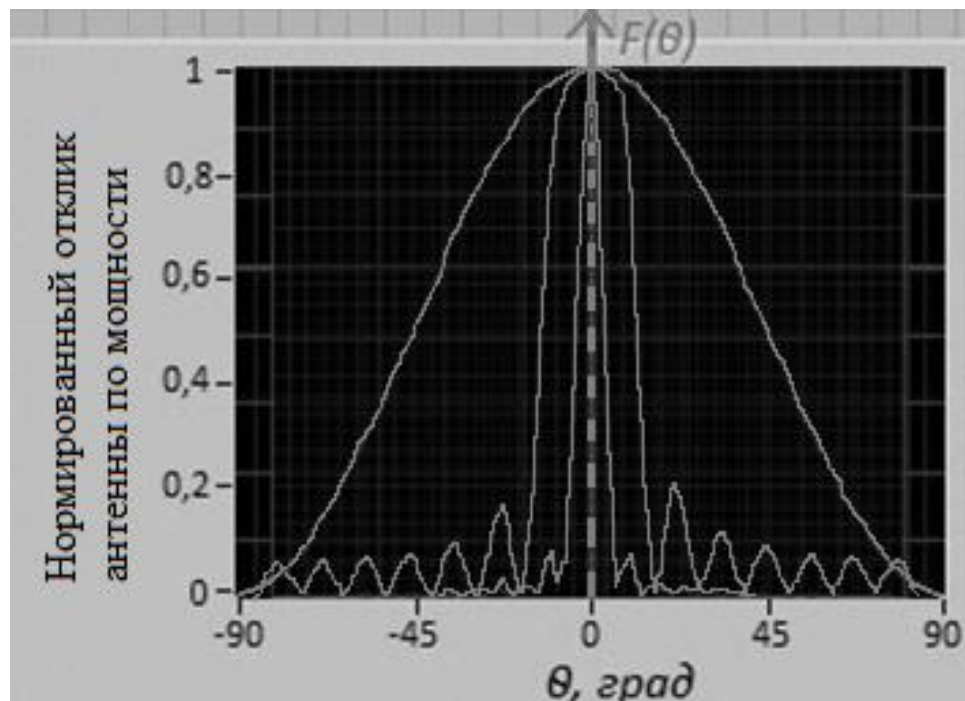
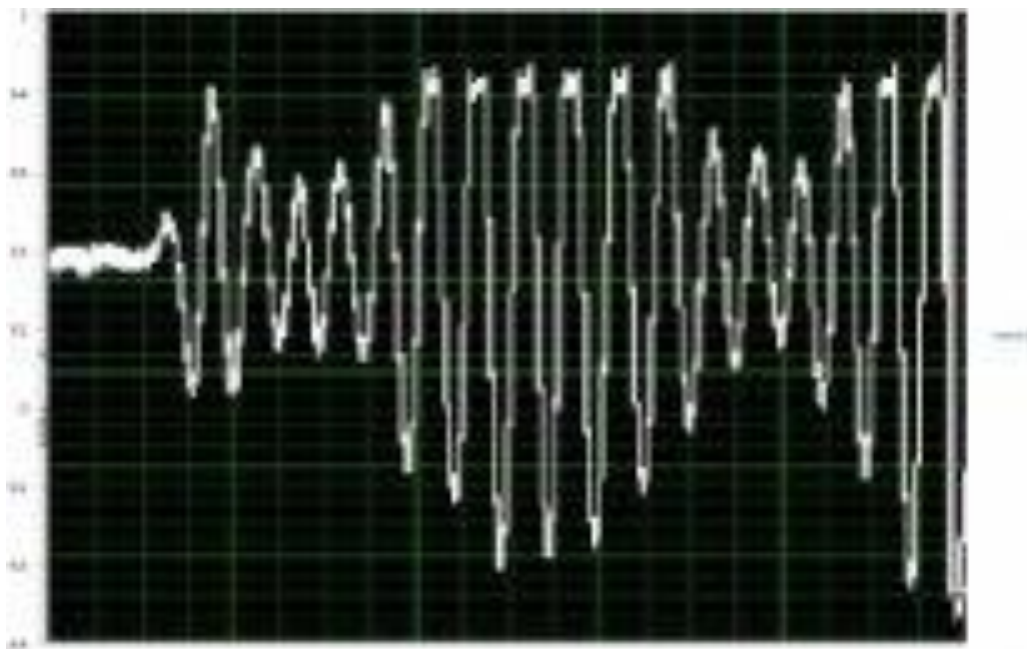


Рисунок 10. Диаграммы направленности 2-х элементной, 20-ти элементной и 50-ти элементной антенных решёток

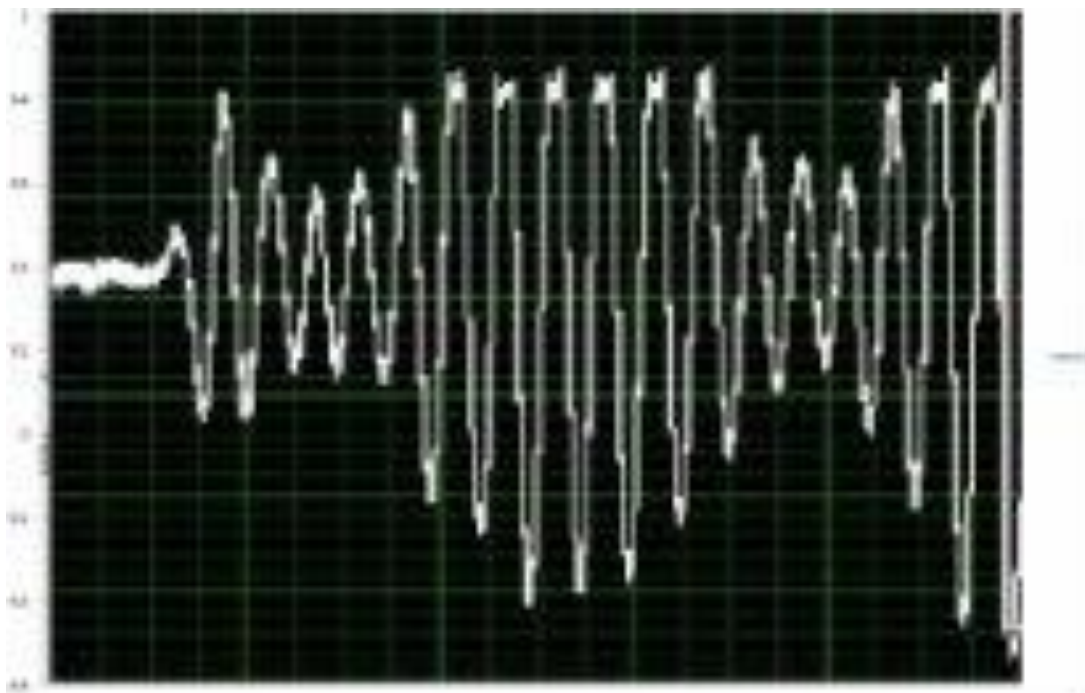


Из сравнения рис. 6-9 с рис. 10 видно, что при добавлении «виртуальных» отсчётов монотонно сужается главный лепесток диаграммы направленности синтезированной антенной решётки, что эквивалентно добавлению элементов антенной решётки.

При проверке свойств алгоритма полигармонического синтеза апертуры в дециметровом диапазоне использовался аппаратный комплекс из двух синхронно работающих цифровых приёмников USRP-2920 и штыревых антенн, разнесённых на 15 сантиметров с общим контр-рефлектором. Производились записи радиосигналов станций диапазона FM размером 500-1000 отсчётов в реальном времени (рис. 11, 12).



**Рисунок 11. Запись радиосигнала станций FM диапазона**



**Рисунок 12. Запись радиосигнала станций FM диапазона**

Обработка радиосигналов предложенным алгоритмом показала результаты аналогичные рассмотренному случаю использования гидроакустических сигналов (рис. 6-10).

**Выводы:**

- алгоритм синтеза апертуры антенны, основанный на учёте фазовых соотношений каждой из гармоник суперпозиции всех принимаемых сигналов в соседних приёмных элементах, работоспособен и потенциально ориентирован на работу в режиме реального времени в радиолокации и гидролокации;
- рассмотренный подход может быть полезен во многих областях науки и техники, начиная с радио-гидролокации и заканчивая сейсморазведкой и медико-биологической аппаратурой.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-08-04000 и 13-07-00211.*

### Библиографический список

1. **Антипов, В.Н.** Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов [и др.] - М.: Изд-во «Радио и связь», 1988, 301 с.
2. **Ермолаев, В.Т.** Адаптивная пространственная обработка сигналов в антенных решётках: учеб. пособие / В.Т. Ермолаев, Е.А. Маврычев, А.Г. Флакман. - Нижегородский гос. тех., 2005. - 72 с.
3. **Горелик, Г.С.** Колебания и волны: 2-е изд. / Г.С. Горелик; под ред.С.М. Рытова. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.
4. **Лаговский, Б.А.** Антенны. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решётками // Радиотехника. 2013. №.6 (193). С. 9.
5. **Ратынский, М.В.** // Радиотехника. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со сверхразрешением. 1992. №10-11. с.12.
6. **Гелесев, А.И.,** Зайцев В.Е., Красько А.Г., Порсев В.И. Патент РФ на изобретение № 2642883, заявка № 2017103090 от 31.01.2017 г. «Способ углового сверхразрешения цифровыми антенными решётками».
7. **Евсеев, А.П.** Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решётки / А.П. Евсеев [и др.] // Тр. XXIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - ИСТ-2017», посвящённой 100-летию НГТУ. 21 апреля 2017 г. // – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2017. - С. 87.
9. **Евсеев, А.П.** Алгоритм полигармонической экстраполяции и возможности его применения для решения некоторых задач радиолокации, навигации и связи // А.П. Евсеев, В.В. Баданов, И.Я. Орлов // Труды 14-й международной научно-технической конференции, «Радиолокация, навигация и связь». 15-17 апреля 2008 г. // / Ред. Б.Я. Осипов – Воронеж. – 25 с.;
10. **Евсеев, А.П.** Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решётки / А.П. Евсеев, С.А. Козлов, А.В. Пучков // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвящённой 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика (Н. Новгород, 12–20 мая 2016 г.) // / Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова. Нижний Новгород: ННГУ, 2016 – 144 с.



A.V. Puchkov, A.P. Evseev, I. Y.Orlov

**POLYHARMONIC ALGORITHM FOR SINTEZIS OF THE APERTURE SUPERRESOLUTION DIGITAL ANTENNA ARRAYS AND ITS IMPLEMENTATION**

Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod

Abstract: the article proposes a method for synthesizing the antenna aperture based on the phase relationships of each harmonic of the superposition of all received signals in adjacent receiving elements and the calculation of instantaneous signal samples for additional ("virtual") elements of an equidistant linear antenna array with a significantly increased aperture size. Thanks to this algorithm, this method provides a narrowing of the main lobe of the radiation pattern. The proposed approach is modeled in a simulation model in the LabVIEW environment, and also tested in field experiments in the decimeter range and on hydroacoustic signals. Preliminary results give a gain in angular resolution of 10÷100 or more times.

**Keywords:** polyharmonic extrapolation algorithm, aperture synthesis, angular "superresolution", adaptation to a substantially unsteady electromagnetic environment, extrapolation of a superposition of harmonic signals, digital receiving antenna arrays, a computer simulation by «LabVIEW».

А.С. Лаврентьева, О.А. Морозов, Ю.Е. Чуманкин

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИ СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

В работе предложен метод оценки параметров диаграммы направленности (ДН) деформированной зеркальной антенны. Проверена применимость представления изменения параметров ДН при сложной деформации рефлектора вдоль двух координатных осей суммой изменений параметров при простых деформациях вдоль одной из координатных осей. Для проверки параметры ДН оценены с использованием метода блестящих точек и с использованием принципа суперпозиции для значений параметров. Показано, что рассмотренное приближение не вносит значительной погрешности в оценку параметров ДН.

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, метод блестящих точек, рефлекторные антенны, опорные точки, корректировка ДН.

В настоящее время актуальна задача точного определения диаграммы направленности рефлекторной антенны. Из-за деформаций, возникающих вследствие длительной эксплуатации, одностороннего нагрева солнцем, действия силы тяжести, форма рефлектора может изменяться [1]. Это приводит к искажению ДН. Есть методы, которые требуют повторного вычисления ДН для учета искажений, но для больших отражателей расчеты, связанные с повторным вычислением электромагнитных взаимодействий, могут привести к неприемлемым вычислительным и временным затратам для заданного уровня точности [2]. Поэтому необходимо построить наиболее быстрый метод без пересчета ДН.

Расчет ДН антенны в данной работе производится методом блестящих точек. Напряженность суммарного электрического поля, отраженного от всех точек поверхности рефлектора, в точке наблюдения  $P$  находится по формуле [3]:

$$\mathbf{E}_P = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{E}_i \exp(-jkr_i)}{r_i}, \quad r_i = a_i + b_i, \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}_i$  – амплитуда напряженности электрического поля в  $i$  – ой точке,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве,  $a_i$  – расстояние от точки на антенне до точки наблюдения  $P$ ,  $b_i$  – расстояние от облучателя до  $i$  – ой точки на антенне,  $N$  – количество узлов антенны.

Идеальная параболическая антенна подвержена различным деформациям, возникающим при изготовлении и эксплуатации антенны. В результате, для космических систем пассивной пеленгации характерны периодические изменения формы рефлектора вследствие неравномерного прогрева и, соответственно, искажения диаграммы направленности антенны. Исследования показывают [3], что характерная деформация, возникающая при одностороннем нагреве рефлектора антенны, может быть описана с помощью следующей модели: точки на поверхности рефлектора сдвигаются в  $\alpha$  раз от своего истинного положения. Подобный тип деформации математически может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned}
F' &= F(\alpha_x x, \alpha_y y, z); \\
x &\rightarrow \alpha_{x>0} x, \quad x > 0; \quad x \rightarrow \alpha_{x<0} x, \quad x < 0; \\
y &\rightarrow \alpha_{y>0} y, \quad y > 0; \quad y \rightarrow \alpha_{y<0} y, \quad y < 0; \\
z &\rightarrow z;
\end{aligned}
\tag{2}$$

где  $\alpha_{x>0}$ ,  $\alpha_{y>0}$ ,  $\alpha_{x<0}$ ,  $\alpha_{y<0}$  – параметры, отвечающие за степень вытянутости антенны в каждом из двух соседних квадрантов,  $F$  – поверхность идеального рефлектора,  $F'$  – поверхность деформированного рефлектора. Оси  $Ox$  и  $Oy$  расположены в плоскости раскрытия рефлектора, ось  $Oz$  совпадает с осью симметрии параболоида

При условии малости деформации сложную деформацию рефлектора можно представить, как совокупность простых деформаций, примем, что и для расчёта ДН антенны можно применить принцип суперпозиции, по крайней мере, в области малых деформаций рефлектора. Зная смещение электрической оси  $s^{x-}$ ,  $s^{x+}$ ,  $s^{y-}$ ,  $s^{y+}$ , можно найти смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора как сумму смещений электрической оси ДН при простых деформациях. Ширину главного лепестка при произвольной деформации также можно представить, как сумму изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН:

$$\begin{aligned}
s^{\text{def}} &= s^{x+} + s^{y+} + s^{x-} + s^{y-} \\
w^{\text{def}} &= \Delta w^{x+} + \Delta w^{y+} + \Delta w^{x-} + \Delta w^{y-} + w^{ud}
\end{aligned}
\tag{3}$$

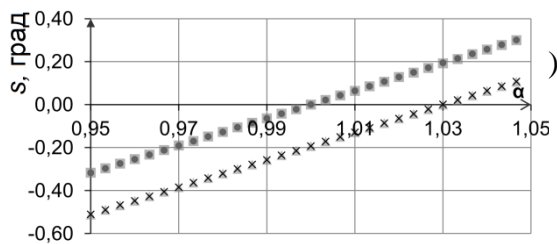
где  $s^{\text{def}}$  – смещение электрической оси,  $w^{\text{def}}$  и  $w^{ud}$  – ширина главного лепестка ДН антенны с деформированным и антенны с недеформированным рефлектором соответственно.

Зная значения смещения электрической оси и ширины главного лепестка ДН при простых деформациях рефлектора вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$ , можно рассчитать на основе выражения (3) смещение и ширину главного лепестка при произвольных малых деформациях рефлектора антенны. Применимость данной модели проверена далее в работе расчетами диаграмм направленности при простых деформациях методом блестящих точек и сравнением рассчитанных значений смещения электрической оси и ширины главного лепестка по выражению (3) с результатами, полученными при расчете ДН для заданной сложной деформации методом блестящих точек.

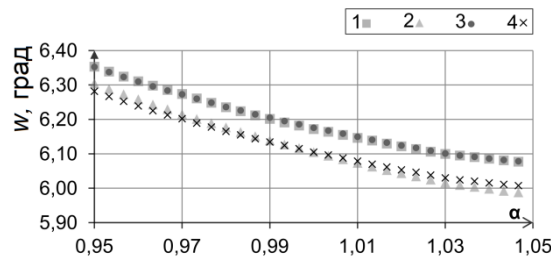
В данной работе рассматривается расчёт ДН осесимметричной однозеркальной длиннофокусной антенны со следующими параметрами: диаметр раскрытия  $D = 1$  м, фокусное расстояние  $F = 1,5$  м. Полный угол раскрытия составляет  $37,85^\circ$ . Облучатель находится в фокусе параболоида, длина волны  $\lambda = 0,1$  м. При моделировании антенны оси  $Ox$  и  $Oy$  декартовой системы координат располагались параллельно плоскости раскрытия рефлектора, ось  $Oz$  совпадает с осью симметрии параболоида, начало координат находится в фокусе параболоида.

На рисунке представлены результаты исследований зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль нескольких осей. Расчеты проводились для деформации рефлектора вдоль оси  $Oy$  в положительной области оси  $Oy$  при изменении в диапазоне  $\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$ , при фиксированном значении деформации в одной из следующих областей:

- 1) в положительной области оси  $Ox$  при  $\alpha_{x+} = 1,03$ ;
- 2) в отрицательной области оси  $Oy$  при  $\alpha_{y-} = 1,03$ .



б



**Смещение электрической оси и ширина главного лепестка от величины деформации рефлектора по оси  $Oy$  при фиксированном коэффициенте деформации  $\alpha_{x+} = 1,03$  (графики 1, 3),  $\alpha_{y-} = 1,03$  (графики 2, 4)**

Аналогичные результаты получаются при исследовании зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль положительного направления оси  $Ox$  при других фиксированных значениях деформации рефлектора. Полученные зависимости позволяют провести вычисление среднего квадрата ошибки между данными, полученными из численного моделирования методом блестящих точек и данными, полученными посредством расчетов по выражению (3), результаты расчета представлены в таблице.

**Средний квадрат разности между данными, рассчитанными по формуле (3) и методом блестящих точек**

Области деформации рефлектора антенны		Средний квадрат разности между данными, рассчитанных по формуле (3) и методом блестящих точек	
		Смещение электрической оси (град.)	Изменение ширины главного лепестка (град.)
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 0,95$	$7,29 \cdot 10^{-6}$	$21,07 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 1,03$	$5,07 \cdot 10^{-6}$	$9,21 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 0,95$	$6,91 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 1,03$	$5,66 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$

Видно, что средние квадраты ошибок для данных, полученных с использованием выражения (3) и с использованием метода блестящих точек при одновременной деформации рефлектора в различных областях имеют малые значения, что говорит о применимости принятых в работе приближений (выражение (3)).

Смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора антенны может быть найдено как смещение электрической оси ДН при простых деформациях. Ширина главного лепестка при произвольной деформации также может быть представлена как сумма изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН. Использование подобных приближений позволяет значительно сократить вычислительные затраты на расчет параметров ДН.

## Библиографический список

1. **Леонов, А.И.** Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. - М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. **Зырянов, Ю.Т.** Антенны: учеб. пособие / Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин, Белоусов О.А и др. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 128 с.
3. **Гурбаниязов, М.А.** Тепловые воздействия окружающей среды на зеркальные антенны [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iki.rssi.ru/oct4/2011/ppt/s5/gurbanniyazov.pdf>.

**A.S. Lavrenteva, O.A. Morozov, Y.E. Chumankin**

### **CALCULATION OF THE DIRECTIONAL PATTERN PARAMETERS FOR COMPLEX DEFORMATIONS OF THE MIRROR ANTENNA REFLECTOR**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Method for estimating the radiation pattern parameters of deformed parabolic antenna is proposed. The applicability of the representation of the directional pattern parameters change during complex deformation of the reflector along two coordinate axes by the sum of the changes under simple deformations along one of the coordinate axes is verified. For verification, the parameters of the pattern were estimated using the brilliant points method and using the principle of superposition for parameter values. It is shown that the considered approximation does not introduce a significant error in the estimation of parameters.

**Keywords:** directional pattern, method of brilliant points, parabolic antenna, directional pattern correction.

А.Н. Андреев, О.А. Морозов

**ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРОГРАММ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ  
МЕТОДА MULTITAPER SPECTRUM ESTIMATION**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

Рассматриваются подходы к построению спектрограмм сигнальных процессов на основе применения разных методов оценивания спектральной плотности мощности сигналов. С целью ослабления ограничений, связанных с методами, основанными на применении алгоритма быстрого преобразования Фурье в качестве основного рассмотрен метод Multitaper spectrum estimation.

**Ключевые слова:** спектральная плотность мощности, спектрограмма, преобразование Фурье, Multitaper spectrum estimation.

**Введение**

Получение и анализ спектрограмм сигналов является важной задачей в современной цифровой обработке сигналов. Спектрограмма сигнала позволяет проследить, как спектр сигнального процесса может изменяться со временем. Наиболее часто спектрограммы применяются для анализа звуков, в обработке и идентификации речи, радио- и гидролокации, сейсмологии [1, 2]. Обычно при построении спектрограмм используются алгоритмы вычисления спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов с применением подходов, основанных на вычислении быстрого преобразования Фурье (БПФ)

$$X[k] = \left| T \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N} \right|^2, \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (1)$$

При построении спектрограмм спектр вычисляется от последовательных окон сигнала. Такой метод спектрального анализа эффективен в вычислительном плане и подходит для большого количества различных сигнальных процессов. Тем не менее, данный метод имеет недостатки и ограничения к применению, наиболее важные из которых – ограничение частотного разрешения, то есть способности различать спектральные линии нескольких сигналов, и «утечка» энергии главного лепестка спектральной линии в боковые лепестки в частотной области, следствием чего является искажение (маскировка) спектральных линий других сигналов, присутствующих в рассматриваемом процессе. В результате надежность оценок спектрограмм, основанных на простом использовании алгоритмов дискретного преобразования Фурье значительно понижается из-за дисперсии оценки СПМ.

Рассмотренные выше ограничения методов, основанных на применении БПФ, наиболее сильно проявляют себя при исследовании и анализе коротких, конечных сигналов (процессов), с которыми чаще всего сталкиваются на практике. Существуют различные, отличные от методов, основанных на БПФ, подходы, в том числе и нелинейные, к оцениванию спектральной плотности мощности сигнальных процессов [1-5], например метод коррелограмм, авторегрессионное спектральное оценивание, метод Берга и др. Зачастую о сигнальном процессе известна какая-либо априорная информация, что позволяет выбрать к рассмотрению модель

процесса, которая будет являться его хорошей аппроксимацией. В таком случае можно попытаться получить более точную оценку СПМ.

Нелинейные алгоритмы спектрального оценивания [1, 3, 4] позволяют существенно снизить влияние боковых лепестков, повысить спектральное разрешение при обработке коротких выборок сигналов, однако им также присущи определенные недостатки, в частности, требуется выбор адекватного порядка модели, они менее устойчивы к влиянию шума.

### Метод оценки СПМ «Multitaper Spectrum Estimation»

Улучшить оценку СПМ, устраняя утечки энергии в боковые лепестки и уменьшить дисперсию спектральной оценки при построении спектрограмм сигналов позволяет линейный подход Multitaper, описанный D.J. Thomson [6, 7]. Идея подхода состоит в следующем: вместо того, чтобы использовать одно окно, следует использовать несколько специально сконструированных окон. При таком подходе каждое окно  $w_k$  из набора окон несколько отличается от остальных и уменьшает утечки энергии по частотам.

Многослойный спектр получается путем усреднения нескольких оконных БПФ, сгенерированных с помощью набора сужающихся ортогональных окон данных  $h_k[n]$ , известных как дискретные вытянутые сфероидальные последовательности (DPSS – discrete prolate spheroidal sequences) или функции Слепяна (рис. 1) [8, 9]. Последовательности (функции) Слепяна получили широкое распространение в качестве «оптимальных окон» при спектральном анализе, а также при синтезе цифровых фильтров с высокими избирательными способностями.

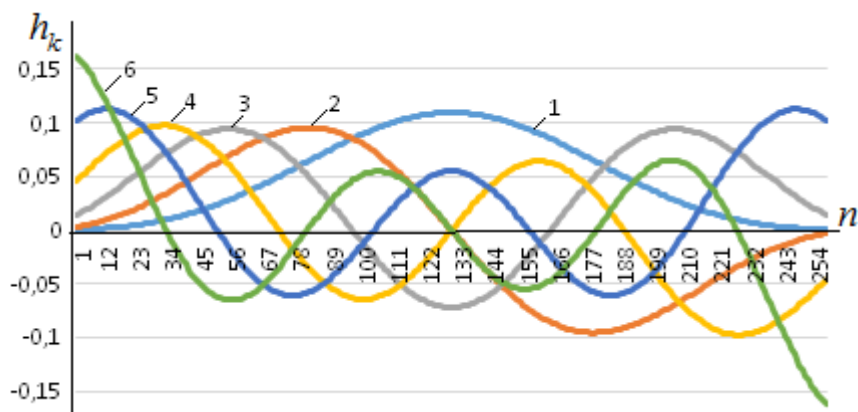


Рисунок 1. Дискретные вытянутые сфероидальные последовательности

Для получения спектрограммы СПМ каждой временной последовательности сигнала  $x[n]$  вычисляется как

$$S[m] = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] h_k[n] e^{-j2\pi km / N} \right|^2, \quad 0 \leq m \leq N-1. \quad (2)$$

Выражение (2) является оконным преобразованием Фурье (оконное БПФ), где  $h_k[n]$  – специальные окна DPSS последовательностей. Усредняя оконные БПФ, получают СПМ процесса

$$P_{mtp}[m] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} S_k(f). \quad (3)$$

Далее, как и при построении традиционных спектрограмм, вычисляются спектры от последовательных окон сигнала, каждый из вычисленных спектров образует столбец в спектрограмме. Получаемое при использовании метода Multitaper Spectrum Estimation оценки СПМ сигнала разрешение по частоте сравнимо с частотным разрешением классического оконного преобразования Фурье, спектральные пики имеют форму огибающей суммы отдельных спектров с относительно плоским верхом, что может затруднить определение центральной частоты. Однако уровень боковых лепестков значительно снижается, что во многих случаях позволяет идентифицировать слабые спектральные компоненты на фоне сильных.

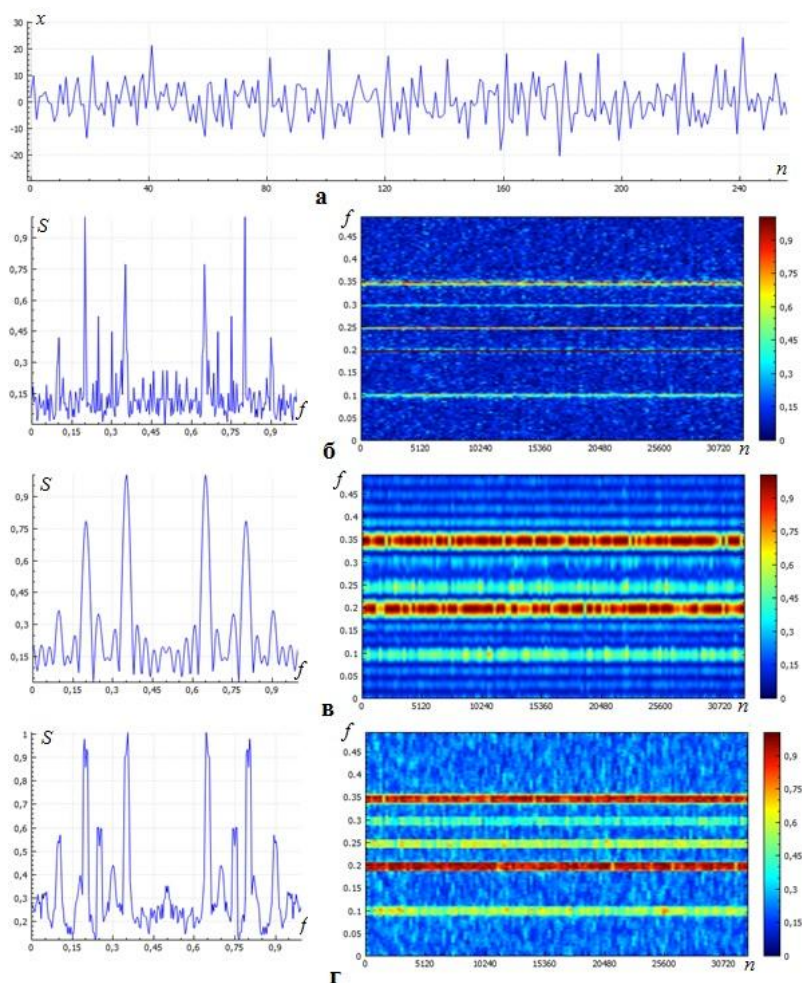
### Сравнение методов построения спектрограмм

В работе реализовано построение спектрограмм сигналов с использованием различных, в том числе нелинейных, методов вычисления СПМ сигналов. Для сравнения методов построения спектрограмм использован сигнал (рис. 2, а), состоящий из 5 синусоид разной частоты и амплитуды и белого гауссового шума

$$s[t] = \sum_{i=1}^{L=5} A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) + \xi(t), \quad (4)$$

отношение сигнал/шум  $-3$  дБ.

На рис. 2 б, в, г продемонстрированы результаты вычисления СПМ отдельной реализации и спектрограмм сигнала вида (4) разными линейными методами спектрального оценивания.



**Рисунок 2. СПМ и спектрограммы гармонического сигнала:**  
*а* – сигнал, *б* – метод периодограмм (без усреднения),  
*в* – метод коррелограмм, *г* – метод Multitaper Spectrum Estimation



Преимущество использования подхода к построению спектрограмм сигналов на основе метода Multitaper Spectrum Estimation в том, что оценки СПМ получаются более точными и устойчивыми при сравнимом с линейными методами (на основе БПФ) спектральном разрешении, что связано с использованием набора специальных окон, в результате чего устраняются связанные влиянием спектра функции окна искажения. Можно отметить, что на спектрограммах, вычисленных на основе подхода Multitaper, спектральные компоненты сигнала отчетливо различаются по амплитуде. Платой за улучшение качества оценок СПМ выступает повышение вычислительной сложности алгоритма вычисления спектрограмм сигналов, но эта сложность успешно преодолевается на современном уровне развития вычислительной техники.

Выражения (2), (3) определяют некогерентный метод построения спектральных оценок Multitaper. В дальнейшем планируется исследовать данный метод в случае квазикогерентного (с сохранением фазовой информации) сложения отдельных составляющих нескольких специальных (DPSS) оконных БПФ.

### Библиографический список

1. **Марпл.-мл., С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл.-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
2. **Сергиенко, А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
3. **Кривошеев, В.И.** Современные методы цифровой обработки сигналов. Цифровой спектральный анализ / В.И. Кривошеев – Н.Новгород: Изд-во нижегородского государственного университета, 2006. – 117 с.
4. **Сорохтин, М.М.** Применение нелинейного спектрального оценивания в задаче определения взаимной временной задержки сигналов / М.М. Сорохтин, Е.М. Сорохтин, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия ВУЗов. Радиофизика, 2007, том 50, №4, с.357-363.
5. **Клименченко, П.В.** Авторегрессионный алгоритм Берга для обнаружения целей и определения их скоростей на фоне пассивных помех, основанный на спектральных и статистических различиях целей и помех / П.В. Клименченко, В.Н. Жураковский // Радиостроение, № 4. 2017. – С. 1-15.
6. **Thomson, D.J.** Spectrum estimation and harmonic analysis / D.J. Thomson // Processings of the IEEE, V. 70, № 9. 1982.
7. **Van Drongelen, W.** Multitaper Power Spectrum Estimation / W. Van Drongelen. 2014. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/752d/1a551b96559458064323eb3de7faaaef4c4e.pdf>.
8. **Gruenbacher, D.M.** A Simple Algorithm for Generating Discrete Prolate Spheroidal Sequences / D.M. Gruenbacher, D.R. Hummels // IEEE Transactions on signal processing. V.42, № 11. 1994.
9. **Лимарев, А.Е.** Быстрый алгоритм формирования дискретных последовательностей Слепяна / А.Е. Лимарев // Теория и техника радиосвязи, № 2. 2013.

**A.N. Andreev, O.A. Morozov**

**CONSTRUCTION OF SPECTROGRAMS OF SIGNALS BASED ON THE  
MULTITAPER SPECTRUM ESTIMATION METHOD**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Approaches to constructing spectrograms of signal processes based on the use of different methods for estimating the spectral power density of signal are considered. In order to weaken the limitations of methods based on the application of the fast Fourier transform algorithm, the Multitaper spectrum estimation method is considered as the main one.

**Keywords:** spectral power density, spectrogram, Fourier transform, Multitaper spectrum estimation.

Е.Д. Байков, О.А. Морозов

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЛИНИЙ РАВНОЙ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО МЕТОДА ПО ДАННЫМ С ДВУХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

В работе рассматривается алгоритм определения местоположения источников излучения разностно-дальномерным методом на основе оценки взаимных временных задержек сигналов. Предложен вычислительно эффективный алгоритм построения линий равной временной задержки. Метод основан на итерационной процедуре оценки полной фазы сигналов, регистрируемых двумя спутниками.

**Ключевые слова:** линия положения, взаимная временная задержка.

### Введение

В настоящий момент для решения задачи определения координат получили распространение многопозиционные радиолокационные системы (МПРЛС) [1], использующие искусственные спутники Земли в качестве ретрансляторов сигналов от наземных источников. В современных МПРЛС используются как отдельные виды радиолокации, так и их совокупность, в них также можно применять различные методы определения местоположения целей в пространстве. МПРЛС в сравнении с однопозиционной РЛС обладает рядом преимуществ. Основные из этих преимуществ: возможность формирования сложных пространственных зон обзора; лучшее использование энергии в системе; большая точность измерения местоположения целей в пространстве; возможность измерения полного вектора скорости целей; повышение помехозащищенности по отношению к активным и пассивным помехам. Однако возникает необходимость синхронизации работы позиций и организации линий передачи данных. Возрастает и сложность обработки информации из-за большого её объема. Однако, несмотря на указанные недостатки, МПРЛС получили широкое распространение в практике радиолокации.

Одним из наиболее широко применяемых пассивных методов определения местоположения источника радиоизлучения является разностно-дальномерный метод (РДМ). Данный метод основан на одновременной регистрации сигнала от источника радиоизлучения сразу несколькими пунктами системы. Реализация РДМ требует точного знания координат приемных пунктов системы и не предъявляет жестких требований к их временной синхронизации.

Для определения координат источника радиоизлучения  $(x_M, y_M, z_M)$  необходимо решить систему нелинейных уравнений. Обычно данная система сводится к задаче глобальной оптимизации вида [2, 3]:

$$(x'_M, y'_M, z'_M) = \operatorname{argmin} \Phi(x_M, y_M, z_M, \hat{\lambda}), \quad (1)$$

где  $\Phi(\cdot)$  характеризует меру близости функциональной зависимости координат модельных параметров и измеренных  $\hat{\lambda}$ . Измеряемая разность дальностей:

$$\begin{cases} \Delta R = R_1 - R_2 = c(t_1 - t_2) = c\tau \\ R_1 = \sqrt{(x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2}, \\ R_2 = \sqrt{(x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2} \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_1, t_2$  – время распространения сигнала от источника  $M$  к приемникам 1 и 2 соответственно,  $\tau$  – временная задержка распространения сигнала к приемнику 1 относительно приемника 2. Геометрическое место точек, соответствующих одному значению навигационного параметра  $c\tau$ , принято называть линией положения. Пересечение двух линий положения указывает на местоположение объекта. Таким образом, для получения оценки местоположения ИРИ на плоскости Земли разностно-дальномерная система должна состоять минимум из трех пунктов приема (ПП), а для оценки местоположения источника в пространстве – минимум из четырех ПП [4].

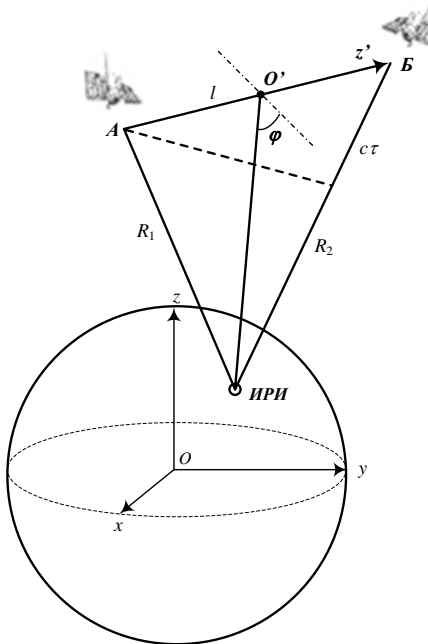


Рисунок 1

Система (4) может быть решена путем сведения задачи к оптимизации функционала суммы квадратов ошибок (1). На основе системы нелинейных уравнений (4) формируется функционал квадратичной ошибки и для его минимизации может быть использован один из методов многомерной оптимизации, кроме того необходимо решать проблему многоэкстремальности. Данный подход требует значительных вычислительных затрат. Повысить вычислительную эффективность задачи местоопределения источника излучения можно с помощью перехода к методу построения линий положения.

Для построения линии положения в работе предложен следующий алгоритм [5]. Введем систему координат  $(x', y', z')$  с началом в центре линии (рис. 1), соединяющей ПП (база). Ось  $z'$  направим вдоль линии, соединяющей ПП. Ось  $y'$  будет лежать в плоскости АОБ (рис. 1) и перпендикулярно базе, ось  $x'$  дополняет систему координат до правой. Для начального приближения предположим, что регистрируемое излучение является плоской волной, принимаемой разнесенной антенной, расположенной в начале координат  $(x', y', z')$ . При этом разность хода равна  $c\tau$ . Из этих предположений сформируем направляющий вектор на ИРИ:

В случае, когда в зоне видимости имеются два ПП, представляется возможным нахождение линии положения, расположенной на поверхности Земли. При движении ПП будет изменяться линия положения, следовательно, становится возможным определение координат ИРИ. В декартовой инерциальной геоцентрической системе координат (рис. 1) уравнение поверхности Земли можно представить следующим образом:

$$x_M^2 + y_M^2 + (\alpha z_M)^2 = R^2, \quad (3)$$

где  $R$  – экваториальный радиус Земли,  $\alpha$  – отношение экваториального и полярного радиусов Земли.

Объединив систему уравнений (2) и уравнение поверхности геоида (3), получим систему уравнений для построения линии положения:

$$\begin{cases} c\tau = \sqrt{(x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2} \\ -\sqrt{(x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2} \\ x_M^2 + y_M^2 + (\alpha z_M)^2 = R^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{a} = \{0, \cos\varphi, \sin\varphi\}, \quad (5)$$

где  $\sin\varphi = ct/l$ ,  $l$  – длина базы.

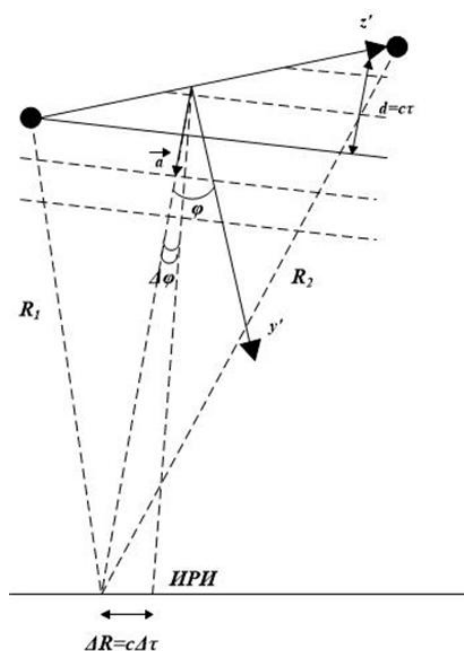


Рисунок 2

Начальное приближение для текущей точки линии положения можно вычислить как точку пересечения прямой, проходящей через начало координат ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) и имеющей направляющий вектор  $\hat{a}$  (5) в этой же системе координат, с эллипсоидом Земли (3).

Однако для точного решения системы (4) необходимо учесть, что излучаемые волны не являются плоскими, а база – очень большой (несколько тысяч километров), следовательно, необходимо корректировать угол  $\varphi$  (рис. 2). Для уточнения предлагается использовать итерационную процедуру. Предположим, что расстояние между началом координат  $O'$  и найденной точкой на Земле, на  $k$ -й итерации, равно  $r^k$ , а расстояние от найденной точки до ПП – соответственно  $R_1^k, R_2^k$ . Тогда направляющий угол уточняется как  $\varphi^{k+1} = \varphi^k + \Delta\varphi^k$ , где:

$$\Delta\varphi^k = -\left(ct - (R_1^k - R_2^k)\right)/r^k \quad (6)$$

Итерационный процесс (6) может быть остановлен при выполнении условия  $\Delta\varphi < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – задаваемая угловая точность. Данный параметр подбирается исходя из необходимой точности определения местоположения. Остальные точки линии положения можно найти по выше описанной процедуре, при этом повернув систему координат ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) на некоторый угол вокруг оси  $z'$ . Шаг поворота задает расстояние между точками линии положения и является параметром алгоритма.

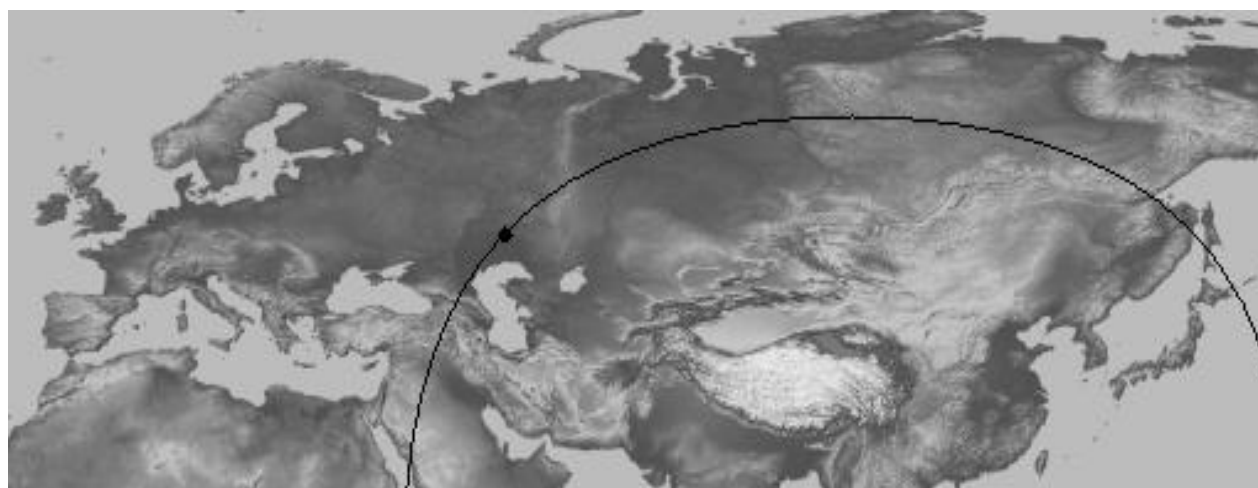


Рисунок 3

На основе представленного алгоритма проведен расчет линии положения. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Источник радиоизлучения расположен в координатах

(50.935948 градусов с.ш.; 50.6168105 градусов в.д.) При расчётах моделировалось два спутника, каждый находился на своей высокоэллиптической орбите.

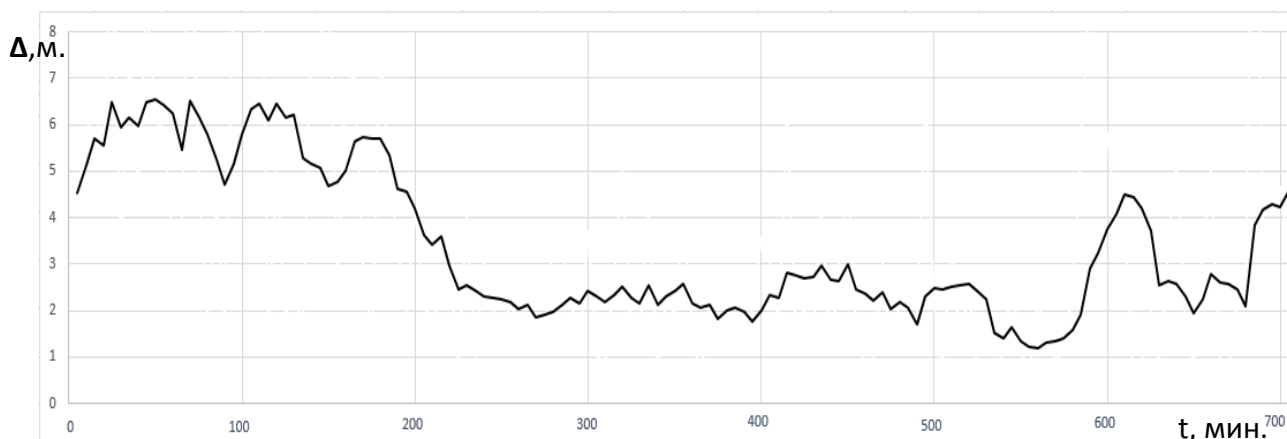


Рисунок 4

В работе проведено исследование точности формирования линии положения, проходящей через источник радиоизлучения в координатах (50.935948 градусов с.ш.; 50.6168105 градусов в.д.). Значение задаваемой угловой точности выбрано равным  $\varepsilon = 10^{-6}$  радиан. На рис. 4 показан модуль точности определения местоположения в декартовой инерциальной геоцентрической системе координат в зависимости от положения космических аппаратов за один период обращения вокруг Земли. Погрешность формирования линии равной задержки данным алгоритмом не превышает семи метров рис. 4, из чего можно сделать вывод о состоятельности данного подхода к формированию линий положения.

### Библиографический список

1. **Ворошилин, Е.П.** Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов / Е.П. Ворошилин, М.В. Миронов, В.А. Громов // Доклады ТУСУР. №1, ч. 2, 2010. – С. 23-28.
2. **Гринь, И.В.** Вычислительно эффективный алгоритм определения взаимной временной задержки сигналов при больших объемах выборок / И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии ПИТ-2015». – Самара: СГАУ, Т.2, 2015. – С. 11-14.
3. **Гринь, И.В.** Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода / И.В.Гринь, Р.А. Ершов, О.А.Морозов, В.Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. № 4, 2014. – С. 70-80.
4. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
5. **Ершов, Р.А.** Определение местоположения источника радиоизлучения на поверхности земли по данным группы из двух космических аппаратов / Р.А. Ершов, О.А. Морозов // Доклады 21-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019». – Москва, 2019. – С. 292-296.

**E.D. Baykov, O.A. Morozov**

**ALGORITHM FOR CALCULATING OF EQUAL TIME DELAY LINES  
BASED ON THE RANGE-DIFFERENCE METHOD FOR TWO SATELLITES DATA**

Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky

An algorithm for determining the location of radiation sources by range–difference method based on the estimation of mutual time delays of signals is considered. A computationally efficient algorithm for constructing lines of equal time delay is proposed. The method is based on an iterative procedure for estimating the full phase of signals recorded by two satellites.

**Keywords:** position line, mutual time delay.

## LR И ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро

В статье рассмотрены LR и экспресс-метод измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи, являющиеся развитием LRT-метода. Принципиальное отличие от известных решений состоит в использовании минимального набора калибровочных мер, причем экспресс-метод основан на использовании единственной меры в виде отрезка электрически длинной полосковой линии передачи

**Ключевые слова:** СВЧ резистор, оконечная нагрузка, коаксиально-полосковый переход, КСВН, S-параметры, короткозамкнутая нагрузка, согласованная нагрузка.

Задача контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи состоит в исключении окружающих объект электрических цепей: коаксиально-полосковых переходов с отрезками полосковых линий, из результатов измерений в стандартном коаксиальном канале. Общим недостатком всех существующих методов решения поставленной задачи является неповторяемость частотных характеристик разъёмных контактов [1,2]. Суть проблемы состоит в том, что в процессе выполнения калибровочной процедуры, связанной с измерением S-параметров контактного устройства с калибровочными полосковыми мерами волнового сопротивления и решением системы калибровочных уравнений, решаемая задача, строго говоря, является некорректной. Разъёмный контакт при каждом подключении калибровочной меры или отрезка полосковой линии с контролируемым электронным компонентом изменяет параметры окружающих электрических цепей. Поэтому количество неизвестных параметров даже при двух калибровочных измерениях с проходной и отражающей будет больше количества калибровочных уравнений. Это и приводит к решению некорректной задачи, в предположении о том, что окружающие цепи не меняют своих характеристик.

В настоящей работе предлагаются новые решения, которые сводят к минимуму и даже исключению влияния фактора неповторяемости разъёмных контактов на результаты контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи.

Сравнительно недавно стал известен оригинальный LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах [3], который, в отличие от известного TRL – метода, имеет совершенно иную математическую основу и неограничен по диапазону частот. Метод основан на измерении S-параметров L-соединения переходов, электрически длинной нестандартной линией передачи, T-соединения переходов короткой линией, а также измерении коэффициентов отражения от R-соединения переходов с отрезками нестандартных линий передачи в режиме холостого хода или короткого замыкания. Полученная измерительная информация позволяет определить параметры переходов и исключить их влияние на результаты измерений объектов в нестандартных линиях передачи.

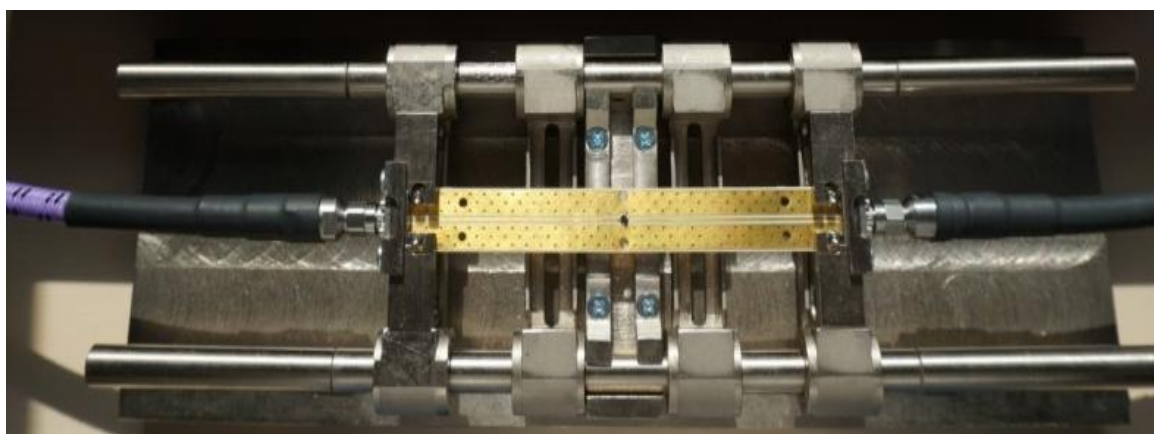
В отличие от LRT-метода LR-метод основан всего лишь на измерении S-параметров двух соединений: L- и R-соединения [4,5]. Казалось бы полученной информации недостаточно для решения задачи исключения переходов из результатов измерения неизвестного объекта. Однако если предположить, что коэффициенты отражения от переходов со стороны коаксиаль-



ных разъемов  $S_{11}^a$  и  $S_{11}^b$  каким-либо способом определены, задача математически становится корректной. Как показано в [3], искомые величины  $S_{11}^a$  и  $S_{11}^b$  можно определить как средние линии коэффициентов отражения L-соединения. Тогда все остальные неизвестные S-параметры коаксиально-полосковых переходов вместе с отрезками полосковых линий длиной  $L/2$  следует определить по результатам измерения L-и R-соединения переходов с помощью сходящейся итерационной процедуры из соотношений:

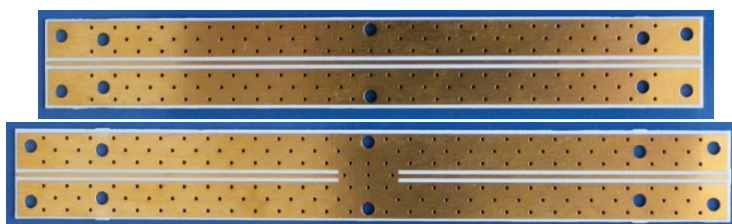
$$\begin{aligned}
 S_{22}^b &= \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) \frac{S_{11}^L - S_{11}^a}{S_{21}^L}, & S_{21}^a S_{12}^a &= S_{21}^L \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\
 S_{22}^a &= \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) \frac{S_{22}^L - S_{11}^b}{S_{12}^L}, & S_{21}^b S_{12}^b &= S_{12}^L \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\
 S_{12}^a / S_{12}^b &= \sqrt{\frac{\Gamma_b (S_{11}^R - S_{11}^a) (1 - S_{22}^a \Gamma_a)}{\Gamma_a (S_{22}^R - S_{11}^b) (1 - S_{22}^b \Gamma_b)}}, \\
 \Gamma_a &= \frac{S_{11}^R - S_{11}^a}{S_{11}^R S_{22}^a - S_{11}^a S_{22}^a + S_{12}^a S_{21}^a}, & \Gamma_b &= \frac{S_{22}^R - S_{11}^b}{S_{22}^R S_{22}^b - S_{11}^b S_{22}^b + S_{12}^b S_{21}^b}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Экспериментальные исследования LR-метода проводились с помощью анализатора цепей P4225 «Панорама» в диапазоне частот от 0.5 до 12 ГГц в контактном устройстве, показанном на рис. 1.



**Рисунок 1. Контактное устройство для измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи**

Калибровочный набор, показанный на рис. 2, состоял из отрезка экранированной полосковой линии длиной 110 мм и двух короткозамкнутых линий длиной 55 мм, сформированных на одной подложке длиной 120 мм, изготовленных из материала Rogers: RO4003C с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3.38 \pm 0.05$ , толщиной  $h = 0,305$  мм, шириной полоскового проводника  $W = 0,68$  мм и толщиной  $t = 0,018$  мм.



**Рисунок 2. Калибровочный набор полосковых мер**

В качестве объектов контроля, показанных на рис. 3, были выбраны:

- ✓ оконечная двухсторонняя нагрузка, из параллельного соединения двух замкнутых на землю резисторов номиналом 100 Ом;
- ✓ параллельный резистор в отрезке линии длиной 120 мм из параллельного соединения двух замкнутых на землю резисторов номиналом 51 Ом;
- ✓ последовательный резистор номиналом 100 Ом, включенный в разрыве полосковой линии длиной 120 мм.

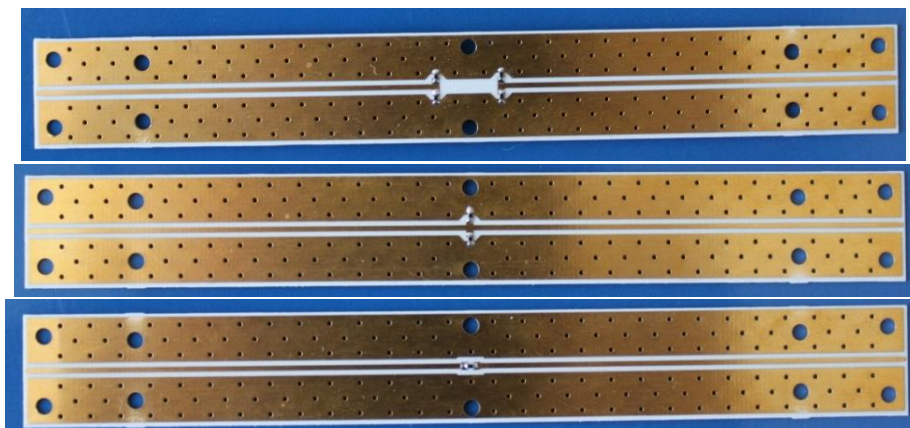


Рисунок 3. Калибровочный набор полосковых мер

Параметры рассеяния параллельного резистора, показанные на рис. 4, после исключения влияния коаксиально-полосковых переходов с отрезками линий длиной 55 мм, на диаграмме полных сопротивлений имеют спиралевидный характер.

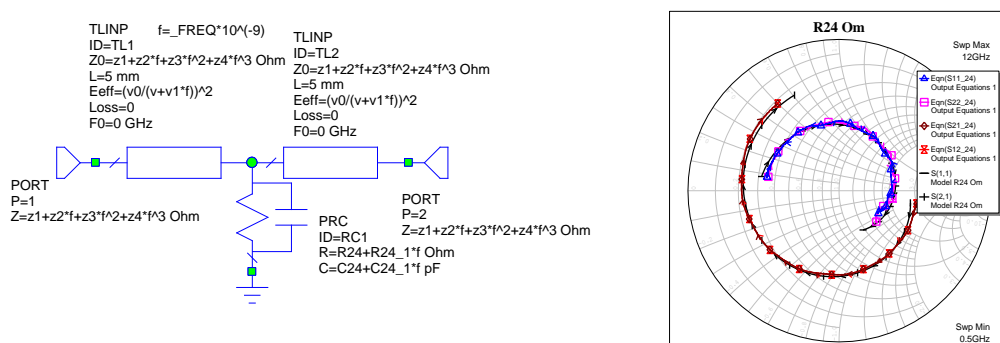


Рисунок 4. Параметры рассеяния параллельного резистора и его схемная модель в Microwave Office

Этот эффект объясняется влиянием неисключенного из результатов измерений отрезка линии длиной 10 мм, в которую установлен параллельный резистор. На этом же рисунке приведена схемная модель объекта измерений в Microwave Office, состоящая из двух отрезков линий TLINP и элемент PRC в виде параллельного соединения частотно-зависимого сопротивления  $R(f)$  и емкости  $C(f)$ . Частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  и коэффициента передачи  $S_{21}$  схемной модели на графиках изображены в виде спиралевидных линий черного цвета. Восстановленные симплекс-методом параметры импеданса резистора имеют следующие значения:  $R_{24} = 21.31$ ,  $R_{24\_1} = 2.64$ ,  $C_{24} = -0.175$ ,  $C_{24\_1} = 0.0169$ .

Отношение коэффициентов передачи  $S_{12}^a / S_{12}^b$  определяет границу между цепями А и В. Если в качестве границы выбрать плоскость отчета фазы, равноотстоящую от коаксиально-полосковых переходов, то в силу симметрии полосковой части цепей, отношение коэффициентов передачи можно приближенно определить как:

$$S_{12}^a / S_{12}^b = \sqrt{\frac{\Gamma_b \left( S_{11}^R - S_{11}^a \right) \left( 1 - S_{22}^a \Gamma_a \right)}{\Gamma_a \left( S_{22}^R - S_{11}^b \right) \left( 1 - S_{22}^b \Gamma_b \right)}} \Rightarrow \sqrt{S_{11}^R / S_{22}^R} \quad (2)$$

Причем в качестве  $S_{11}^R$  и  $S_{22}^R$  следует взять коэффициенты отражения от коаксиально-полосковых переходов в режиме холостого хода, то есть без контакта с отрезком электрически длинной полосковой линии передачи. В этом случае потребуется единственная калибровочная мера волнового сопротивления в виде отрезка длинной линии и два измерения S-параметров контактного устройства с линией и без нее. Таким образом, экспресс-метод контроля предполагает всего лишь одно подключение в контактное устройство калибровочной меры и вычисление искомым параметров цепей из соотношений:

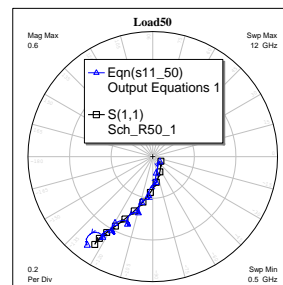
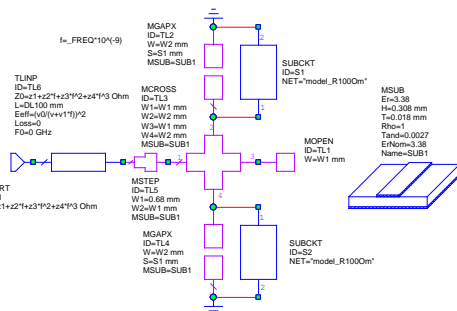
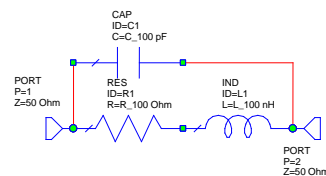
$$S_{22}^a = \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) \frac{S_{22}^{ab} - S_{11}^b}{S_{12}^{ab}}, \quad S_{22}^b = \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) \frac{S_{11}^a - S_{22}^{ab}}{S_{12}^{ab}},$$

$$S_{21}^a S_{12}^a = S_{21}^{ab} \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) \left( 1 - S_{22}^a S_{22}^{ab} \right), \quad S_{21}^b S_{12}^b = S_{12}^{ab} \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) \left( 1 - S_{22}^b S_{22}^{ab} \right), \quad (3)$$

$$S_{21}^a S_{12}^b = S_{21}^{ab} \left( 1 - S_{22}^a S_{22}^{ab} \right), \quad S_{21}^b S_{12}^a = S_{12}^{ab} \left( 1 - S_{22}^b S_{22}^{ab} \right)$$

без выполнения итерационной процедуры.

В завершение анализа работоспособности экспресс-метода контроля S-параметров электронных компонентов приведем результаты определения параметров схемных моделей оконечной нагрузки. Оконечные нагрузки выполнены в виде двух прямоугольных контактных площадок, которыми заканчиваются полосковые проводники длиной 55 мм. В области контактных площадок профиль верхних заземленных экранов полосковой линии имеет трапецевидную выемку, что позволяет установить пайкой между экранами и контактной площадкой два резистора с номиналом 100 Ом, выполняющие функцию оконечной нагрузки, как показано на рис. 5. Следует отметить, что S-параметры электронных компонентов были определены относительно волнового сопротивления полосковой линии, в которую он установлен. Волновое сопротивление определено экспериментально по результатам измерения коэффициентов отражения L-соединения. В результате удалось аппроксимировать частотную зависимость волнового сопротивления степенным полиномом 4-го порядка. Полученная зависимость введена в порты схемных моделей на рис. 4 и 5.



**Рисунок 5. Внешний вид оконечной нагрузки, ее схемная топологическая модель и результаты определения параметров в полярной системе координат**

Рассмотренные в работе новые LR и экспресс методы измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи принципиально отличаются от известных, например, OSMT, TRL, TRM тем, что в их основе лежат, по сути, не косвенные, а прямые измерения параметров коаксиально-полосковых переходов с отрезками линий передачи. Причем наборы калибровочных мер минимальны, а в случае экспресс-метода это лишь одна мера: - отрезок электрически длинной полосковой линии. Единственным методическим недостатком обоих методов является поиск коэффициентов отражения со стороны коаксиальных разъемов как средних линий квазипериодических комплексных функций частоты электромагнитного поля.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 05-02 08075.*

### Библиографический список

1. **Энген, Г.Ф.** Успехи в области СВЧ измерений // ТИИЭР, 1978, т.66, №4, с.8-20.
2. **Дансмор, Джоэль П.** Настольная книга инженера. Измерение параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей // Москва: ТЕХНОСФЕРА. 2018. – 736 с.
3. **Лавричев, О.В.** LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах / О.В. Лавричев, М.С. Никулин // Журнал Датчики и системы. – М.: Изд-во Сенсидат-Плюс 2017, №8-9 с. 39-44.
4. Патент РФ RU 2 710 514, 01.11.18 Авторы: В.И. Евсеев, С.М. Никулин, Способ измерения S-параметров объектов в нестандартных направляющих системах // Патент России RU 2 710 514, 2019, Бюл. №36.
5. **Евсеев, В.И.** Контроль параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве / В.И. Евсеев [и др.] //UralRadioEngineeringJournal, Уральский радиотехнический журнал.2019. Vol. 3, No 1. p. 53–71.

**V.I. Evseev, S.M. Nikulin**

### LR AND EXPRESS METHOD OF CONTROL OF PARAMETERS OF ELECTRONIC COMPONENTS IN STRIPE TRANSMISSION LINES

Arzamas instrument-making design bureau

The article discusses the LR and the express method for measuring the S-parameters of electronic components in strip transmission lines, which are the development of the LRT method. The fundamental difference from the known solutions is the use of a minimum set of calibration measures, and the express method is based on the use of a single measure in the form of a segment of an electrically long strip transmission line

**Keywords:** microwave resistor, termination load, coaxial-strip transition, VSWR, S-parameters, short-circuit load, matched load.

И.В. Ильин, В.А. Кашин

**АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В ММО-АВТОРАДАРЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В настоящее время основной целью автомобильной промышленности является минимизация показателя летальных исходов в авариях на автомобильных дорогах. В связи с этим в автомобилестроении пассивные системы безопасности дополняются активными системами, которые позволяют избежать опасных ситуаций путем вмешательства в управление автомобилем. Несмотря на большое количество уже имеющихся транспортных средств на дорогах, тенденция на увеличение только сохраняется, поэтому при построении автомобильных радаров одним из самых важных факторов является уменьшение цены готового устройства. Одним из решений является уменьшение числа цифровых приемных каналов. Статья посвящена рассмотрению перспективной технологии ММО, которая может быть применена при построении автомобильных радаров для интеллектуальных систем помощи водителю. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием алгоритма цифровой обработки информации для оценки дальности, скорости и азимута в ММО-авторадаре. Представлена реализация алгоритма и основные результаты его работы.

**Ключевые слова:** автомобильные радары, ММО, ММО-радары, фазированная антенная решетка, алгоритмы цифровой обработки сигналов, FMCW.

**Введение**

К активным системам, которыми оснащены современные автомобили бизнес-класса относятся системы помощи водителю (ADAS)[1], функциональные возможности которых варьируются в широких пределах в зависимости от производителя и комплектации. В основе любой системы помощи водителю лежит система технического зрения, построенная с использованием сенсоров, основными типами которых являются видеокамеры, лидары и радары.

Основным недостатком видеокамер и лидаров является резкая потеря эффективности в условиях плохой оптической видимости – ночью, в условиях тумана, дождя, запыленности. Способность радаров обнаруживать объекты и определять их местоположение практически не зависит от этих условий. Кроме того, их стоимость существенно ниже по сравнению с лидарами. Эти обстоятельства являются причиной того, что основным видом сенсором, обеспечивающим обнаружение объектов для систем адаптивного круиз-контроля и автоматического экстренного торможения, является радар.

В современном мире насчитывается огромное количество транспортных средств, поэтому предъявляются большие требования к безопасности движения, повышающейся, благодаря системам помощи водителю. Кроме того, из-за сильной конкуренции между производителями, ключевым требованием к автомобильным радарам, ввиду массовости их применения является их стоимость готового устройства.

Ключевым требованием к автомобильным радарам, обеспечивающим реализацию функции адаптивного круиз-контроля (adaptivecruise-control, ACC) является высокое разрешение

по азимуту, составляющее единицы градусов. Одновременно с требованием высокого разрешения в так называемой дальней зоне (до двухсот – двухсот пятидесяти метров), необходимо в ближней зоне (до пятидесяти – ста метров) иметь достаточно широкий сектор обзора (десятки градусов) для реализации функции автоматического экстренного торможения (automatic emergency braking, АЕВ). Все это приводит к необходимости использования фазированных антенных решеток с большим числом каналов формирования и особенно обработки сигналов.

Число элементов приемной фазированной антенной решетки определяет число цифровых каналов в автомобильном радаре, что, в свою очередь, влияет на стоимость комплектующих. Поэтому рациональным будет решение, направленное на уменьшение числа цифровых приемных каналов. В связи с этим становится очевидным преимущество применения технологии ММО в задачах, связанных с обработкой сигналов в автомобильном радаре, которая позволяет снизить число физических каналов за счет излучения нескольких ортогональных сигналов и формирования виртуальных элементов антенной решетки.

### Требования к сигналам в авторадаре с ММО-решеткой

В радаре с ММО решеткой каждый антенный элемент передающей антенной решетки излучает свой ортогональный сигнал. Эти сигналы передатчика разделяются в приемных каналах за счет согласованной фильтрации, а затем производится их совместная пространственная когерентная обработка. Это дает возможность формирования результирующей виртуальной ММО-решетки[2], с числом приемных цифровых каналов  $MN$ , то есть, в  $M$ -раз большую, чем в случае обычной фазированной антенной решетки. Пример виртуальной решетки показан на рис. 1.

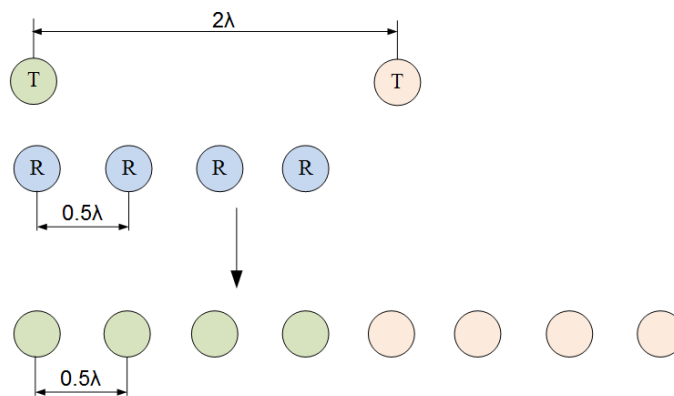
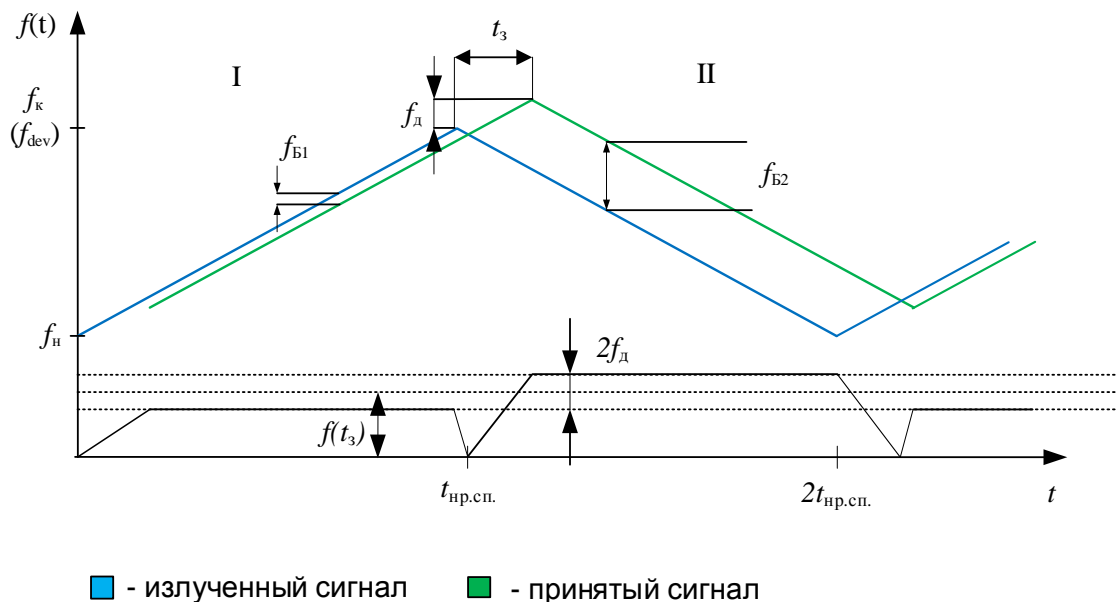


Рисунок 1. Пример построения геометрии виртуальной ММО-решетки

Возможность применения ММО решетки в автомобильном радаре определяется типом зондирующего сигнала и законом его модуляции.

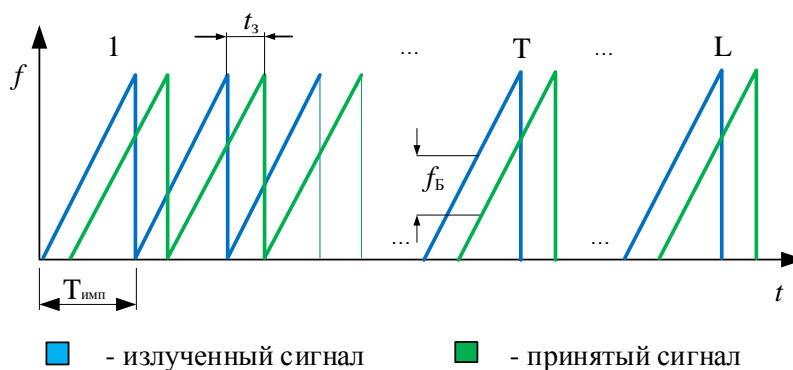
Как правило, в автомобильных радарех используется непрерывный зондирующий сигнал с кусочно-линейной частотной модуляцией (FMCW). Важным моментом при этом является выбор режима так называемой медленной и быстрой перестройки частоты. Скорость перестройки частоты рассматривается по отношению к интервалу времени, на котором происходит накопление сигнала, который, в свою очередь, выбирается исходя из соображений обеспечения накопления достаточной для обнаружения целей энергии и обеспечения требуемой разрешающей способности по частоте Доплера (скорости целей)[5].

В случае медленной перестройки частоты (рис.2) накопление сигнала происходит в течение половины периода перестройки частоты (времени нарастания и (или) спада закона изменения частоты). При этом частота сигнала на выходе смесителя и фильтра приемника определяется одновременно дальностью до цели (задержкой сигнала) и скоростью цели (доплеровским сдвигом).



**Рисунок 2. Временная диаграмма закона медленной перестройки частоты зондирующего сигнала**

В случае быстрой перестройки частоты (рис.3) период закона модуляции мал по сравнению с периодом колебания, определяемым доплеровским смещением, а также по сравнению с периодом накопления сигнала.



**Рисунок 3. Пояснение к алгоритму обработки сигнала при использовании закона изменения частоты типа «быстрые пики»**

Поэтому в случае быстрой перестройки разностная частота сигнала на выходе гомодинного приемника определяется только дальностью до цели. Разрешение по частоте и ее измерение достигается межпериодным накоплением, при котором накапливаются отсчеты сигнала, соответствующие  $N$  периодам модуляции. Возможность излучения и обработки одновременно нескольких ортогональных зондирующих сигналов без потери разрешающей способности



по временной задержке (дальности) обеспечивается только при использовании второго типа модуляции, то есть быстрой перестройки частоты. Это обусловлено возможностью двоичной фазовой модуляции разных периодов перестройки частоты. Как правило, модуляция осуществляется по закону одной из известных псевдослучайных последовательностей.

На приемной стороне обработка содержит несколько каналов согласованной фильтрации, на входе которых сигнал с выхода смесителя синхронно умножается на двухуровневый знакопеременный сигнал, соответствующий закону фазовой модуляции.

### Обработка сигналов в ММО-авторадаре. Сигнальная модель

Как было описано ранее, каждый  $m$ -й передатчик излучает сигнал с пилообразным законом линейной частотной модуляции и каждый период модулируется по фазе по закону своей псевдослучайной последовательности  $\mathbf{Z}_m$

$$\mathbf{Z}_m = [z_{m,1}, z_{m,2}, \dots, z_{m,L}]^T.$$

Предполагается, что для рассматриваемых целей выполняется условие дальней зоны.

На прием установлено  $N$  приёмных антенн. Отраженный сигнал в  $n$ -ом приемном канале в  $l$ -ом периоде зондирования ЛЧМ можно записать в виде:

$$x_l^n(t) = \sum_{k=1}^K \rho_k g_{k,l} S_k(t) \alpha_{n,k}(t) \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M b_{m,k} z_{m,l} + n(t), \quad (1)$$

где  $\rho_k$  – комплексный коэффициент отражения,  $\alpha_{n,k} = e^{-i2\pi d_{R_n}/\lambda \sin \theta_k}$  – фазовые множители, описывающие задержку распространения фронта плоской волны от  $m$ -го передатчика к  $n$ -му приемнику для  $k$ -й цели,  $g_{k,l} = e^{-i2\pi T_0 F_D^k l}$  – множитель,  $F_D^k$  – частота Доплера  $k$ -й цели,  $T_0$  – длительность одного периода зондирования,  $S_k = e^{-i2\pi \Delta f T}$ ,

$\Delta f$  – частотный сдвиг, обусловленный задержкой сигнала, отраженного от  $k$ -й цели [6],  $n(t)$  – аддитивный белый гауссов шум с единичной дисперсией.

Выражение (1) можно представить в векторной форме следующим образом:

$$\mathbf{X}_l^n = \sum_{k=1}^K \rho_k g_{k,l} \mathbf{S}_k \alpha_{n,k} \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M b_{m,k} \mathbf{Z}_m + \mathbf{n}_l.$$

Объединив данные со всех  $L$  периодов, полный сигнальный вектор  $n$ -го приёмного канала можно записать в следующем виде

$$\mathbf{X}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^n \\ \mathbf{X}_2^n \\ \vdots \\ \mathbf{X}_Q^n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^K \rho_k \alpha_{n,k} \cdot \sum_{m=1}^M b_{m,k} \mathbf{Z}_m [\mathbf{G}_k \otimes \mathbf{S}_k] + \mathbf{n}_l, \quad (2)$$

где  $\otimes$  – произведение Кронекера.



$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} g_{k,1} & \dots & 0 \\ & g_{k,2} & \\ \vdots & & \ddots \\ 0 & & & g_{k,L} \end{bmatrix}.$$

Для разделения информации от разных передатчиков сигнал в каждом  $n$ -м приемнике разделяется на  $M$  подканалов, каждый со своим согласованным фильтром на известную ПСП.

Операцию выделения сигнала  $m$ -го передатчика в  $n$ -м приемнике можно записать так:

$$\mathbf{Y}_{m,n} = \mathbf{X}_n \circ \mathbf{Z}'_m,$$

$$\mathbf{Z}'_m = \mathbf{Z}_m \otimes \mathbf{c}_L,$$

$$\mathbf{c}_L = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T, L \times 1,$$

где  $\circ$  – произведение Адамара.

Необходимо отметить, что предложенный в статье способ достижения ортогональности не позволяет идеально разделить сигналы передатчиков. Поэтому сигнал на выходе  $m$ -го канала в  $n$ -м приемнике можно приближенно представить в следующем виде:

$$\mathbf{Y}_{m,n} \approx \sum_{k=1}^K \rho_k \alpha_{n,k} b_{m,k} [\mathbf{G}_k \otimes \mathbf{S}_k] + \mathbf{n}'_{m,n}. \quad (3)$$

Путем введения следующих обозначений:

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{b}_k \otimes \mathbf{a}_k,$$

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} e^{-i2\pi d_{Rx1}/\lambda \sin \theta_k} \\ \vdots \\ e^{-i2\pi d_{RxN}/\lambda \sin \theta_k} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} e^{-i2\pi d_{Tx1}/\lambda \sin \theta_k} \\ \vdots \\ e^{-i2\pi d_{TxM}/\lambda \sin \theta_k} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1 \ \mathbf{F}_2 \ \dots \ \mathbf{F}_k],$$

Необходимо отметить, что вектор  $\mathbf{F}_k$  представляет собой управляющий фазовый вектор виртуальной антенной решетки [6,7].

Выходной сигнал ММО-радар можно записать в виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{R} + \mathbf{N}', \quad (4)$$

где

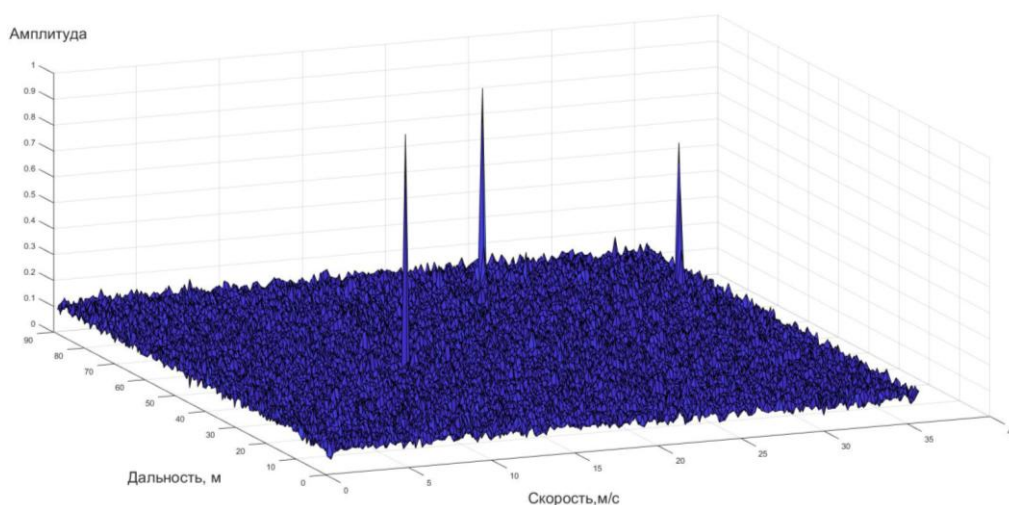
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_1 [\mathbf{G}_1 \otimes \mathbf{S}_1] \\ \vdots \\ \rho_k [\mathbf{G}_k \otimes \mathbf{S}_k] \end{bmatrix}.$$

Матрицы  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{R}$  отвечают за пространственную и временную составляющие сигнала. Матрица  $\mathbf{N}'$  содержит шумовые отсчеты на выходе всех СФ.

Матрицу  $\mathbf{Y}$  можно перегруппировать в трехмерную  $\mathbf{Y}'$ , размерностью  $MN \times L \times T$  и по отдельности рассмотреть каждую  $\nu$ -ую двумерную матрицу  $L \times T$ , где  $\nu = 1, 2 \dots M \times N$ .

Известно[8], что если взять двумерное преобразование Фурье, результатом будет двумерная матрица, представляющая собой двумерный спектр, в плоскости дальность и частота Доплера. А экстремумы данной матрицы соответствуют координатам целей на этой плоскости. Сигнал на выходе первого канала системы обработки показан на рис.4.

$$\mathbf{Y}_\nu'' = \text{FFT}\{\text{FFT}\{\mathbf{Y}_\nu'\}\},$$



**Рисунок 4. Выход первого канала многоканальной согласованной фильтрации после двумерного преобразования Фурье**

Для достижения максимальной точности определения координат скорость и дальность необходимо совокупно обработать информацию всех  $MN$  каналов ММО-радар.

Каждый  $\nu$ -й элемент матрицы  $\mathbf{Y}''$  представляет собой выход одного из пространственных каналов ММО-радар. Одним из вариантов такой обработки может быть некогерентное накопление сигналов. Данную операцию можно записать в виде:

$$\mathbf{Q} = \sum_{\nu=1}^{MN} |\mathbf{Y}_\nu''|.$$

Обнаружение целей в полученной матрице  $\mathbf{Q}$  производится путем пороговой обработки с заданным уровнем ложных тревог. Для каждой обнаруженной цели сохраняется информация о её положении в виде номеров элементов разрешения, в которых амплитуда сигнала превысила порог.

Далее для каждой обнаруженной цели выполняется следующий алгоритм:

1. Для элементов матрицы  $\mathbf{Y}'$ , номера которых были сохранены на этапе обнаружения, формируется  $P$  пространственных каналов путем умножения вектора  $\mathbf{Y}'_{[\xi, \gamma]}$  ( $\xi, \gamma$  – номера вышеуказанных элементов разрешения по координатам дальность и частота Доплера) на набор весовых векторов:

$$\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_P\}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{w}_p = \mathbf{b}_p \otimes \mathbf{a}_p$ .

2. В результате  $J$  произведений для каждой находится максимальный по амплитуде отклик

$$\max \left\{ \left| \mathbf{w}_1 \circ \mathbf{Y}'_{\xi,\gamma} \right|, \left| \mathbf{w}_2 \circ \mathbf{Y}'_{\xi,\gamma} \right|, \dots, \left| \mathbf{w}_J \circ \mathbf{Y}'_{\xi,\gamma} \right| \right\}. \quad (6)$$

Номер углового канала  $\sigma$ , в котором зафиксирована наибольшая амплитуда, принимается за координату по азимуту.

3. С целью максимизации отношения сигнал-шум вектора матрицы  $\mathbf{Y}'$ , соответствующих точкам обнаруженных целей, как в (6) поэлементно умножаются на весовой вектор  $\mathbf{w}_\sigma$ .

Необходимо отметить, что величина параметра  $J$  определяется размером сектора углового обзора авторадара, а также аппаратными возможностями вычислителя для достижения необходимой точности вычисления угловой координаты.

### Результаты моделирования

С помощью математического моделирования получены значения среднеквадратической ошибки оценивания угловых положений цели, скорости и дальности в зависимости от отношения сигнал/шум. Было проведено исследование работы алгоритма.

Для моделирования был рассмотрен ММО-радар с  $M=2$ ,  $N=4$  антенными элементами и фазированная антенная решетка с  $M=1$  и  $N=8$  антенными элементами.

Более точное определение координат в случае фазированной антенной решетки, объясняется недостижимостью полной ортогональности сигналов на передачу и неидеальным разделением каналов на приемной стороне.

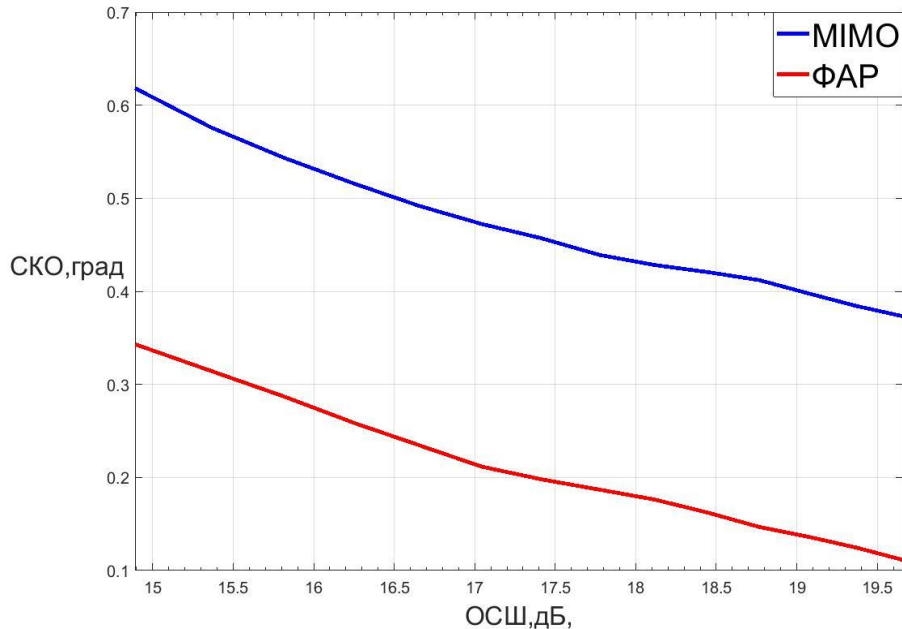
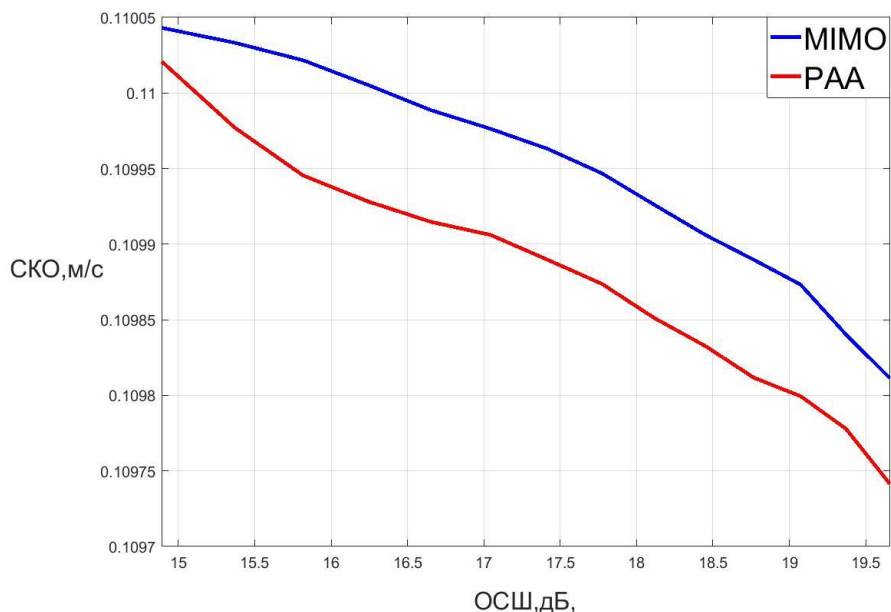
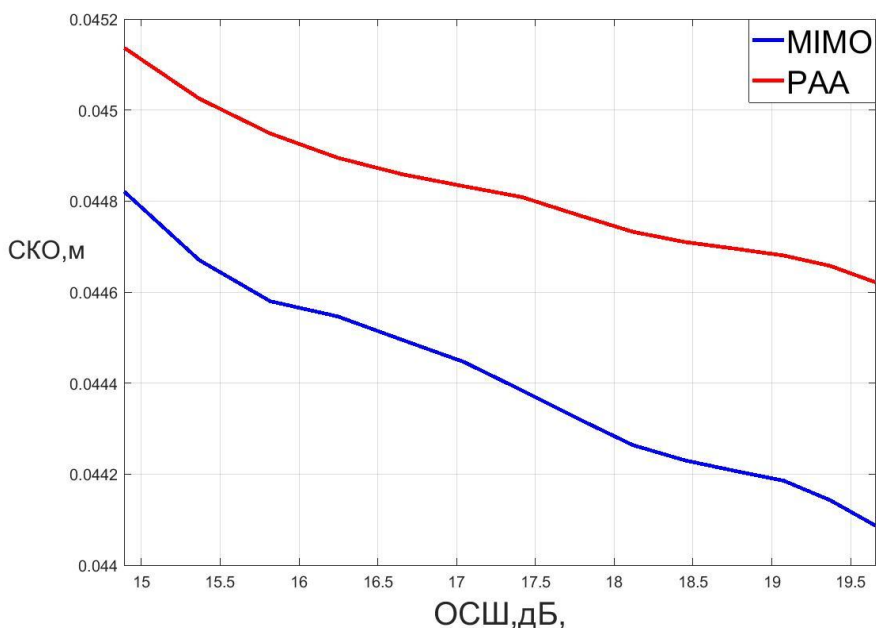


Рисунок 6. Сравнение СКО ошибки определения угловых координат ММО-радаром и радаром с ФАР



**Рисунок 7. Сравнение СКО ошибки определения скорости ММО-радаром и радаром с ФАР**



**Рисунок 8. Сравнение СКО ошибки определения дальности ММО-радаром и радаром с ФАР**

### Заключение

В статье рассмотрена перспективная технология ММО, которая может быть применена при построении автомобильных радаров для интеллектуальных систем помощи водителю, а также проведен анализ основных требований к сигналам в авторадаре с ММО-решеткой. Детально рассмотрен и алгоритм обработки информации для оценки дальности, скорости и азимута в ММО-авторадаре. По результатам работы можно сделать вывод, о том, что применение технологии ММО при разработке авторадаров, позволит в  $M$ -раз снизить количество физических приемных каналов, что способно удешевить схему, при

сравнительно одинаковых результатах работы. Показано, что алгоритм работы MIMO-радара сводится к обработке сигналов в эквивалентной виртуальной антенной решетке.

Проведена реализация и моделирование исследуемого алгоритма. Для реализации алгоритма была использована среда MatLab. В заключение был представлен график, иллюстрирующий результаты работы алгоритма и среднеквадратичное отклонение ошибки определения координат.

### Библиографический список

1. **Сысоева, С.** Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 1. Новые технологии и применения датчиков автомобильных систем помощи водителю // Компоненты и технологии, 2006.–№ 8.– С. 34–44.
2. SWRA554 Application Report. MIMO-radar. // Texas Instruments, 2018. URL: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/swra554a/swra554a.pdf>
3. Short Range Devices; Transport and Traffic Telematics (TTT); Ultra-wideband radar equipment operating in the 24,25 GHz to 26,65 GHz range; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302200\\_302299/302288/01.01.00\\_20/en\\_302288v010100a.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302288/01.01.00_20/en_302288v010100a.pdf)
4. Рекомендация МСЭ-RM.1452-2. Автомобильные радары для предотвращения столкновений и системы радиосвязи диапазона миллиметровых волн для применений интеллектуальных транспортных систем. Женева: Международный союз электросвязи, 2012. 9 с. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1452-2-201205-I!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1452-2-201205-I!!PDF-R.pdf)
5. **Jankiraman, M.** FMCW Radar Design./MohinderJankiraman./ by British Library Cataloguing in Publication Data. 425 p.2018.
6. **Stoica, P.,** Jian L. MIMO-radar signal processing./PetreStoica, Li Jian./ by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 469 p. 2009
7. **Guerci, J.,** Bergin J. MIMO Radar: Theory and Application./ Joseph Guerci, Jamesin Bergin./ by British Library Cataloguing in Publication Data. 231 p. 2018.
8. **Richards, M.,** Fundamentals Of Radar Signal Processing./ Mark A. Richards, McGraw-Hill Education, NY, p.513, 2005

**I.V. Ilyin, V.A. Kashin**

### THE COORDINATES ESTIMATION ALGORITHM FOR MIMO-AUTOMOTIVE RADAR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to research the effectiveness of digital signal processing algorithms to coordinates estimation in MIMO automotive radar

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in creating two models of digital signal processing algorithms for automotive radar with classical phased array antenna configuration and automotive radar with MIMO-configuration, and testing and comparison results of work.

**Findings:** According to the results of the work, it can be concluded, that the use of MIMO in the development of automotive radars will allow M-times to reduce the number of physical receiving channels, which can reduce the cost of the circuit, with relatively identical results.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for both studying new configuration of MIMO-systems and digital signal processing algorithms for them, and their further R&D application in automotive radars design.

**Originality/value:** Implementations of digital signal processing algorithm created during the research have shown good results in comparison with phased antenna array signal processing.

**Key words:** automotive radar, phased antenna array, MIMO, MIMO-radar, digital signal processing algorithm, Frequency-modulated continuous-wave radar (FMCW).

Д.В. Коньшева<sup>1</sup>, А.В. Вишняков<sup>2</sup>

## АДАПТИВНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ С АКТИВНЫМ ОТВЕТОМ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>АО «ФНПЦ Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»

Рассмотрен адаптивный алгоритм обнаружения ответных сигналов для того случая, когда в аппаратных средствах наземного радиолокационного запросчика (НРЗ) реализованы суммарный и разностный каналы приема, а также канал подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенны (ПБЛ). Предложена адаптивная фильтрация, обеспечивающая достаточно малые длительности временных интервалов фильтрации аппаратно-программных средств, использующихся при реализации системы помехозащиты НРЗ.

**Ключевые слова:** наземный радиолокационный запросчик, активный ответ, обнаружение сигналов, помехи, адаптивный алгоритм.

### Введение

В связи с ростом массовости использования различных типов воздушных судов, как гражданского назначения, так и военного, перед разработчиками средств управления воздушным движением остро стоит задача идентификации государственной принадлежности воздушного судна, а также получения дополнительной полетной информации. При этом в разных странах создаются системы государственного радиолокационного опознавания, состоящие из наземных радиолокационных запросчиков (НРЗ), а также ответчиков, установленных непосредственно на борту воздушного судна.

Одной из таких систем является система государственного опознавания МК – XII, имеющая гражданский аналог – систему RBS. Как и большинство других систем государственного опознавания, рассматриваемая система является системой с активным ответом, в которой НРЗ формирует запросный сигнал, кодирует его и излучает к опознаваемому воздушному судну. Ответчик, установленный на воздушном судне, получает этот сигнал-запрос, и, в случае правильной дешифрации, отвечает, излучая другой кодированный сигнал.

С учетом высоких требований, предъявляемых к аппаратуре государственной системы опознавания в части вероятности правильного обнаружения, вопрос борьбы с помехами и имитацией является ключевым при разработке и модернизации наземных радиолокационных запросчиков. При расчете вероятности опознавания на этапе разработки НРЗ, как правило, рассматривается действие комбинированных помех, образованных тремя основными компонентами: внутрисистемными помехами (ВСП), хаотическими импульсными помехами (ХИП) и ложными ответными сигналами (ЛОС) – имитирующими помехами.

Под ВСП понимаются все помеховые воздействия, порождаемые устройствами, работающими в системе опознавания государственной принадлежности, находящимися в зоне обнаружения НРЗ.

Под ХИП подразумеваются импульсные помехи, источниками которых являются различные устройства, работающие в окружающей НРЗ среде, не привязанные к внутренним сигналам.

лам НРЗ, и не синхронизированные с ними, а также различные возбуждения и переотражения внутри устройства НРЗ.

Под ЛОС понимаются ответные сигналы, излучаемые радиолокационными ответчиками, находящимися в зоне обнаружения НРЗ, но сформированные не в ответ на запросные сигналы данного НРЗ, а в ответ на запросные сигналы других НРЗ.

Жесткие требования по вероятностным характеристикам опознавания заставляют искать пути оптимизации программных и аппаратных средств НРЗ. Причем воздействие упомянутых типов помех носит переменный во времени характер, что обуславливает необходимость адаптации алгоритма помехозащиты к изменяющимся условиям помеховой обстановки, то есть необходимость применения адаптивных фильтров.

### Алгоритм адаптивной фильтрации

Поскольку параметры сигнала, излучаемого ответчиком, заранее известны, его можно принять за желаемый сигнал  $d[n]$ . На вход КИХ - фильтра поступает входной сигнал  $x[n]$ , а выходной сигнал  $y[n]$  сравнивается с желаемым. Сигнал ошибки  $e[n]$  является мерой различия между эталонным и входным сигналом. Зная сигнал ошибки, применив адаптивный алгоритм, вычисляется вектор коэффициентов  $w[n]$  для КИХ - фильтра. При этом интересующий сигнал  $y[n]$  наблюдается на выходе вышеупомянутого фильтра (рис.1) [1].

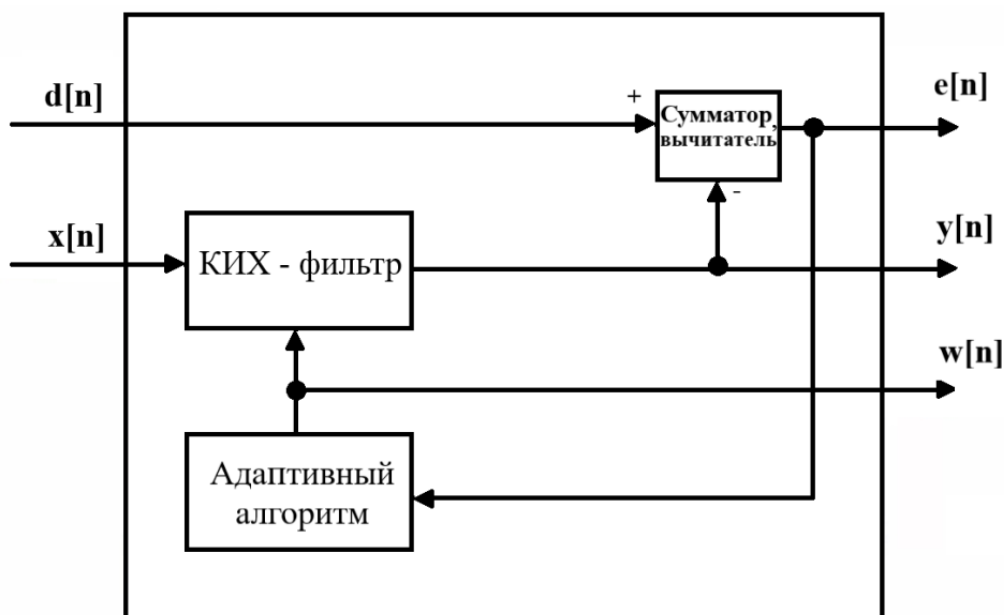
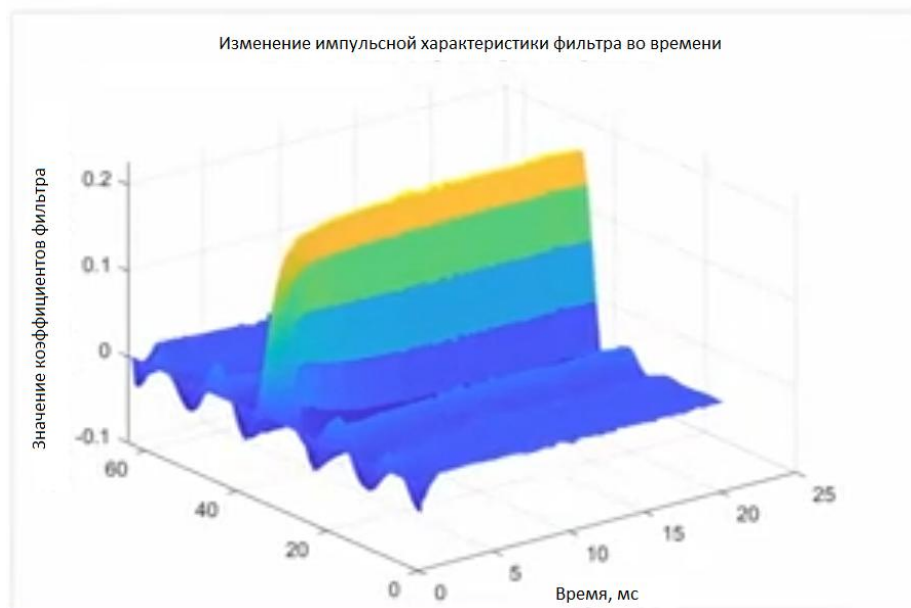


Рисунок 1. Структурная схема адаптивного фильтра

Существенным преимуществом адаптивных фильтров перед КИХ - фильтрами с постоянными коэффициентами является лучшее отношение сигнал/шум на выходе системы при одинаковых порядках фильтров, получаемое за счет «самообучаемости» системы. Для «выхода» на оптимальные параметры фильтрации, адаптивному фильтру требуется время, что необходимо принимать в расчет при использовании данного типа фильтров на практике (рис.2) [2].



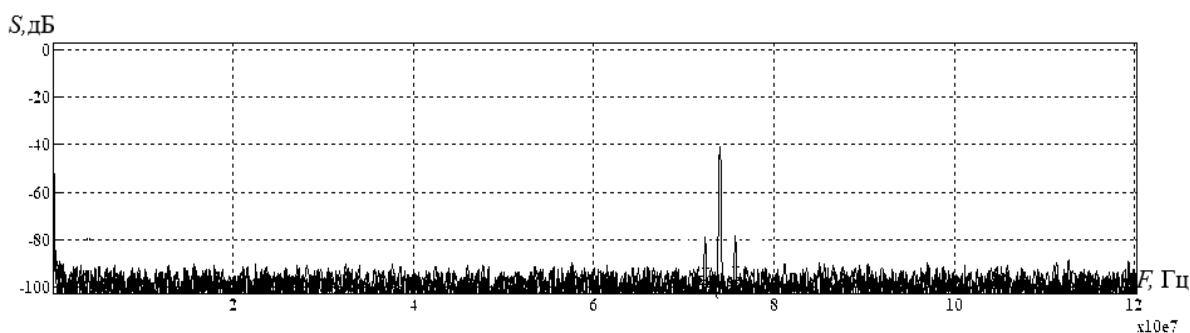


**Рисунок 2. Диаграмма изменения коэффициентов адаптивного фильтра во времени**

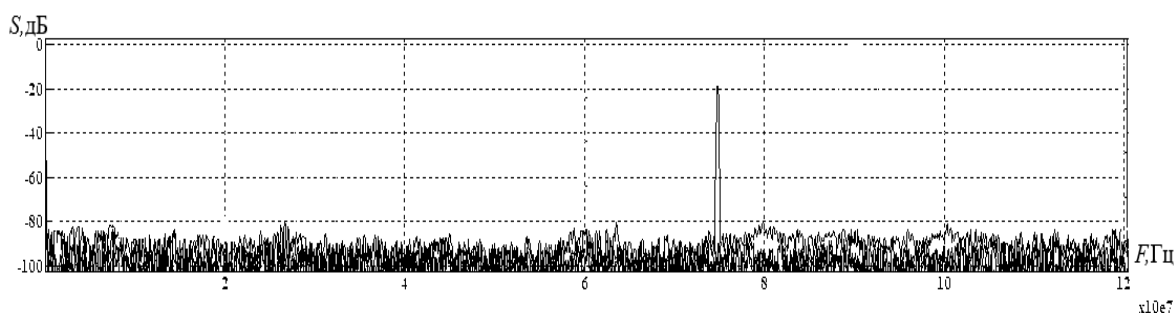
### Исследование результатов работы алгоритма

Как показали исследования, достаточно эффективным способом адаптивной фильтрации является применение LMS (Least Mean Squares) алгоритма [3]. В основе алгоритма адаптивной фильтрации лежит использование фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ - фильтра), коэффициенты которого адаптивно изменяются во времени.

На рис. 3 приведен спектр сигнала на выходе КИХ – фильтра 64 порядка с постоянными коэффициентами, полосой пропускания 72 - 76 МГц, а на рис. 4 представлен спектр сигнала на выходе адаптивного фильтра с характеристиками, аналогичными рис. 3.



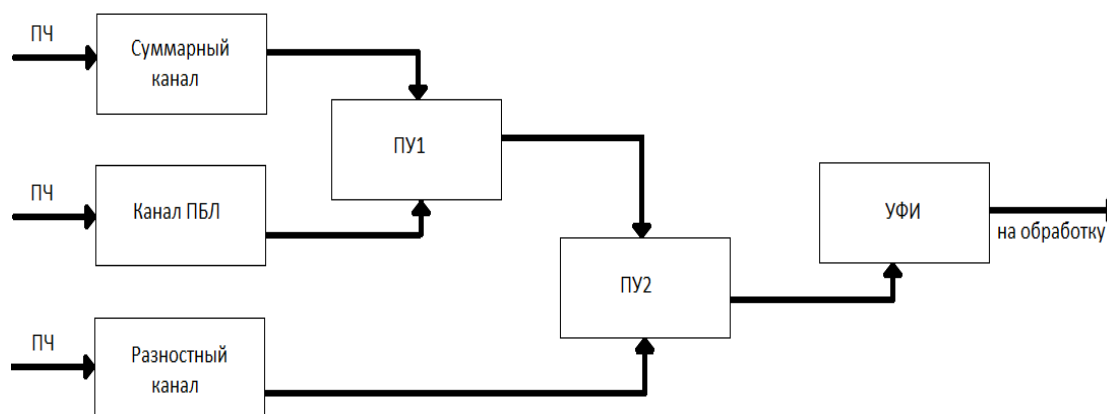
**Рисунок 3. Спектр сигнала на выходе КИХ-фильтра с постоянными коэффициентами**



**Рисунок 4. Спектр сигнала на выходе адаптивного фильтра**

В данном случае, допустимо использовать адаптивный фильтр со временем установления оптимальных коэффициентов до 20 мс.

На рис. 5 представлена упрощенная структура системы обнаружения ответных сигналов в системах с активным ответом (трехканальная система).



**Рисунок 5. Структурная схема трехканальной системы обработки**

На входы системы (рис. 5) подается сигнал с соответствующего выхода приемного устройства на промежуточной частоте (ПЧ), в нашем случае на частоте 74 МГц. Затем сигнал поступает на один из трех идентичных каналов адаптивной фильтрации. На выходе фильтров стоит пороговое устройство (ПУ1), сравнивающее сигнал с суммарного канала и канала ПБЛ. При превышении уровня сигнала в канале ПБЛ над уровнем сигнала суммарного канала, результирующий сигнал на пороговое устройство (ПУ2) и устройство формирования импульсов (УФИ) не пропускается, поэтому принимается решение о приеме ответного сигнала боковыми лепестками диаграммы направленности антенны. В противном случае, сигнал, принятый основным лепестком диаграммы направленности антенны, пропускается на пороговое устройство (ПУ2) для сравнения с сигналом, получаемым по разностному каналу. Это значение передается в УФИ, где формируется выходной сигнал, соответствующей длительности, базовая длительность которого в данном исследовании (при совпадении значений суммарного и разностного каналов) составляет 1 мкс. Таким образом, в последующих блоках обработки определяется азимутальная координата цели, оснащенной ответчиком.

### **Заключение**

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что использование адаптивной фильтрации снизит аппаратные затраты реализуемой системы при допустимом ухудшении быстродействия в связи с затратами времени на оптимизацию весовых коэффициентов для фильтров.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

## Библиографический список

1. Основы ЦОС: 27. Адаптивные фильтры // Материалы youtube - канала MATLABinRussia. - URL: <https://youtu.be/ТyкЕеАМ6v9U> (дата обращения: 15.01.2020).
2. Джиган, В.И. LMS-алгоритм адаптивной фильтрации сигналов: первый или единственный для использования на практике? // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных и наноэлектронных систем». - 2014. - Московская область, деревня Льялово.
3. Основы ЦОС: 28. Активное шумоподавление // Материалы youtube - канала MATLABinRussia. - URL: <https://youtu.be/2JgoeuM7iVM> (дата обращения: 16.01.2020).

**D.V. Konysheva, A.V. Vishnyakov**

### ADAPTIVE SIGNAL DETECTION IN ACTIVE RESPONSE SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev,  
JSC "Federal Scientific Production Center Nizhny Novgorod Research Institute  
of Radio Engineering"

**Purpose:** The article is devoted to make algorithm of increasing interference protection of ground-based radio-location requesters which are applicable to system of recognition the state affiliation MK-XII (RBS).

**Design/ methodology/ approach:** Stated goal is achieved by applying adaptive filtering by algorithm least mean squares (LMS).

**Findings:** The presented methods of adaptive filtration leads to decrease hardware and software costs at realize system.

**Research limitations/implications:** This research opens further prospects for applying the current implementation of the algorithm to existing practical problems radiolocation.

**Originality/ value:** This technique provides increasing the interference protection ground radio-location requesters.

**Key words:** ground-based radio-location requester, active response, signals detection, interferences, adaptive algorithm.

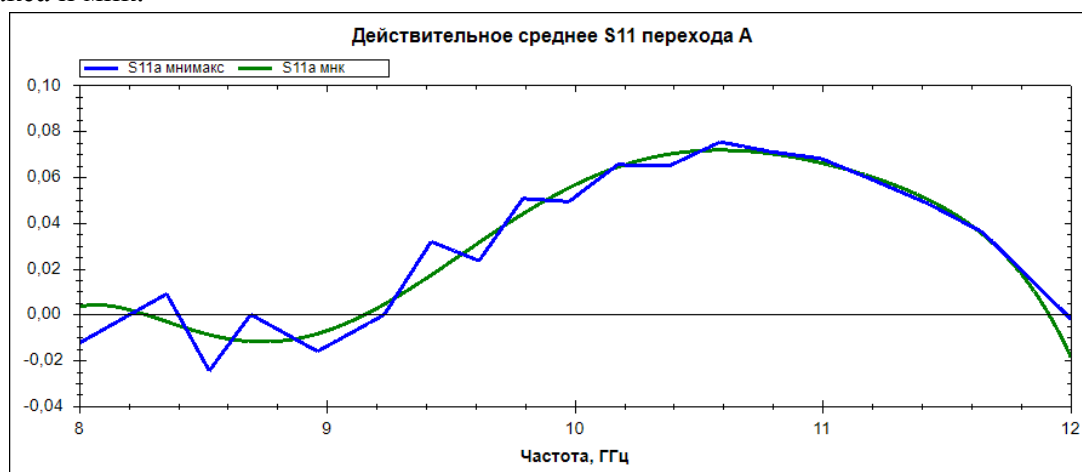
Е.А. Лупанова, С.М. Никулин

**LTR-МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ  
В ВОЛНОВОДНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В работе рассмотрен LTR-метод измерения S-параметров устройств в металлических волноводах, являющийся развитием LRT- и LR- методов. Предлагаемый метод решает проблему в определении средней линии, являющейся «тонким» местом LR- и LRT- методов.

**Ключевые слова:** коаксиально-волноводный переход, волновод, КСВН.

Контроль параметров устройств относительно его физических границ сводится к исключению влияния окружающих его цепей электрических цепей. Эта процедура называется калибровкой. Существует много известных алгоритмов калибровки, постоянно появляются новые. В работе [1] был разработан оригинальный LRT-метод калибровки, затем этот метод получил развитие и в работе [2] представлен LR-метод калибровки. Оба метода имеют методический недостаток – определение коэффициентов отражения со стороны коаксиальных разъемов L-соединений переходов как средних линий комплексной функции частоты электромагнитного поля. Средние линии, полученные разными алгоритмами, имеют достаточно сильные погрешности. На рисунке 1 показаны средние линии, полученные методом минимакса и мнк.



**Рисунок 1. Сравнение средних линий, полученных разными методами для прямоугольного волновода**

Видно, что линии заметно отличаются друг от друга, и такой результат получен для исключения коаксиально-волноводных переходов, качество изготовления которых очень высокое. В настоящей работе предлагается новый метод исключения КВП как развитие LRT- и LR- методов. Метод основан на получении базовых точек, в которых и выполняется начальная калибровка.

В данной работе предлагается использовать новый LTR метод контроля параметров, по-

звolyющий получать среднюю линию аналитическим путем. То есть метод, сохраняя все достоинства LRT и LR методов, устраняет их основной недостаток – неточность определения средней линии. Метод является универсальным, позволяет работать как в стандартных, так и в нестандартных направляющих системах.

Для работы с методом необходимо провести три измерения с:

- отрезком электрически длинной линии, получить S-параметры;
- перемычкой, получить S-параметр;
- отрезками линий в режиме короткого замыкания или холостого хода, получить S-параметры.

Определить коэффициенты отражения со стороны коаксиальных разъемов и в базовых точках, где фаза  $S_{21}^L$  принимает значение  $\pm 90^\circ$  из соотношений:

$$S_{11}^a = \frac{S_{11}^T S_{12}^L - S_{11}^L S_{12}^T T}{S_{12}^L - S_{12}^T T}, S_{11}^b = \frac{S_{22}^T S_{21}^L - S_{22}^L S_{21}^T T}{S_{21}^L - S_{21}^T T} \quad (1)$$

Здесь:  $T = \exp(-i\gamma l)$ ,  $l = L$ ,  $l_t$  – длина перемычки,  $T$  – корень квадратного уравнения:

$$T^2 + aT + 1 = 0, \quad a = \frac{\det S^T + \det S^L - S_{11}^L \cdot S_{22}^T - S_{11}^T \cdot S_{22}^L}{S_{21}^T \cdot S_{21}^L}, \quad (2)$$

где  $\det S^i = S_{11}^i S_{22}^i - S_{12}^i S_{21}^i$ .

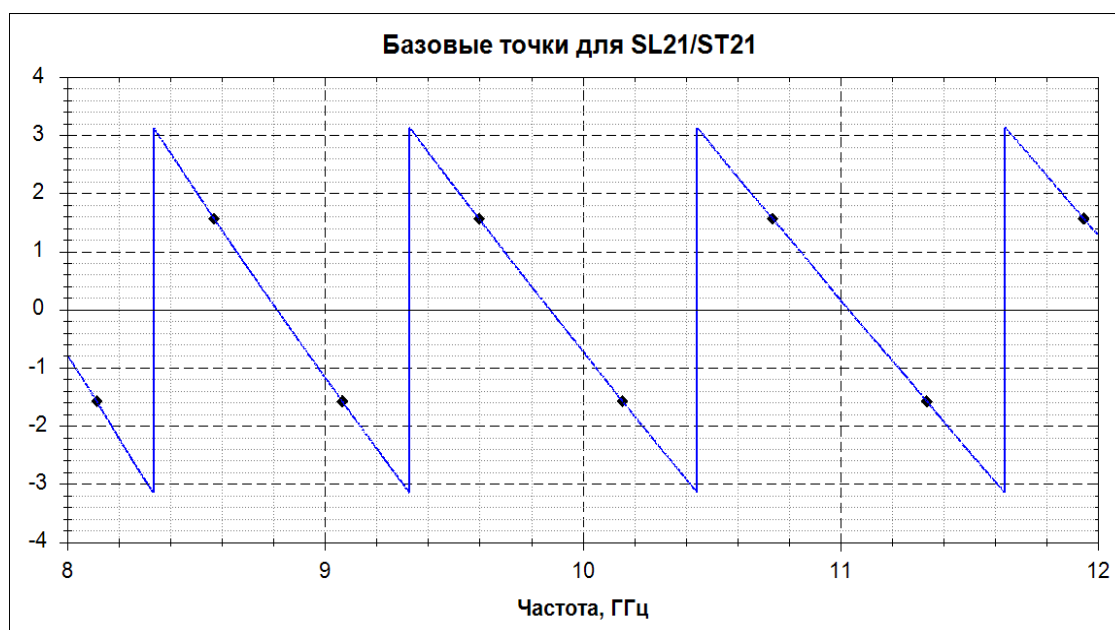


Рисунок 2. График фазы отношения с базовыми точками

После определения коэффициентов отражения и в базовых точках выполняем кусочную интерполяцию всего диапазона. В работе [3] выполнено сравнение трех методов кусочной интерполяции: линейная, кубическая и сплайнами Акимы. Полученные результаты оценивались как по точности, так и по времени получения результата. Показано, что для разреженных точек и данных, имеющих выбросы, лучше всего воспользоваться сплайнами Акимы,

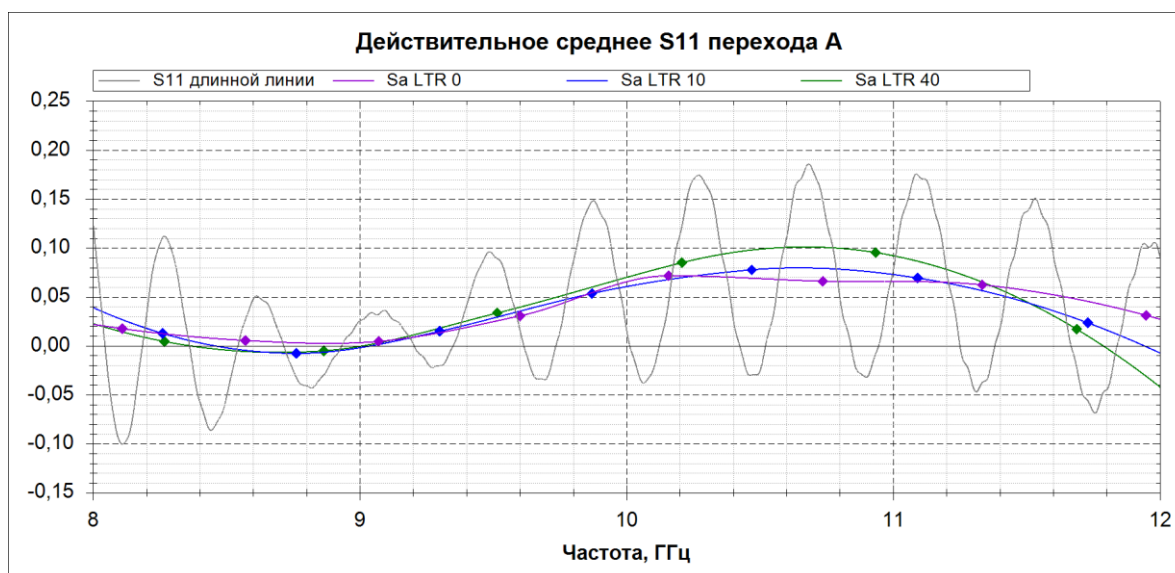
так как они устойчивы к выбросам и на разреженных данных не дают «ложных выбросов», как, например, наиболее популярные кубические сплайны.



**Рисунок 3. Сравнение средних линий, полученных кубическими сплайнами и сплайнами Акимы**

После получения значения коэффициентов отражения во всем диапазоне для завершения процедуры исключения влияния переходов на результаты измерения предлагается воспользоваться той же процедурой, что уже опробована в LRTи LR методах. Подробно данная процедура описана в [1,2]

Для работы LTR метода в качестве Т-соединения может использоваться соединение фланцев КВП «в стык», а также с переключкой длиной 10 и 40 мм. На рис. 4 показаны коэффициенты отражения S11 левого перехода, полученные на разных Т-соединениях. Видно, что ближе всего к средней линии приближается измерение с 10 мм переключкой.



**Рисунок 4. Сравнение средних линий, полученных на разных Т-соединениях**

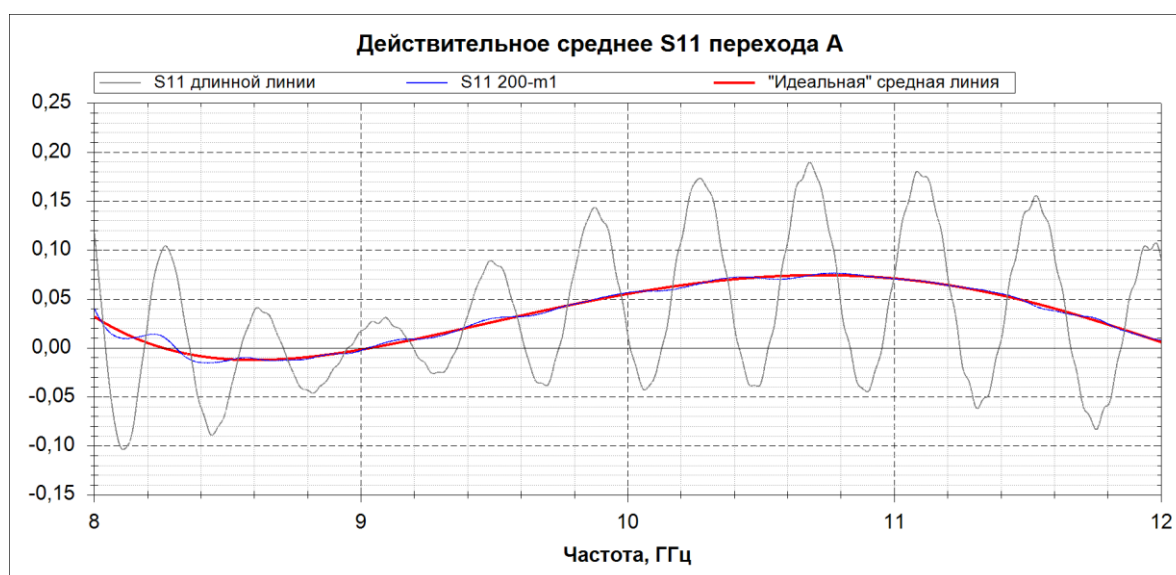
Далее в этой работе будем использовать данные, полученные для метода LTR с длиной переключки 10 мм.

При сопоставительном анализе LTR, OSM, LRT и LR методов контроля параметров сравнивались коэффициенты отражения S11 коаксиально-волноводных переходов, полученные разными методами, и КСВН оконечных нагрузок, параметры которых приведены в таблице.

Тип нагрузки	Сечение ВЧ тракта, мм	Диапазон частот, ГГц	КСВН нагрузки	Погрешность аттестации ±, %
Э9-126/1	23 × 10	8.24 – 12.05	< 1.03	1.5
Э9-126/2			1.4	2
Э9-126/3			2	2

Предлагаемый в данной работе LTR метод отличается от известных ранее LR и LRT методов алгоритмом нахождения средней линии, которая, фактически, является коэффициентом отражения S11 коаксиально-волноводных переходов. Поэтому на первом этапе сопоставительного анализа имеет смысл сравнить получаемые разными способами средние линии. Будем сравнивать средние линии для отрезка волновода длиной 200 мм, полученные алгоритмами МНК, минимакса и новым методом на основе базовых точек и сплайнов Акимы.

В качестве «идеальной» средней линии будем рассматривать коэффициент отражения для первой согласованной нагрузки (из таблицы), подключенной через отрезок волновода длиной 200 мм. На рис. 5 видно, что полученные данные имеют небольшие колебания, поэтому для дальнейшей работы эти измерения будут обработаны алгоритмом мнк полиномом 7 порядка. На рисунке .4 видно, что обработанные данные практически не отличаются от измеренных.



**Рисунок 5. «Идеальная» средняя линия**

На рис. 6-7 показан коэффициент отражения для левого КВП, полученный разными методами. Красная линии – это «идеальный» коэффициент отражения. Фиолетовый – полученный новым методом опорных точек, синий – метод мнк, зеленый – метод минимакса. Видно, что метод минимакса дает ломаную линию, на краях уходящую в бесконечность. Значения, полученные методом мнк, также могут отличаться на краях от истинной линии. Это достаточно серьезная проблема обоих методов нахождения средней линии. Метод, основанный на

базовых точках, также может иметь этот недостаток, но в этом методе точность линии зависит от качества определения базовых точек.

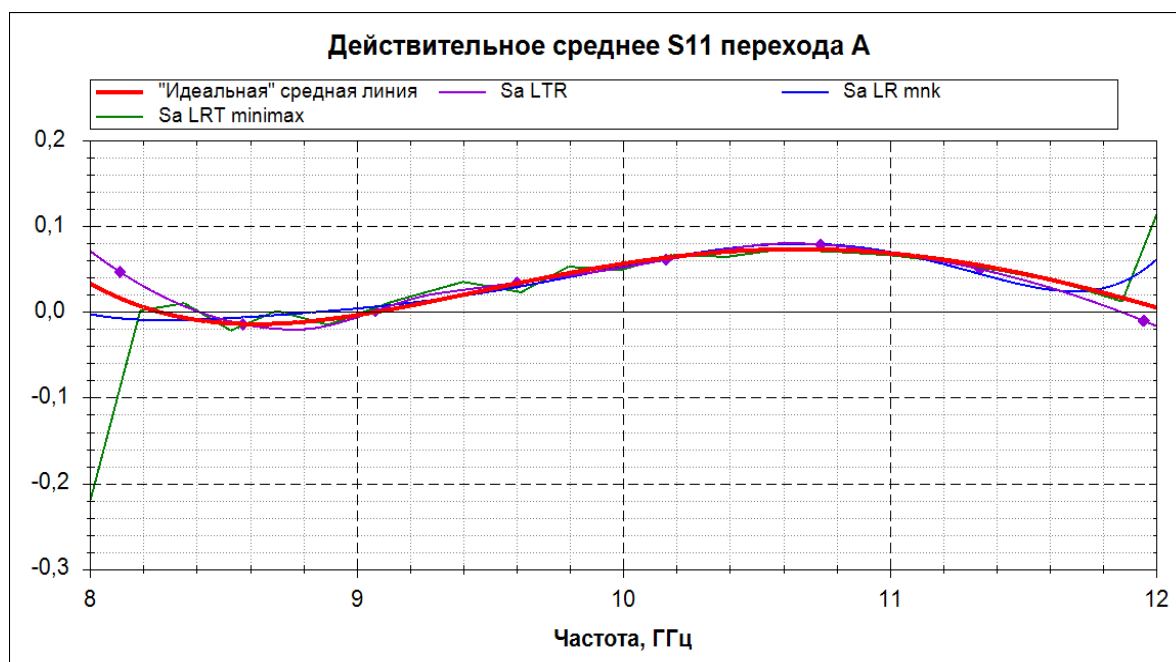


Рисунок 6. Сравнение средних линий, полученных разными способами

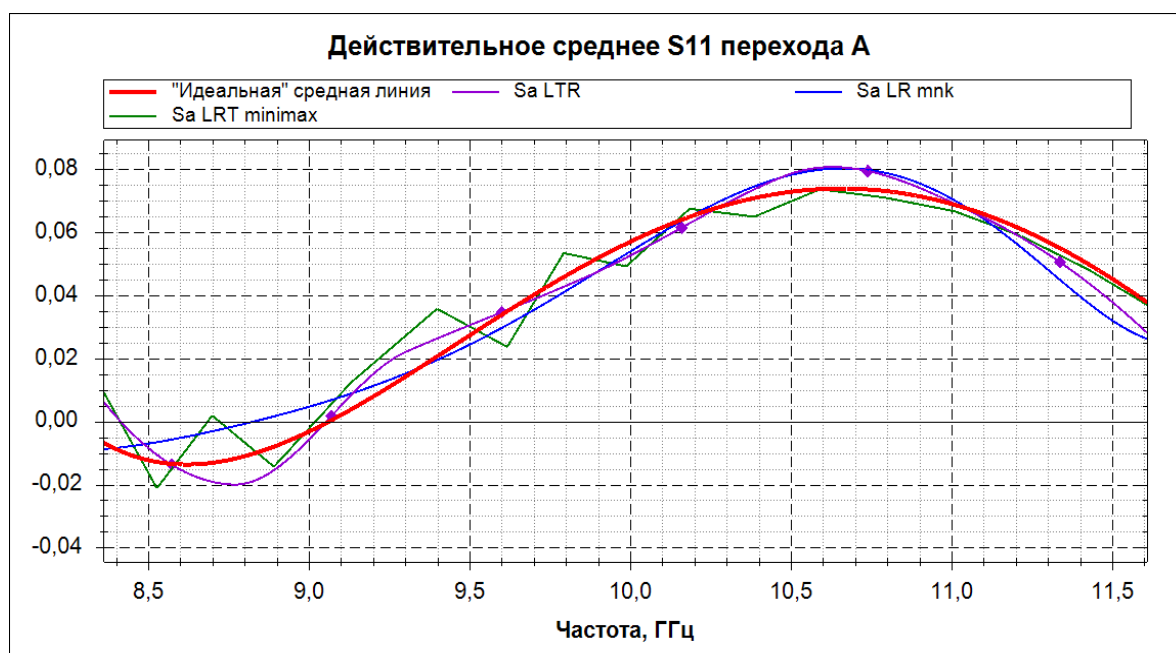


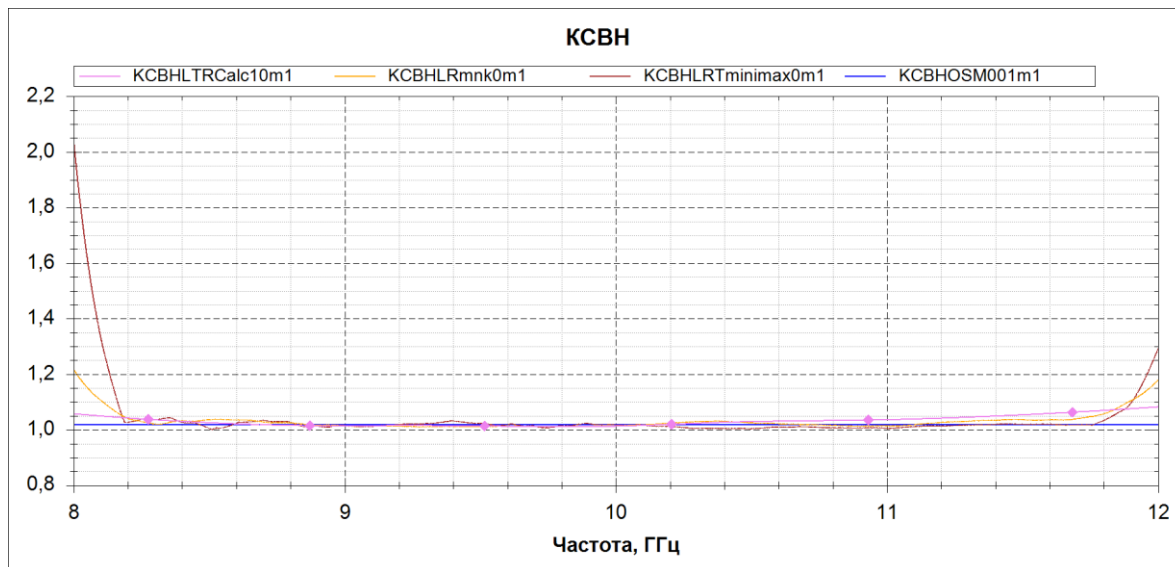
Рисунок 7. Сравнение средних линий, полученных разными способами – середина интервала

На рис. 7 хорошо видно, что все три метода дают неплохие результаты, лучше всего на данном графике к истинным значениям приближаются линии, построенные методами мнк и опорных точек. Это можно объяснить хорошим качеством изготовления КВ переходов. В диапазоне от 8,5 до 9,5 ГГц отклонения от истинного значения наиболее сильное, и если посмотреть на исходные данные (рис. 5), то именно в этом диапазоне они сильнее всего отличаются от синусоиды.

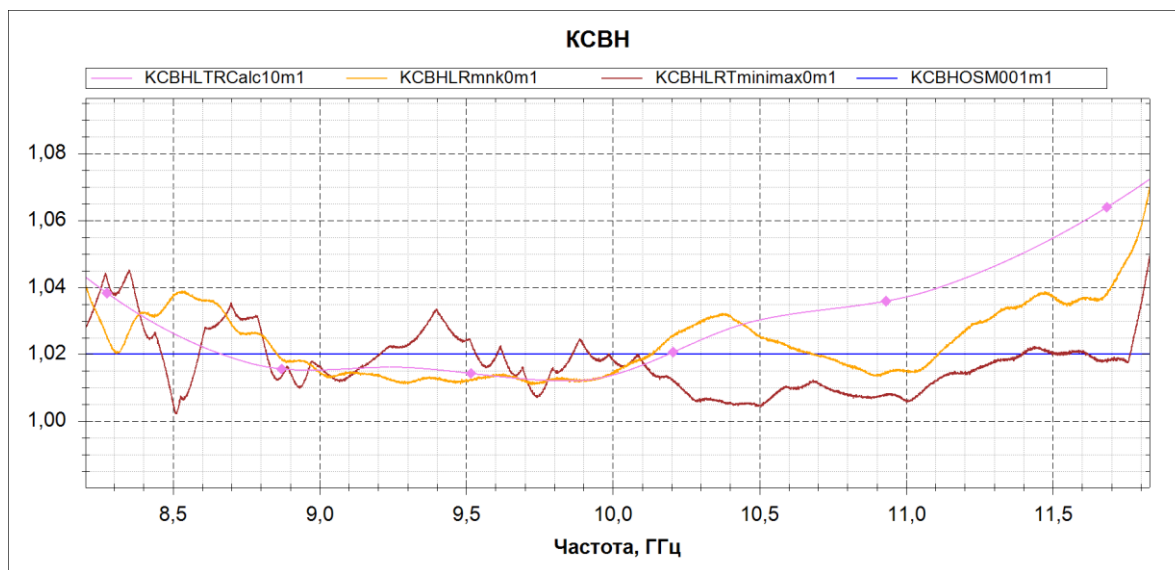
КСВН нагрузки 1, рассчитанный разными методами, показан на рис. 8-9. На рис. 8 видно, что КСВН, рассчитанный на основе средней линии, полученной методом минимакса, имеет



максимальное отклонение от истинного значения. Если рассматривать только середину интервала, то методы LTR и LR дают сопоставимый результат и он хуже, чем результат, получаемый классическим методом OSM. Результат, полученный методом LRT, неожиданно оказался даже чуть лучше, чем результат OSM, но скорее всего это справедливо только для данного измерения.

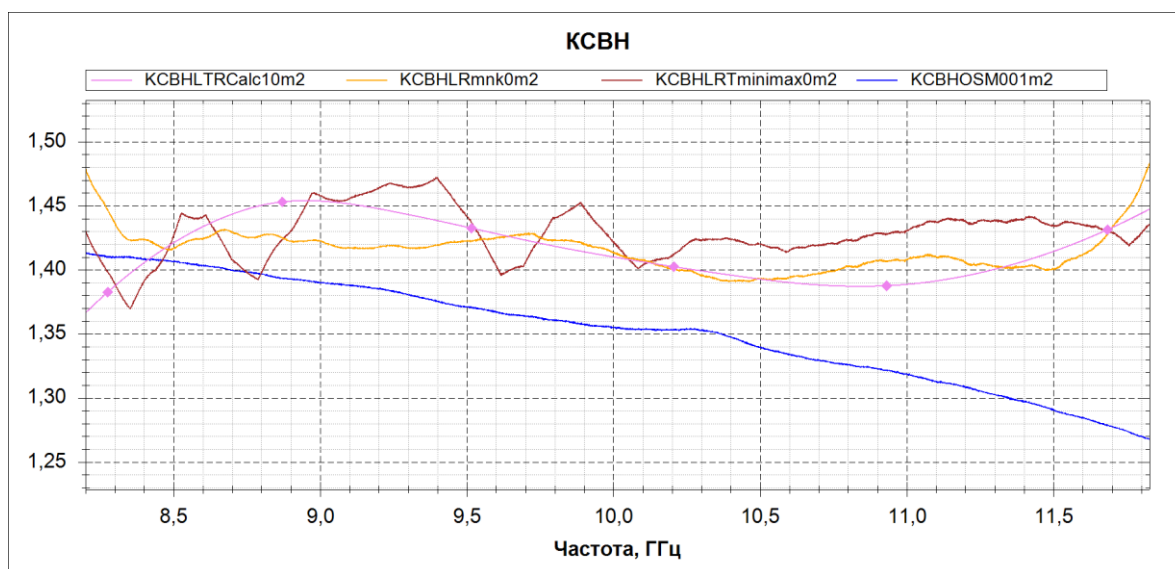


**Рисунок 8. Сравнение КСВН для первой нагрузки, полученные разными способами**

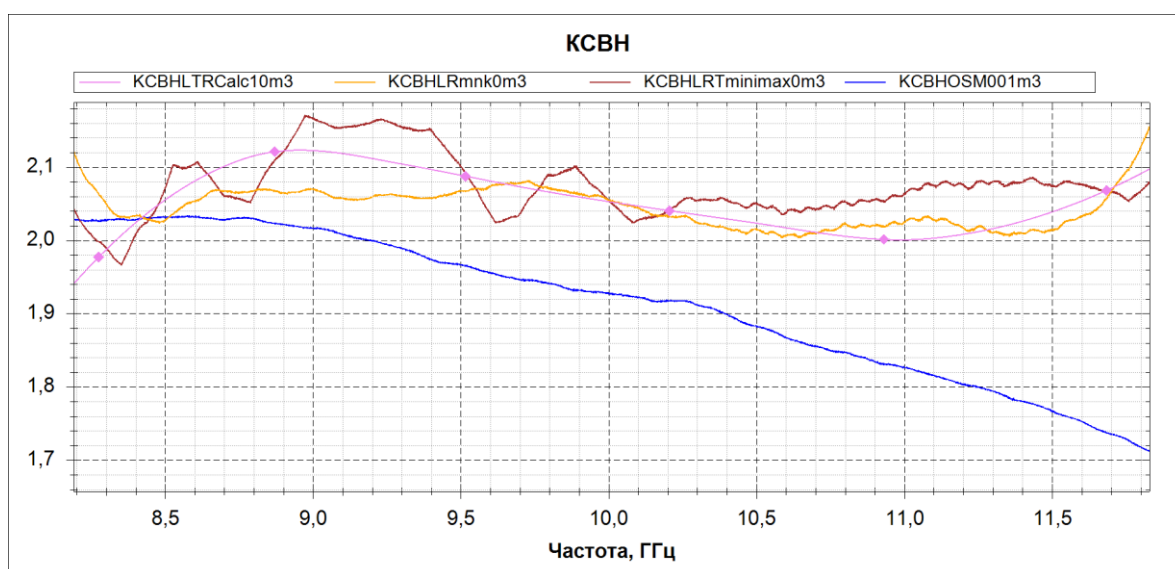


**Рисунок 9. Сравнение КСВН для первой нагрузки, полученных разными способами – середина интервала**

Для второй и третьей нагрузки ситуация на границах похожая – метод на основе средней, построенной алгоритмом минимакса, дает огромные выбросы в бесконечность. Если же рассматривать середину диапазона, то для второй и третьей нагрузки все три метода дают сопоставимый результат и он опять хуже, чем результат, получаемый классическим методом OSM. Это можно увидеть на рис. 10 и 11.



**Рисунок 10. Сравнение КСВН для второй нагрузки, полученных разными способами – середина интервала**



**Рисунок 11. Сравнение КСВН для третьей нагрузки, полученных разными способами – середина интервала**

Предлагаемый в данной работе метод определения коэффициентов отражения со стороны коаксиальных разъемов как средних линий квазипериодических комплексных функций частоты электромагнитного поля на основе базовых точек устраняет методический недостаток LRT и LR методов. При этом сохраняется основное достоинство этих двух методов – минимальный набор калибровочных мер.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 05-02 08075.*

### Библиографический список

1. **Лавричев, О.В.** LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах / О.В. Лавричев, С.М. Никулин // Датчики и системы. – М.: Изд-во Сенсидат-Плюс 2017, №8-9 с. 39-44.

2. **Евсеев, В.И.** Контроль параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве / В.И. Евсеев [и др.] //Ural Radio Engineering Journal, Уральский радиотехнический журнал. 2019. Vol. 3, No 1. p. 53–71.

3. **Круковец, А.С.** Разработка метода интерполяции значений номограммы / А.С. Круковец, Г.А. Горелкин // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 5. Ч. 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/05/53846> (дата обращения: 02.02.2020).

**E.A. Lupanova, S.M. Nikulin**

## **LTR METHOD FOR MONITORING DEVICE PARAMETERS IN WAVEGUIDE GUIDING SYSTEMS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The LTR method for measuring the S-parameters of devices in metal waveguides, which is a development of the LRT and LR methods, is considered. The proposed method solves the problem in determining the midline, which is the “thin” place of the LR and LRT methods.

**Keywords:** coaxial waveguide transition, waveguide, VSWR.

Е.А. Маврычев

**МИНИМАКСНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ В ММО СИСТЕМЕ  
С ВИНЕРОВСКИМ ДЕКОДЕРОМ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В данной работе рассматривается ММО система с пространственным мультиплексированием символов на передачу и линейным приемником, который минимизирует среднеквадратическую ошибку. Такой приемник называют оптимальным винеровским декодером. Предлагается оптимизация распределения мощности между передаваемыми символами на основе принципа «справедливости», то есть максимизируется качество наихудшего канала или минимизируется его среднеквадратическая ошибка. Такой подход позволяет снизить вероятность ошибочного приема в случае использования одинаковой модуляции и помехоустойчивого кодирования во всех каналах. Оптимизация распределения мощности сводится к задаче дробно-линейного программирования, которая решается методом биссекций с использованием алгоритма внутренней точки. Численный пример демонстрирует достигаемые улучшения по сравнению с равномерным распределением мощности.

**Ключевые слова:** ММО система, оптимальный винеровский декодер, распределение мощности, математическое программирование.

**Введение**

ММО – это технология связи, использующая разнесение антенн на передачу и прием, позволяющая повысить пропускную способность [1], [2]. В настоящее время ММО системы широко используются в стандартах 4G и 5G мобильной связи, а также в сетях WiFi [3], [4]. Наибольшее распространение на практике получило ортогональное пространственно-временное кодирование, позволяющие достичь характеристик близких потенциально возможным [5]. Такой подход распространен в ММО системах, работающих по протоколу «точка-точка».

Однако в системах связи поколения 5G ключевой технологией становится так называемая система massive ММО, в которой рост пропускной способности достигается за счет многократного увеличения числа антенных каналов [6], [7]. Наиболее распространенным подходом в massive ММО является много антенная базовая станция, обслуживающая пользователей с одиночными антеннами. При этом выполняется пространственное разделение пользователей и используется режим временного дуплекса (TDD) для «нисходящего» и «восходящего» каналов. В «нисходящем» канале (downlink) базовая станция выполняет прекодирование сигналов, которое позволяет разделить информационные символы, предназначенные различным пользователям [7], [8]. В «восходящем» канале пользователи синхронно передают сигналы, которые разделяются на базовой станции с использованием метода наименьших квадратов или минимума среднеквадратической ошибки [9].

В данной работе рассматривается ММО система без прекодирования на передатчике, при этом информационные символы мультиплексируются в антенные каналы. На приемном кон-

це линии связи рассматривается декодер с линейным преобразованием сигналов по критерию минимума среднеквадратической ошибки, которое разделяет информационные символы, излученные различными передающими каналами. Такой подход применим, как в ММО системах работающих по протоколу «точка-точка», так и в описанных выше системах с множественным доступом massive ММО в «восходящем» канале.

Известно, что отсутствие кодирования на передачу не позволяет полностью реализовать потенциал ММО системы. В частности, если во всех антенных каналах используется одинаковая модуляция и помехоустойчивое кодирование или одинаковая битовая загрузка, то после разделения каналов в приемнике с помощью линейного преобразования возникает различие в отношении сигнал/(шум+помеха) (ОСШП) в различных каналах. Каналы с наименьшим ОСШП будут вносить наибольший вклад в битовую ошибку системы. Для случая многопользовательской системы это приводит к наличию пользователей с плохим качеством обслуживания.

Для решения данной проблемы в работе предлагается использовать распределение мощности между передающими антенными каналами. Оптимизация распределения мощности осуществляется по критерию минимума максимальной среднеквадратической ошибки или максимума минимального ОСШП, а именно оптимизируется наихудший канал. Такой подход в многопользовательских системах получил название оптимизация по «справедливости» [10]. Оптимизация мощности позволяет добиться меньшей вероятности битовой ошибки в ММО системе. Следует отметить, что реализация данного способа требует наличие информации на передающем конце линии связи о коэффициентах передачи по мощности с учетом линейного преобразования в приемнике. Другим фактором, который затрудняет практическую реализацию данного подхода, является то, что при оптимизации ограничивается общий бюджет мощности ММО системы, а не бюджеты отдельных антенных каналов, что может быть затруднительным при проектировании многопользовательских систем.

Тем не менее, предлагаемая оптимизация мощности позволяет повысить ОСШП в наихудшем канале и за счет этого улучшить вероятность битовой ошибки в ММО системе. Результаты математического моделирования, приведенные в работе, показывают численные характеристики данных улучшений.

### Постановка задачи и алгоритм оптимизации

Рассмотрим ММО систему с  $M$  передающими антеннами и  $N$  приемными антеннами, в которой выполняется условие  $N \geq M$ . Система осуществляет передачу информационного пространственного символа  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_M]^T$  размерности  $M \times 1$ , где  $(\cdot)^T$  означает операцию транспонирования. Элементы информационного символа принадлежат некоторому дискретному алфавиту с единичной средней мощностью, т.е.  $E\{|s_m|^2\} = 1, m = 1 \dots M$ , где  $E\{\cdot\}$  – операция статистического усреднения.

Пусть  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T$  –  $M \times 1$  есть вектор комплексных амплитуд сигнала, излучаемого передающими антеннами, который формируется из информационного вектора  $\mathbf{s}$  как результат распределения мощности между его компонентами

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}^{0.5} \mathbf{s}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{F} = \text{diag}\{\phi_1, \dots, \phi_M\}$  – диагональная матрица размерности  $M \times M$ , содержащая мощности, которые распределяются между элементами информационного пространственного символа  $\mathbf{s}$ . Таким образом, в  $m$ -й передающей антенне излучается сигнал с комплексной амплитудой

$x_m = \sqrt{j_m} s_m$ . Полная мощность, излучаемая MIMO системой, ограничивается величиной  $P$ , то есть должно выполняться условие

$$\sum_{m=1}^M \phi_l = P. \quad (2)$$

Заметим, что при равномерном распределении мощности  $\phi_m = P/M$ , то есть во все антенные каналы распределяется одинаковая мощность  $P/M$ .

Вектор сигнала приемных антеннах  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$  размерности  $N \times 1$  в представляется в виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица размерности  $N \times M$  комплексных коэффициентов передачи частотно-неселективного канала,  $\mathbf{v}$  – вектор собственных шумов приемных устройств, который является комплексным гауссовским с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, а именно  $E\{\mathbf{v}\mathbf{v}^H\} = \mathbf{I}_N$ , где  $(\cdot)^H$  – эрмитово сопряжение,  $\mathbf{I}_N$ , – единичная матрица размерности  $N \times N$ .

В приемнике выполняется линейное преобразование матрицей  $\mathbf{G}$ , имеющей размерность  $N \times M$ , после которого получается оценка информационного символа

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}^H \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{G}^H \mathbf{v}, \quad (4)$$

где для достижения минимальной среднеквадратической ошибки оценивания вектора сигнала  $\mathbf{x}$  матрица преобразования равна

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} s + M/P \mathbf{I} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Оценка  $m$ -го элемента информационного символа

$$\hat{x}_m = \sqrt{\phi_m} \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_m s_m + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq m}}^M \sqrt{\phi_l} \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_l s_l + \mathbf{g}_m^H \mathbf{v}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{g}_m$  –  $m$ -й столбец матрицы преобразования  $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_M]$ , а  $\mathbf{h}_m$  –  $m$ -й столбец канальной матрицы  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_M]$ .

ОСШП в  $m$ -м канале записывается в виде

$$\rho_m = \frac{\phi_m \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_m \mathbf{h}_m^H \mathbf{g}_m}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_l \mathbf{h}_l^H \mathbf{g}_m + \mathbf{g}_m^H \mathbf{g}_m} = \frac{\phi_m \alpha_{m,m}}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \alpha_{m,l} + \beta_m}, \quad (7)$$

где  $a_{m,m} = \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_m \mathbf{h}_m^H \mathbf{g}_m$  – коэффициент передачи по мощности элемента пространственного символа  $x_m$ , учитывающий канал передачи и линейное преобразование в приемнике,  $a_{m,l} = \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_l \mathbf{h}_l^H \mathbf{g}_m$  – перекрестный коэффициент передачи по мощности символа  $x_l$ , в  $m$ -й канал, полученный после линейного преобразования в приемнике,  $b_m = \mathbf{g}_m^H \mathbf{g}_m$  – мощность собственного шума в  $m$ -м канале после линейного преобразования.

Таким образом, применяя минимаксный подход оптимизации для наихудшего канала, распределение мощности  $\Phi$  может быть найдено из следующей оптимизационной задачи

$$\max_{\Phi} \min_m \frac{\phi_m \alpha_{m,m}}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \alpha_{m,l} + \beta_m} \text{ s.t. } \sum_{l=1}^M \phi_l = P. \quad (8)$$

Решение задачи (8) обеспечивает максимально ОСШП в наихудшем канале с учетом ограничения бюджета полной излучаемой мощности. Рассмотрим способ решения данной задачи. Введем дополнительную переменную  $\tau$  и задачу (8) перепишем в следующем эквивалентном виде

$$\max_{\Phi, \tau} \tau \text{ s.t. } \sum_{l=1}^M \phi_l = P, \frac{\phi_m \alpha_{m,m}}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \alpha_{m,l} + \beta_m} \geq \tau, m = 1, \dots, M. \quad (9)$$

Задача (9) относится к классу задач линейной оптимизации с линейными и дробно-линейными условиями, которые могут быть сведены к следующим невыпуклым квадратичным условиям

$$\max_{\Phi, \tau} \tau \text{ s.t. } \sum_{l=1}^M \phi_l = P, \phi_m \alpha_{m,m} - \tau \left( \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \alpha_{m,l} + \beta_m \right) \geq 0, m = 1, \dots, M. \quad (10)$$

Все условия задачи (10) являются выпуклыми и линейными относительно переменных  $\phi_1, \dots, \phi_M$ . Поэтому может быть использован линейный поиск переменной  $\tau$ , а именно необходимо найти максимальное значение переменной  $\tau$ , при котором область значений оптимизационной задачи не является пустым множеством. Линейный поиск переменной  $\tau$  осуществляется на интервале  $[t_{\min}, t_{\max}]$ , который для рассматриваемой задачи может быть определен как

$$t_{\min} = 0, t_{\max} = \max\{P\alpha_{1,1}, \dots, P\alpha_{M,M}\}. \quad (11)$$

Метод биссекций используется для сокращения перебора по переменной  $\tau$ . При этом на каждой итерации переменной  $\tau$  присваивается среднее значение рассматриваемого интервала  $\tau(i) = (t_{\min} + t_{\max})/2$ . Далее выполняется проверка условий

$$\text{find } \Phi(i+1) \text{ s.t. } \sum_{l=1}^M \phi_l = P, \phi_m \alpha_{m,m} - \tau(i) \left( \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \phi_l \alpha_{m,l} + \beta_m \right) \geq 0, m = 1, \dots, M. \quad (12)$$

Если в (12) область значений не пустое множество, то  $\Phi(i+1)$  присваивается любое допустимое значение из области значений задачи (12), при этом для следующего шага допустимый интервал переменной  $\tau$  ограничивается снизу  $t_{\min} = (t_{\min} + t_{\max})/2$ . В противном случае интервал поиска ограничивается сверху  $t_{\max} = (t_{\min} + t_{\max})/2$ . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока норма разницы двух решений полученных на успешных итерациях не станет меньше некоторой малой величины

$$\|\Phi(i+1) - \Phi(i)\| \leq \delta. \quad (13)$$

Отметим, что поиск решения в области допустимых значений задачи (12) является задачей линейного программирования, которая эффективно решается с помощью метода внутренней точки [11].

## Результаты моделирования

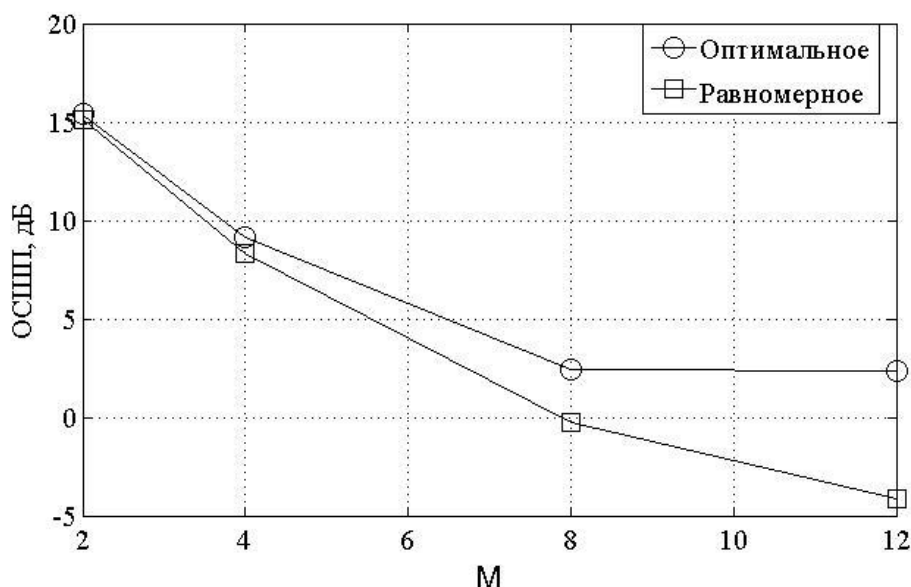
Рассмотрим численный пример, демонстрирующий эффективность предлагаемого подхода. Считаем, что коэффициенты передачи канальной матрицы  $\mathbf{H}$  являются комплексными гауссовскими случайными величинами с нулевым средним и дисперсией, равной единице. При моделировании полагается, что канальная матрица является точно известной. В каждом

статистическом эксперименте рассматривается случайная реализация канальной матрицы. Выполняется 200 экспериментов для получения средних значений выходного ОСШП.

На рисунке показаны зависимости ОСШП для наихудшего канала от числа передающих антенн. При этом число приемных антенн  $N=12$ , а излучаемая мощность  $P=10$  дБ. На рисунке представлены две кривые – для оптимального распределения мощности и для равномерного распределения мощности без оптимизации. Как видно из рисунка, наибольший выигрыш (более 6 дБ) достигается в случае  $M=N$ , то есть при наибольшем числе параллельных каналов передачи данных. Следует отметить, что получаемый выигрыш в ОСШП позволяет снизить вероятность ошибочного приема системы.

### Заключение

В данной работе предложен метод распределения мощности между каналами в ММО системе с пространственным мультиплексированием символов. Оптимизация распределения мощности выполнена на основе критерия минимума среднеквадратической ошибкой для наихудшего канала при условии, что в приемнике осуществляется оптимальное линейное декодирование. Оптимизация распределения мощности сведена к задаче дробно-линейного программирования, которая решается итерационным методом бисекцией с использованием алгоритма внутренней точки. Результаты моделирования показали, что для наихудшего канала достигается выигрыш в ОСШП, который наиболее существенен, если число антенн на передачу близко числу приемных антенн.



Зависимость ОСШ для наихудшего канала от числа антенн на передачу

### Библиографический список

1. **Telatar, I.E.** Capacity of Multi-antenna Gaussian channels // European Transactions on Telecommunications, vol. 10, no. 6, 1999.
2. **Ермолаев, В.Т.** Эффективность систем связи с антенными решетками в условиях рассеивающей среды / В.Т. Ермолаев, Е.А. Маврычев, А.Г. Флакман // Успехи современной радиоэлектроники. № 3, 2003, С. 41-48.



3. MIMO: From theory to implementation, edited by A. Sibille, C. Oestges, A. Zanella // Academic Press; 1st edition, 2010, P. 384.
4. **Boccardi, F., R. W Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, P. Popovski** Five disruptive technology directions for 5G // IEEE Communications Mag., vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.
5. **Tarokh, V., H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank** Space-time block codes from orthogonal designs // IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456–1467, Jul. 1999.
6. **Rusek, F., D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson** Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays // IEEE Signal Process. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan 2013.
7. **Lu, L., G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang** An overview of massive MIMO: benefits and challenges // IEEE Journal of selected topics in signal processing, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014
8. **Fatema, N., G. Hua, Y. Xiang, D. Peng, and I. Natgunanathan** Massive MIMO linear precoding: A survey // IEEE Syst. J., vol. 12, no. 4, pp. 3920–3931, Dec 2018.
9. **Albreem, M.A., M. Juntti, and S. Shahabuddin** Massive MIMO Detection Techniques: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorial, vol. 21, no 4, pp. 3109 – 3132, 2019.
10. **Liu, Y.-F., Y.-H. Dai, Z.-Q. Luo** Max-min fairness linear transceiver design for a multi-user MIMO interference channel // Proc. IEEE ICC, pp. 1-5, Jun. 2011.
11. **Boyd, S., L. Vandenberghe** Convex Optimization // Cambridge University Press, 2004.

**E.A. Mavrychev**

## **MIN-MAX POWER ALLOCATION IN MIMO SYSTEM WITH WIENER DECODER**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

In this paper, MIMO system with spatial multiplexing of transmitted symbols and linear receiver minimizing of mean square error is considered. This receiver is optimal Wiener decoder. Optimal power allocation between the transmitted symbols is proposed which is based on min-max fair i.e. a quality of service is maximized for worst channel or its mean square error is minimized. Such approach allows reducing the bit error rate in the case of same modulation and error correction coding in the channels. Optimization of power allocation is the problem of fractional linear programming which is solved by using bisection method and interior point algorithm. Numerical example shows improvement in compare with uniform power allocation.

**Key words:** MIMO system, optimal Wiener decoder, power allocation, mathematical programming.

Д.В. Малеев

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ МОДУЛЯТОРА ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ СТАНДАРТА ISDB-T

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Стандарт ISDB-T используется в Японии и странах Южной Америки; он поддерживает режимы одночастотной и многочастотной сети. Недостатком стандарта является фиксированная высокая скорость BTS-потока, это накладывает ограничения на канал связи между мультиплексором и модулятором, что приводит к увеличению стоимости эксплуатации системы цифрового ТВ. В работе реализованы два метода снижения скорости потока при использовании как многочастотной, так и одночастотной сети. Первым методом является ремультимплексирование, которое позволяет преобразовать любой MPEG поток в BTS непосредственно на модуляторе, благодаря этому мультиплексор может передавать по каналу связи минимальный набор данных; этот метод подходит только для многочастотной сети. Вторым методом является использование специального адаптера потока, который удаляет избыточные данные на стороне мультиплексора, а специальный декодер на стороне модулятора позволяет восстановить эти данные. В работе реализован декодер, позволяющий восстановить данные на основе структуры BTS кадра. Второй метод совместим как с режимом многочастотной, так и одночастотной сети. В работе произведена аппаратная реализация обоих методов.

**Ключевые слова:** ISDB-T, цифровое телевидение, ремультимплексирование.

### Введение

В настоящее время можно выделить несколько групп конкурирующих стандартов цифрового телевидения [1]:

- ATSC (американский стандарт),
- DVB-T/T2 (европейский стандарт),
- ISDB (японский стандарт),
- DTMB (китайский стандарт).

Многие страны Южной Америки перешли на цифровой стандарт на рубеже 2000-2010 годов. По результатам испытаний был сделан выбор в пользу ISDB-T, благодаря этому существенно расширился рынок этого стандарта [2].

Отличительной особенностью ISDB-T является использование пакетов собственного формата (BTS) длиной 204 байта. Эта особенность приводит не только к увеличению количества передаваемых данных на 8,5%, но также к потере совместимости с оборудованием, не поддерживающим данный формат пакетов. В результате этого вещатель становится ограничен в выборе оборудования для использования на промежуточных узлах сети. Также следует отметить, что стандарт определяет постоянную скорость BTS потока между мультиплексором и модулятором равной 32,504 Мб/с вне зависимости от установленных параметров и скорости

вложенных видеопотоков. Поддержание постоянной скорости потока обеспечивается за счёт добавления null-пакетов, которые не несут полезной информации и увеличивают накладные расходы [3].

Стандарт ISDB-T поддерживает режим одночастотной сети [4]. Для его реализации вещателю необходимо объединить модуляторы в единую информационную сеть с пропускной способностью не менее 32,504 Мб/с и временем прохождения пакетов от мультиплексора до модулятора не более 1 с. Любое кратковременное нарушение этих ограничений приведёт к сбою одночастотной сети, поэтому вещатели прилагают усилия для повышения стабильности работы канала передачи данных между источником сигнала и модулятором.

Высокая стоимость использования канала передачи данных между источником сигнала и модулятором оказывается важным фактором, снижающим качество работы как одночастотной, так и многочастотной сети. При этом стоимость растёт вместе с увеличением требуемой пропускной способности. Стоимость эксплуатации системы ISDB-T можно снизить, уменьшив накладные расходы в канале передачи данных между мультиплексором и модулятором, а также добавив возможность использования на промежуточных узлах сети изначально несовместимого с ISDB-Тоборудования, например, DVB-T. Таким образом, снижение стоимости эксплуатации системы ISDB-T является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка программных модулей для модулятора XTEncoder, предназначенных для обеспечения совместимости с оборудованием, использующим пакеты длиной 188 байт, а также для снижения накладных расходов в стандарте ISDB- передаче данных и при эксплуатации телевизионной системы.

Для этого необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы снижения скорости потока и доработать их;
- разработать программный код, реализующий эти методы; программный код должен обеспечивать совместимость с уже существующим стандартом ISDB-T.

### **Mackenzie Re-Mux**

Одним из первых вариантов решения поставленных задач был Mackenzie Re-Mux, ремультимплексор, разработанный в университете Маккензи, Бразилия. Ремультимплексор был реализован в виде платы расширения для модулятора Harris M2X [5]. Принцип его работы заключается в следующем:

1. Оператор вручную настраивает сервисы и параметры модуляции.
2. Входной поток с пакетами длиной 188 или 204 байта проходит через детектор, который пропускает первые 188 байт пакета.
3. Входной поток демультимплексируется, данные сохраняются в три буфера для разных слоёв в соответствии с настройками.
4. Ремультимплексор формирует BTS-пакеты в соответствии с настройками.

Структурная схема Mackenzie Re-Mux представлена на рис. 1.

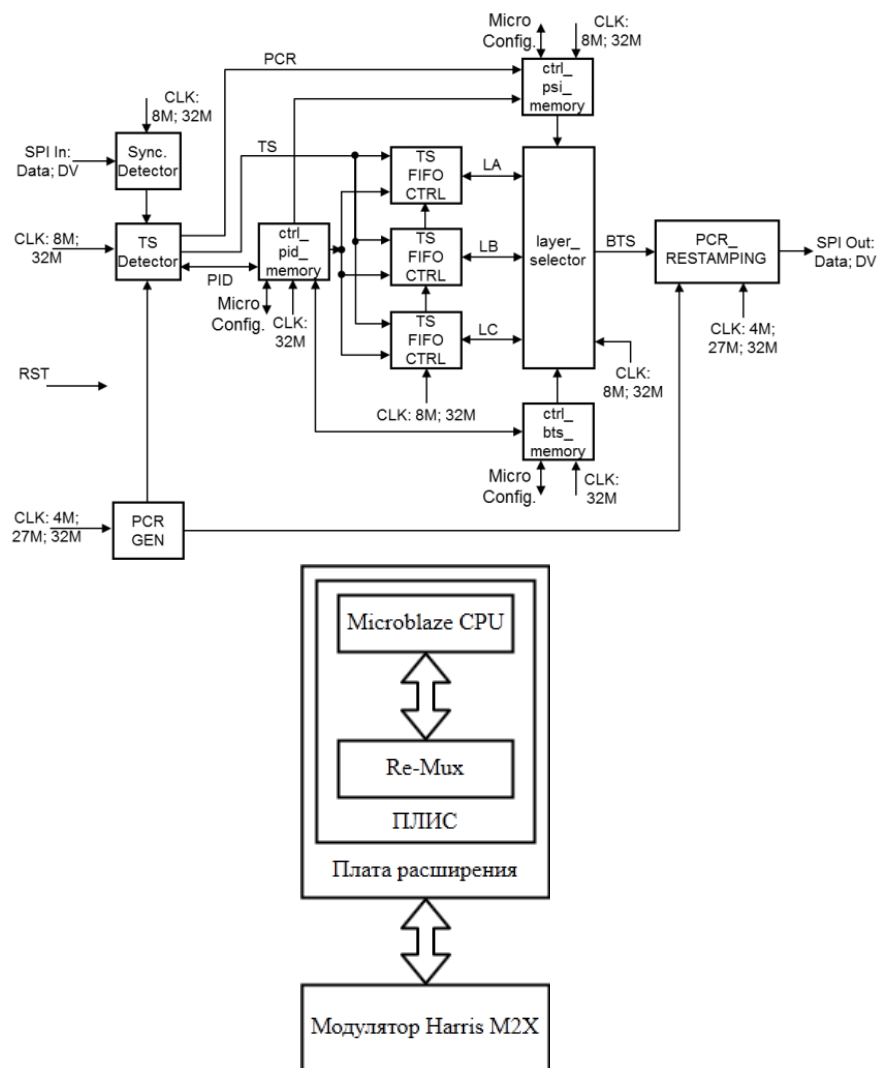
К достоинствам ремультимплексора можно отнести возможность использования любого совместимого с MPEG входного потока, включая базовые потоки с пакетами 188 и 204 байта, а также ATSC, DVB-T, DVB-T2, ISDB-T; также вещатель может включить, отключить или перенастроить сервисы для своих нужд, используя один и тот же входной поток. Особенностью ремультимплексора является то, что его невозможно использовать в составе одночастотной сети.

Существенным недостатком является необходимость ручной настройки всех параметров ремультимплексора, хотя большинство из них может быть извлечено из входящих пакетов. Для исправления этого недостатка в данной работе было добавлено два модуля:

1. PParser – модуль декодирования настроек, извлекаемых из IP пакетов потока ISDB-T;

2. PacketStorage – модуль, позволяющий сохранять до 10 пакетов с определённым PID.

После сохранения ПО модулятора может прочитать пакеты и декодировать сохранённые в них параметры, а затем использовать их в качестве параметров ремультимплексора.



**Рисунок 1. Структурная схема Mackenzie Re-Mux**

Благодаря этим нововведениям стало возможно реализовать режим PCR Restamping, который широко используется при отсутствии синхронизации между мультимплексором и модулятором. Этот режим позволяет предотвратить переполнение или опустошение буфера модулятора из-за недостаточно точно поддерживаемой скорости потока.

Структурная схема модернизированного ремультимплексора приведена на рис. 2.

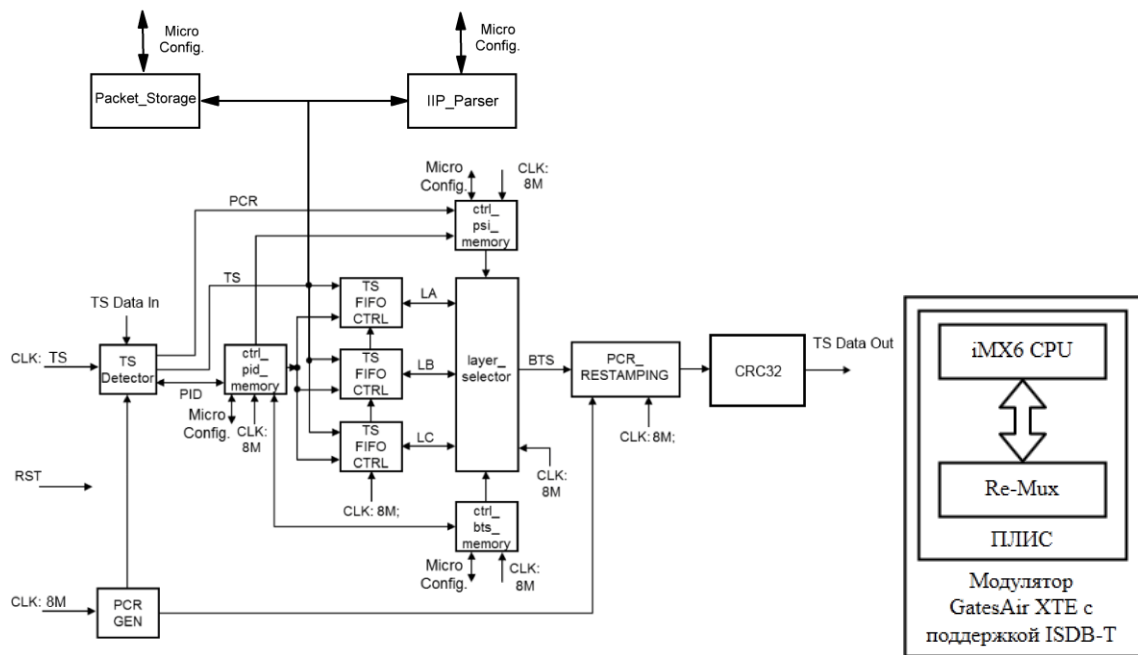


Рисунок 2. Структурная схема модернизированного ремультимплексора

### Mackenzie BTS adapter

Отсутствие у ремультимплексора возможности работы в режиме одночастотной сети привело к необходимости создания специального адаптера, который выполнял бы схожую функцию, но мог бы работать в режиме одночастотной сети. Группа специалистов, разработавшая Mackenzie Re-Mux, предложила свою реализацию [6]:

- 1) удаляется слой Null, а Null-пакеты из остальных слоёв перемаркируются PID=0x1FFD;
- 2) 16 байт пакета длиной 204 байта отсекаются, а на основе содержащейся в них информации формируется PLI пакет, содержащий пары слой-PID;
- 3) декодер анализирует PLI пакет, восстанавливает последние 16 байт пакетов, перемаркирует Null-пакеты PID=0x1FFF.

Адаптированный поток совместим со всеми системами, поддерживающими MPEG TS, в том числе с системами DVB-T. Результаты, описанные в [6], показали состоятельность данной разработки. Однако впоследствии был найден более простой способ достижения такого результата.

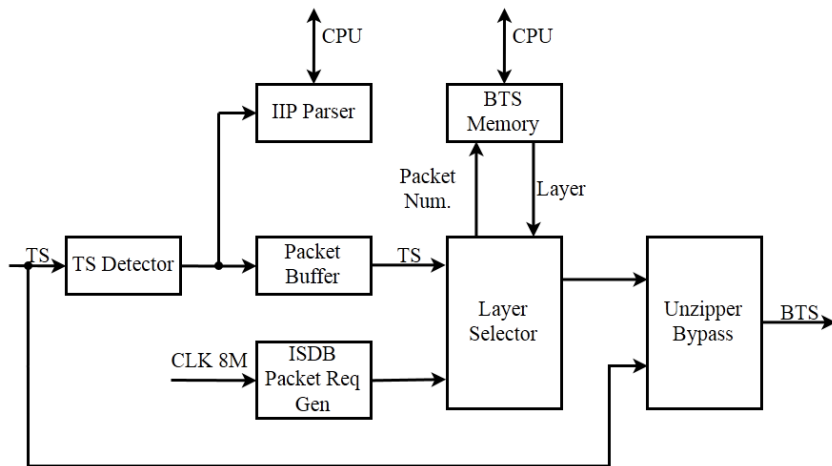
### Harris BTS adapter (“Zipper”)

Принцип работы адаптера, разработанного в Harris, основан на известности структуры BTS кадра, зависящей только от параметров модуляции. Алгоритм работы похож на Mackenzie BTS adapter:

- 1) удаляется слой Null;
- 2) последние 16 байт пакета длиной 204 байта отсекаются;
- 3) декодер анализирует IP пакет, восстанавливает последние 16 байт пакетов;
- 4) последовательность слоёв восстанавливается исходя из параметров, сохранённых в IP пакете.

Адаптированный поток совместим со всеми системами, поддерживающими MPEGTS, в том числе с системами DVB-T;

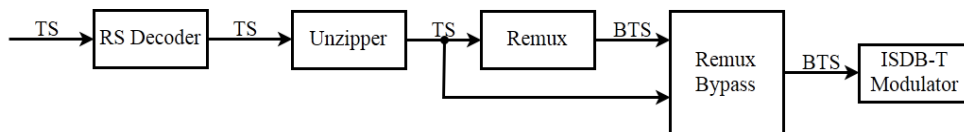
В данной работе был разработан декодер (“Unzipper”), восстанавливающий адаптированный поток. В качестве прототипа был использован ремультимплексор. Структурная схема декодера приведена на рис. 3.



**Рисунок 3. Структурная схема декодера**

### Аппаратная реализация

Модернизированный ремультимплексор и декодер были интегрированы в программный код модулятора ISDB-T; также был добавлен декодер Рида-Соломона для помехоустойчивых кодов (204, 188) и (204, 196), применяемых в DVB-T и ISDB-T. Аппаратной платформой модулятора ISDB-T служит Gates Air XT Exciter, в состав которого входит ПЛИС Xilinx Kintex-7 и одноплатный компьютер на базе процессора iMX6; возможности данной платформы были описаны в [7, 8]. Структурная схема интегрированных модулей приведена на рис. 4. Апробация нововведений была успешно произведена в Бразилии и Чили [9].



**Рисунок 4. Структурная схема модулей, интегрированных в Gates Air XTE**

### Выводы

1. В данной работе было проанализировано три метода снижения скорости потока ISDB-T, по результатам анализа произведена реализация двух методов.

2. Произведена модернизация ремультимплексора. Добавлены функции сохранения пакетов и извлечения параметров, что позволило автоматизировать настройку ремультимплексора и реализовать режим PCR Restamping. Программный код был перенесён на новую аппаратную платформу, что позволило уменьшить количество электронных компонентов в составе модулятора за счет исключения платы расширения и использования только одной ПЛИС.

3. Разработан декодер потока, адаптированного по методу Harris.
4. Разработанные модули интегрированы в состав модулятора Gates Air XTE. Апробация нововведений была успешно произведена в Бразилии и Чили.

### Библиографический список

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровое\\_телевидение](https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровое_телевидение)
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/ISDB-T>
3. [https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/6-STD-B31v1\\_6-E2.pdf](https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/6-STD-B31v1_6-E2.pdf)
4. [http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/single\\_freq/](http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/single_freq/)
5. <http://gates-harris-history.com/manuals/ex/8882866001.pdf>
6. **C. Akamine, Yuzo Iano, Gustavo de Melo Valeira, Gunnar Bedicks, Jr.** Re-Multiplexing ISDB-T BTS Into DVB TS for SFN. IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 55, NO. 4, DECEMBER 2009. [https://www.academia.edu/24516800/Re-Multiplexing\\_ISDB-T\\_BTS\\_Into\\_DVB\\_TS\\_for\\_SFN](https://www.academia.edu/24516800/Re-Multiplexing_ISDB-T_BTS_Into_DVB_TS_for_SFN)
7. **Малеев, Д.В.** Разработка модулятора цифрового телевидения стандарта ATSC 3.0. / Д.В. Малеев, Н.П. Ямпурин // 19-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2017», Москва, Россия, доклады. 2017 г.
8. **Малеев, Д.В.** Разработка модулятора цифрового телевидения стандарта ATSC 3.0. / Д.В. Малеев, Н.П. Ямпурин // 19-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2017», Москва, Россия, доклады. 2017 г.
9. <http://www.gatesair.com/media-center/news/gatesair-to-support-national-dtv-rollout-in-chile>.

**D.V. Maleev**

### IMPROVEMENTS OF ISDB-T DIGITAL TELEVISION MODULATOR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

ISDB-T standard is used in Japan and countries of South America. It supports single-frequency (SFN) and multi-frequency (MFN) network modes. The disadvantage of this standard is constantly high speed of BTS stream, which causes high requirements to link from multiplexer to modulator and causes high system operating costs. In this article, two bandwidth reduction methods for SFN and MFN are developed. The first method is remultiplexing which is able to convert any MPEG stream to BTS directly on modulator, which allows multiplexer to transmit minimum amount of data; this method is suitable only for MFN. The second method is using special stream adapter which removes excess data on multiplexer side and then special decoder restores this data. A decoder which restores data based on BTS structure is developed. This decoder is compatible either with MFN and SFN. Hardware implementation of both methods is described.

**Key words:** ISDB-T, digital television, remultiplexing.

## АЛГОРИТМЫ ПОДАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПОМЕХИ В АВТОМОБИЛЬНОМ РАДАРЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Борьба с помехами является одной из важнейших проблем в современной радиолокации. Особенно это важно для автомобильных радаров, так как мощность излучения мала, а уровень шумов и помех высок. В радиолокации важнейшими параметрами являются скорость обработки (так как используется межпериодная обработка сигналов), точность оценивания характеристик сигнала, так как от них зависит точность измерения азимута и дальности до целей; а важнейшей проблемой – получение эффективной, и в то же время скоростной обработки. В статье идет речь об алгоритмах борьбы с низкочастотными помехами, их сравнение и выбор оптимального, как со стороны эффективности подавления, так и со стороны скорости обработки информации. Были выбраны три способа подавления низкочастотной помехи: применение линейной фильтрации с помощью режекторного КИХ-фильтра, вычитание тренда в квадратурах, вычитание экспоненты в квадратурах. В статье приведены результаты моделирования в среде MATLAB, оценка результатов моделирования, а также применение исследуемых алгоритмов цифровой обработки сигналов к реальному сигналу, полученного в автомобильном радаре. Был сформирован вывод о наиболее эффективном алгоритме подавления низкочастотной помехи.

**Ключевые слова:** автомобильный радар, антенная решетка, низкочастотная помеха, алгоритм, цифровая обработка сигналов, разностная частота, гомодинный приемник, разрешающая способность, математическая модель, смеситель, фильтр, тренд.

### Введение

Одной из главных тенденций в разработке современных радиолокационных станций (РЛС) является широкое применение цифровой обработки сигналов в реальном времени. Важнейшими параметрами являются скорость обработки, точность оценивания характеристик сигнала, борьба с помехами. От них зависят потенциальная точность измерения дальности, угла, скорости и многие другие важные характеристики.

В радиолокационных системах используется межпериодная обработка сигналов, которая требует высокой скорости обработки. Скорость обработки зависит от таких параметров как: тактовая частота работы цифровых устройств, архитектура вычислительных блоков, структуры печатных плат, структура алгоритмов и т.д. Разработчики аппаратуры всегда стараются максимизировать скорость обработки, так как от нее зависит не только качество работы, но и конкурентоспособность продукта.

Так же важным параметром является помехоустойчивость системы. Мы рассмотрим одну из возможных помех: низкочастотную помеху, вызванную прохождением СВЧ сигнала передатчика в приемный тракт приемника автомобильного радара. Разностная частота после гомодинного преобразования сигналов (прямого переноса на нулевую частоту) составляет доли герца, поэтому амплитудно-частотный спектр такого сигнала имеет вид убывающей экспо-



ненциальной функции. Данная помеха влияет на качество обнаружения целей в ближней зоне и измерение параметров движения и местоположения объектов.

### Моделирование приемного тракта радара

Структура приемного тракта автомобильного радара следующая. Сигнал, принимаемый с антенной решетки, передается в гомодинный приемник BGT24MR2. Далее сигнал оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) ADAR7251. После переноса спектра входного сигнала на нулевую частоту и аналогово-цифрового преобразования реализуется цифровое формирование лучей диаграммы направленности (ДН) на основе FPGACyclone 10.

В модели необходимо реализовать сигнал с разностной частотой. При этом в качестве зондирующего используется сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ):

$$S_{\text{зонд}} = \cos\left(\omega t + \frac{\Delta\omega}{2T_{\text{зонд}}} t^2\right), \quad (1)$$

где  $\omega$  – несущая частота,  $\Delta\omega$  – девиация частоты,  $T_{\text{зонд}}$  – период зондирования,  $t$  – время.

Сигнал на выходе гомодинного приемника можно записать в виде:

$$\begin{aligned} S_{\text{разн}} &= \cos\left(\left(\omega t + \frac{\Delta\omega}{2T_{\text{зонд}}} t^2\right) - \left(\omega(t + \tau_{\text{зад}}) + \frac{\Delta\omega}{2T_{\text{зонд}}}(t + \tau_{\text{зад}})^2\right)\right) \\ &= \cos\left(\omega\tau_{\text{зад}} + \frac{\Delta\omega\tau_{\text{зад}}(t + \tau_{\text{зад}})}{2T_{\text{зонд}}}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{зад}}$  – задержка отраженного сигнала, относительно опорного.

Общая структурная схема системы формирования лучей изображена на рис. 1.

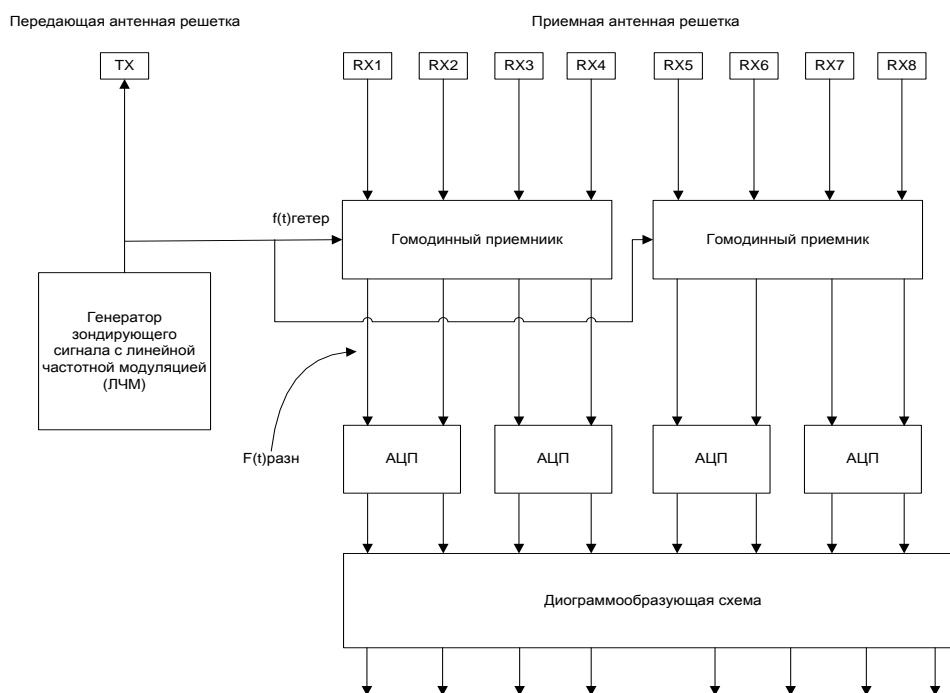


Рисунок 1. Структурная схема системы

Сигнал с частотой гетеродина обозначен как  $f(t)_{\text{гетер}}$ , а с разностной частотой  $F(t)_{\text{разн.}}$ .

### Способы подавления низкочастотной помехи

Как говорилось ранее, помеха представляет собой медленный колебательный процесс. Осциллограмма  $U(t)$  и нормированный спектр  $S_{\text{н}}(f)$  сигнала с этой помехой показаны на рис. 2-3.

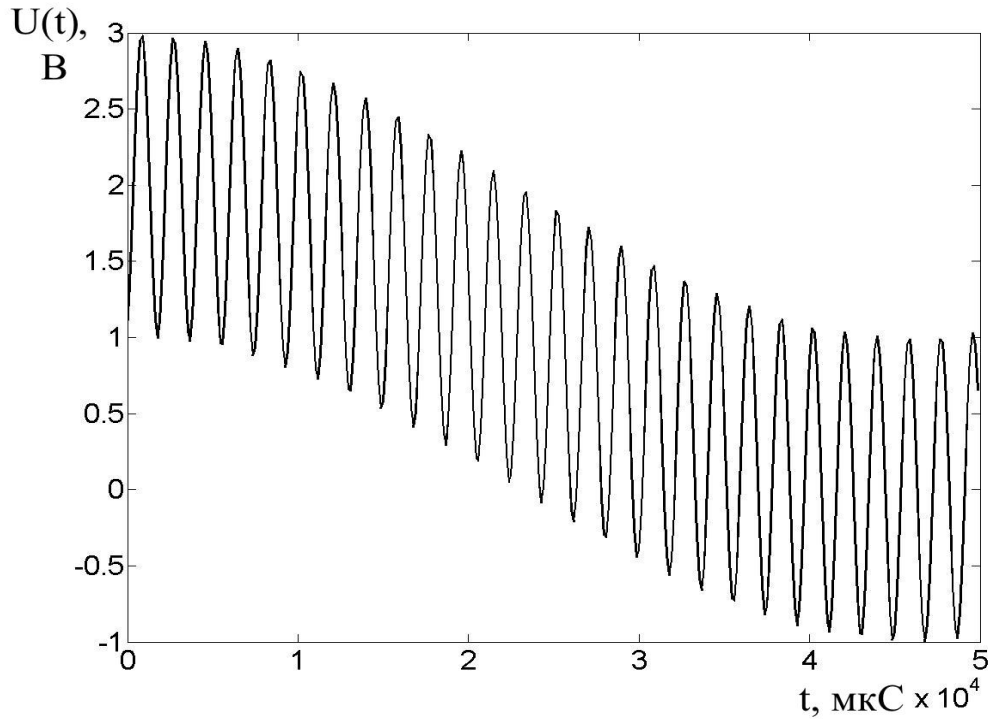


Рисунок 2. Осциллограмма сигнала с помехой

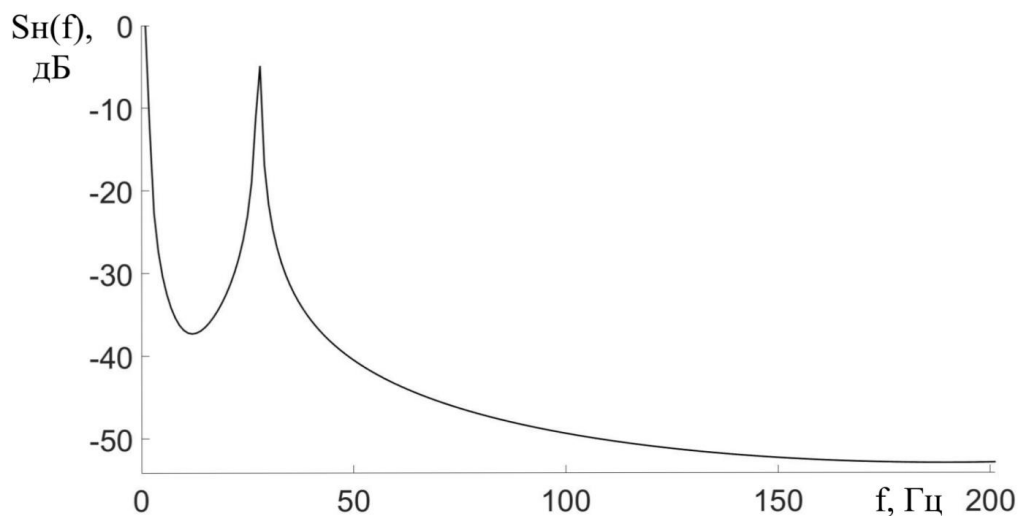


Рисунок 3. Спектр сигнала с помехой

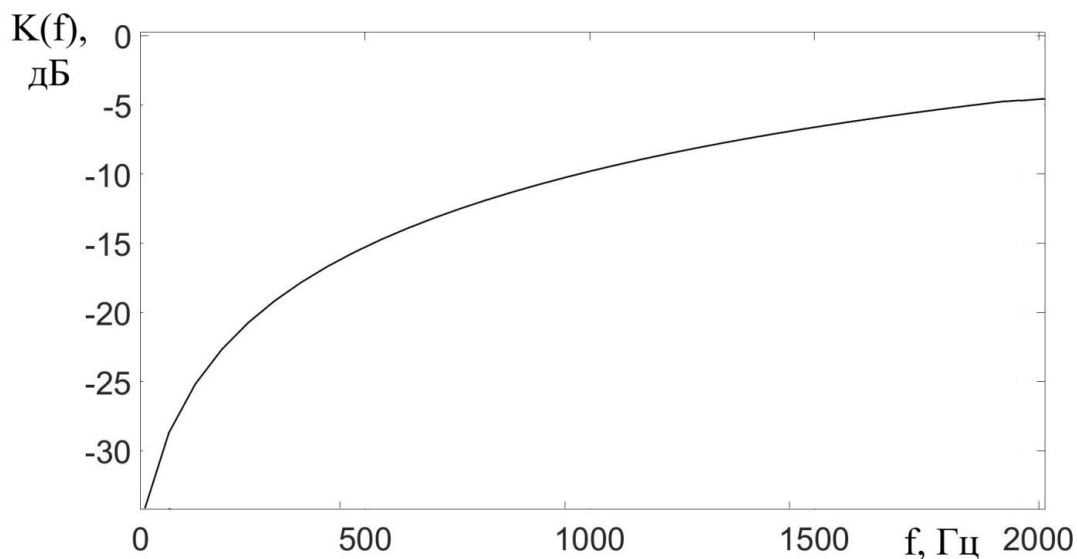
Из-за присутствия низкочастотной помехи могут возникать дополнительные ошибки при изменении угла. Это обусловлено тем, что наличие медленно меняющейся по сравнению с частотой полезного сигнала составляющей приводит к ошибкам при вычислении разности фаз в каналах, а, следовательно, к искажению формы и смещению лучей ДН, что, в конечном итоге, приводит к ошибкам при измерении угла.

Для подавления такой помехи будем рассматривать несколько способов:

- 1) линейная фильтрация с помощью режекторного ких-фильтра;
- 2) вычитание тренда в квадратурах;
- 3) вычитание экспоненты в квадратурах.

Для моделирования использовалась среда MATLAB.

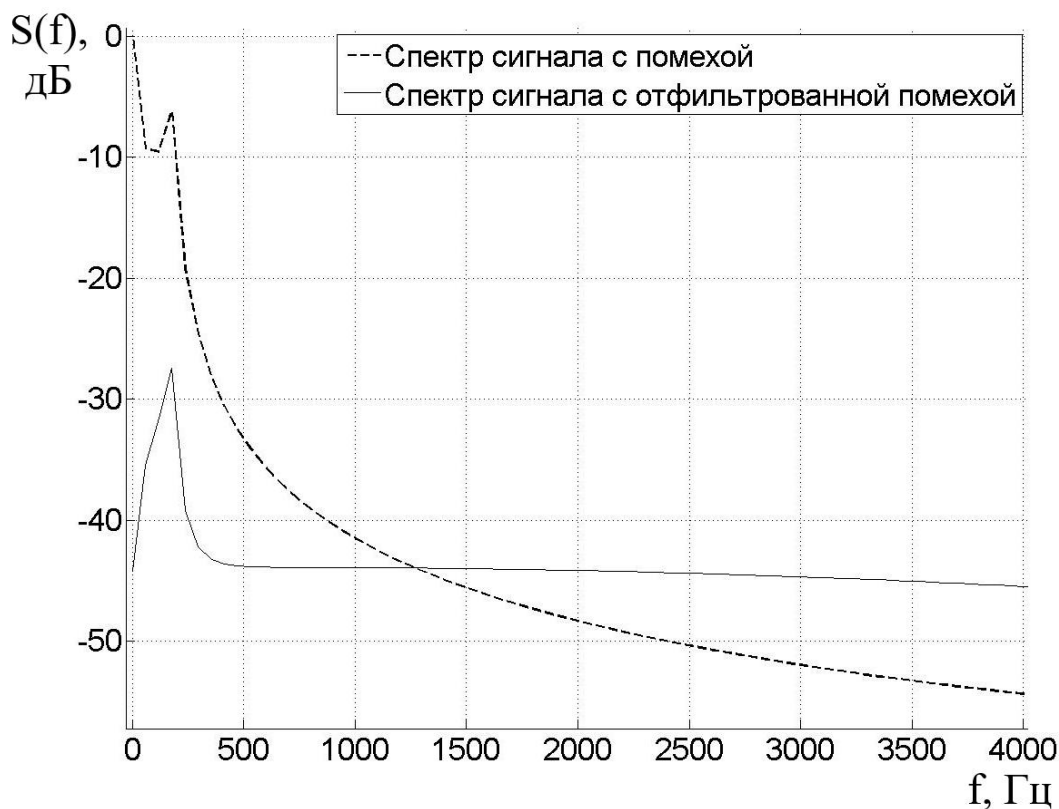
Первый способ достаточно прост в реализации. Был спроектирован линейный КИХ-фильтр, амплитудно-частотная характеристика которого изображена на рис. 4. Выбор такого типа фильтра обусловлен простотой реализации и достаточностью характеристик. На нулевой частоте АЧХ такого фильтра равна нулю. Импульсная характеристика фильтра содержит три отчета: 0,5; 0; -0,5. Важным параметром является крутизна переходной полосы фильтра в низкочастотной области.



**Рисунок 4. АЧХ режекторного фильтра**

У фильтра есть существенный минус: на низких частотах, близких к частоте среза, присутствует сильное затухание, которое зависит от порядка фильтра, а так как проблемы с подавлением помехи появляются в ближней зоне, то спектр сигнала тоже будет находиться в низкочастотной области (рис. 3). Применение данного типа фильтрации помехи приведет к уменьшению амплитуды полезного сигнала, и, как следствие, к затруднению или даже невозможности обнаружения полезного сигнала на фоне шумов.

Применим данный способ борьбы с помехой на смоделированном ранее сигнале. Нормированный амплитудно-частотный спектр можно наблюдать на рис. 5.



**Рисунок 5. Амплитудно-частотный спектр сигнала**

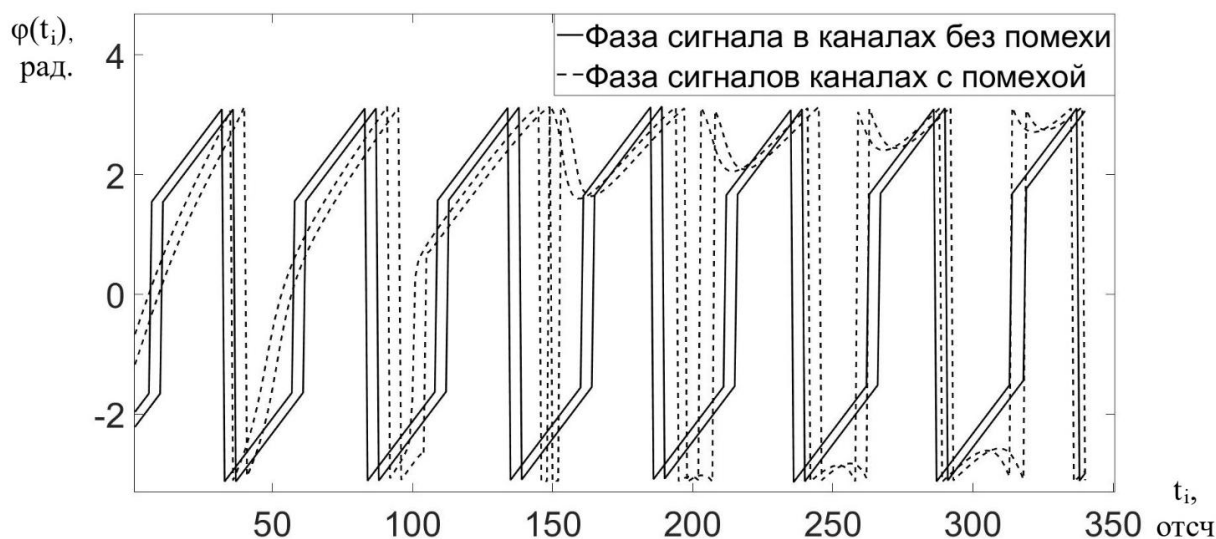
Из рис. 5 видно, что низкочастотная помеха отфильтровывается, но при этом уровень полезного сигнала сильно падает. Это проявление особенности АЧХ фильтра: так как частота полезного сигнала мала, его гармоника попадает в переходную полосу фильтра, и тем самым теряет в амплитуде около 20 дБ, что в результате может привести к пропуску цели при пороговом анализе.

Помеха имеет комплексный характер, так как в приемнике она подмешивается к квадратурам. Следовательно, она будет влиять и на фазовую характеристику сигнала, что приведет к ошибкам измерения угла.

Рассматриваемая модель подразумевает эквидистантную антенную решетку, то есть между соседними элементами решетки всегда фиксированный фазовый набег  $\varphi_{н.ф.}$ . Это учитывается при разработке алгоритмов формирования луча, а именно расчета весовых коэффициентов. Помеха же добавляет фазовую ошибку  $\varphi_{ош.}$ , искажая фазу в канале  $\varphi_i$ , что впоследствии приведет к неверной оценке угла цели (3).

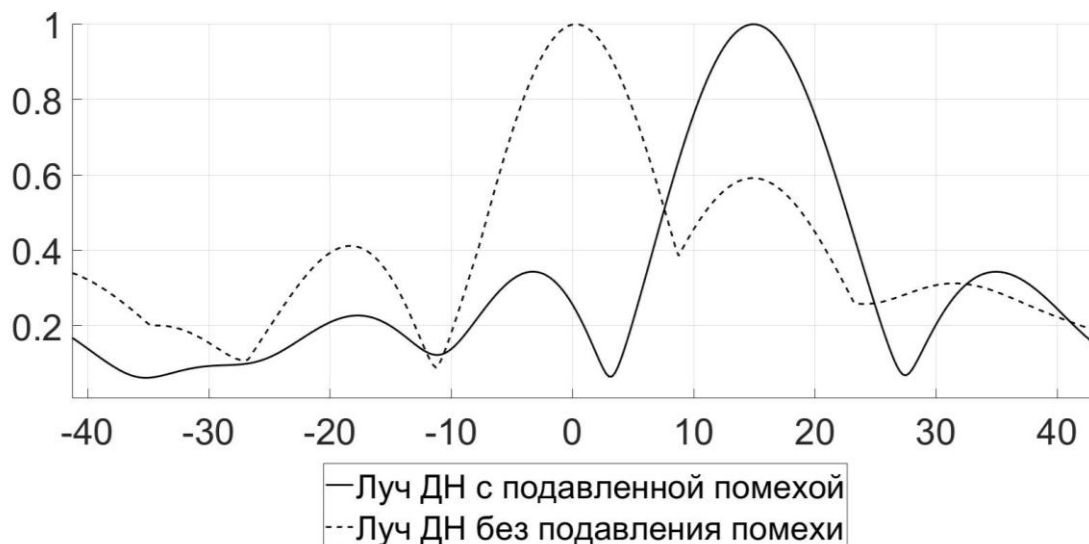
$$\varphi_i = \varphi_{н.ф.} + \varphi_{ош.} \quad (3)$$

Рассмотрим зависимость фазы от времени  $\varphi(t_i)$ , где  $t_i$  – выборки по времени (рис. 6). Из рисунка видно, что при отсутствии помехи разность фаз между каналами постоянна, а когда к сигналу добавили помеху к фазовой характеристике, добавилась ошибка, которая имеет нелинейный характер во времени, что привело не только к дополнительному фазовому сдвигу, но и исказилась форма характеристики.



**Рисунок 6. Зависимость фазы в каналах от времени**

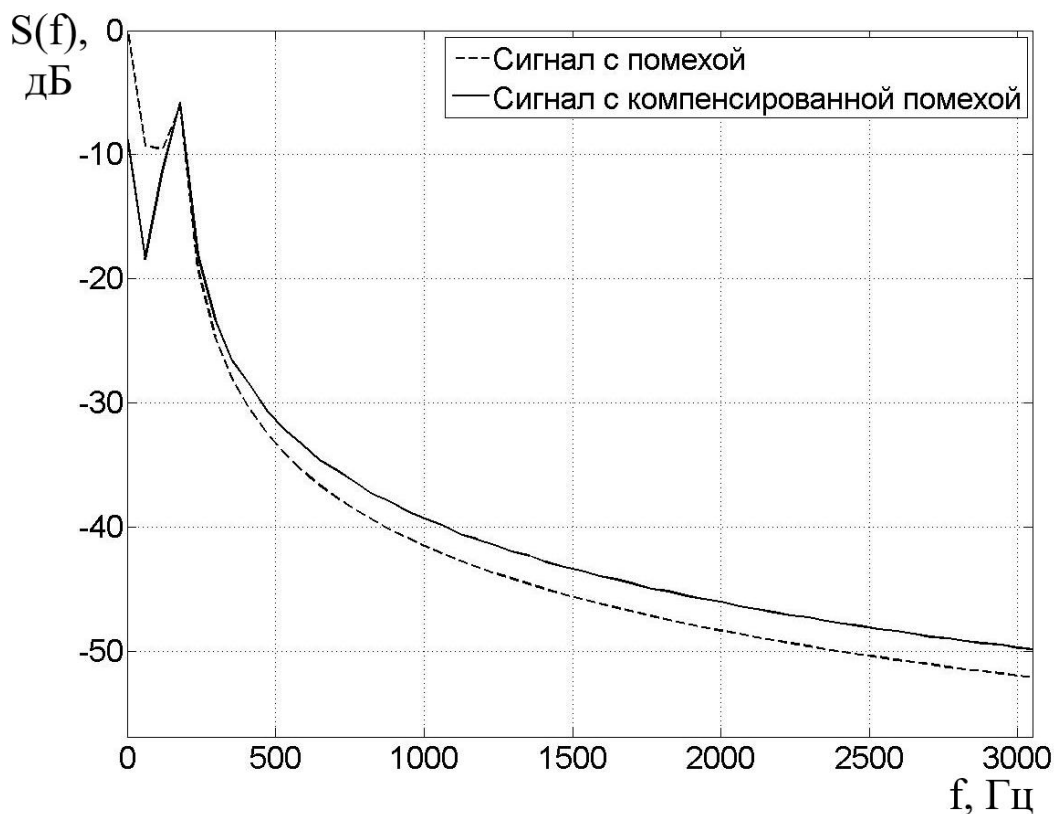
Естественно, после таких фазовых искажений лучи на ДН будут формироваться с искажениями (рис.7).



**Рисунок 7. Лучи ДН при сигнале с подавленной помехой и без**

Из рис.7 видно, что после режекции помехи фильтром луч ДН формируется в верном направлении, и угловая ошибка отсутствует, что нельзя сказать о луче ДН без фильтрации сигнала: в верном направлении присутствует только луч, который по амплитуде намного меньше интерференционного луча в направлении  $0^\circ$ .

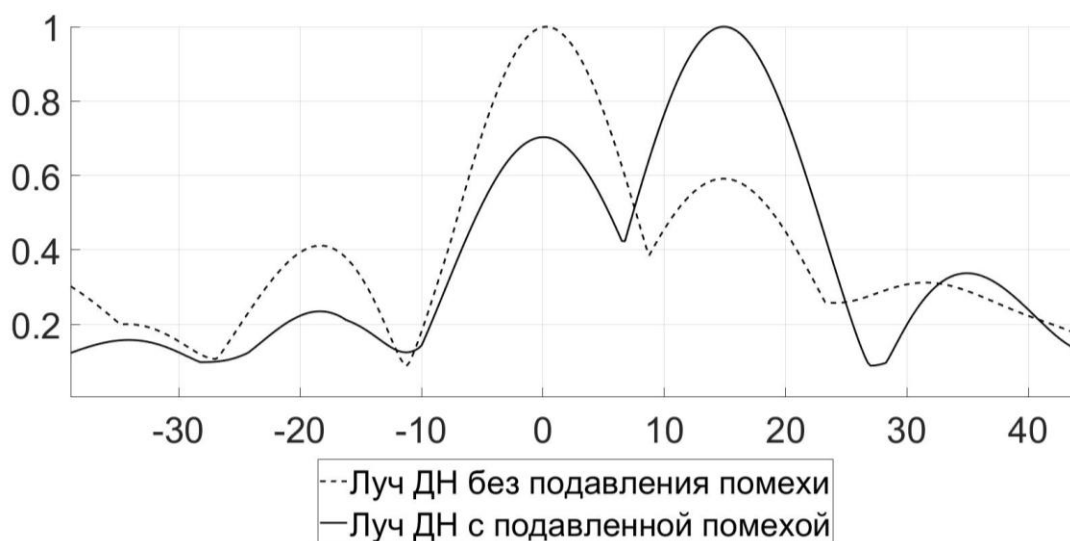
Применим следующий способ: вычитание тренда в квадратурах. Тренд, в данном случае, – это основная тенденция изменения сигнала в рамках выборки. Метод заключается в следующем: сперва вычисляется тренд методом полиномиальной аппроксимации, затем полученная функция вычитается из исходного сигнала во времени. Тем самым мы получаем сигнал, спектр которого изображен на рис. 8.



**Рисунок 8. Нормированный амплитудный спектр сигнала с вычитанием тренда и без**

Из спектра видно, что помеха была подавлена, но не полностью. Это связано с тем, что вычитание тренда сигнала не дает полного подавления помехи, но при этом, по сравнению с режекторным фильтром, но при этом амплитуда гармоники полезного сигнала сохраняется, что очень важно для обнаружения сигнала на фоне помех.

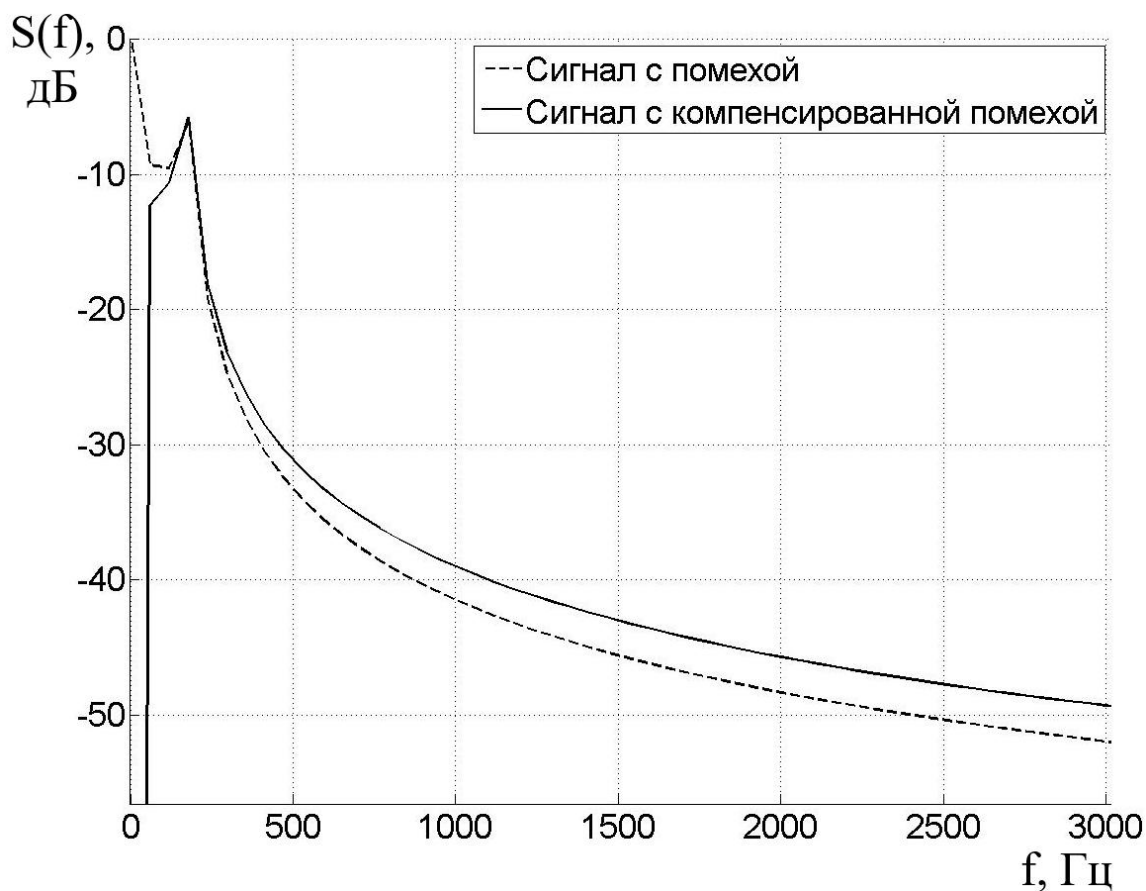
На рис. 9 показан результат весовой обработки и формирования луча сигналов с подавленной помехой и нет.



**Рисунок 9. Лучи ДН при сигнале с подавленной помехой и без**

Как видно из диаграммы, главный лепесток ДН при сигнале с подавленной помехой находится на верном угле, но при этом побочный интерференционный луч имеет большой уровень по сравнению с главным. Это связано с неполной компенсацией помехи при вычитании тренда, что является недостатком данного метода.

И последний из рассматриваемых методов – это метод компенсации экспоненты. Он заключается в следующем. Выборка сигнала разбивается на блоки, в которых определяется максимум сигнала и минимум сигнала и это значение усредняется. Затем, аппроксимируя по полученным точкам, получаем сигнал экспоненциальной формы, который вычитаем из исходного сигнала с помехой, тем самым подавляя последнюю. На рис. 10 показан амплитудно-частотный спектр сигнала, обработанного по данному алгоритму и нет.



**Рис.10.** Амплитудно-частотный спектр сигнала без помехи и с подавленной помехой

Как видно, помеха эффективно подавляется, и, самое главное, этот способ не имеет недостатков предыдущих, а именно амплитуда полезного сигнала остается прежней (в отличие от первого способа), и низкочастотная помеха подавляется более эффективно (по сравнению со вторым способом).

Результат пространственной обработки (рис. 11) лучше по сравнению со вторым способом. Это связано с большей эффективностью подавления помехи, что уменьшит вероятность потенциальной ошибки измерения угла.

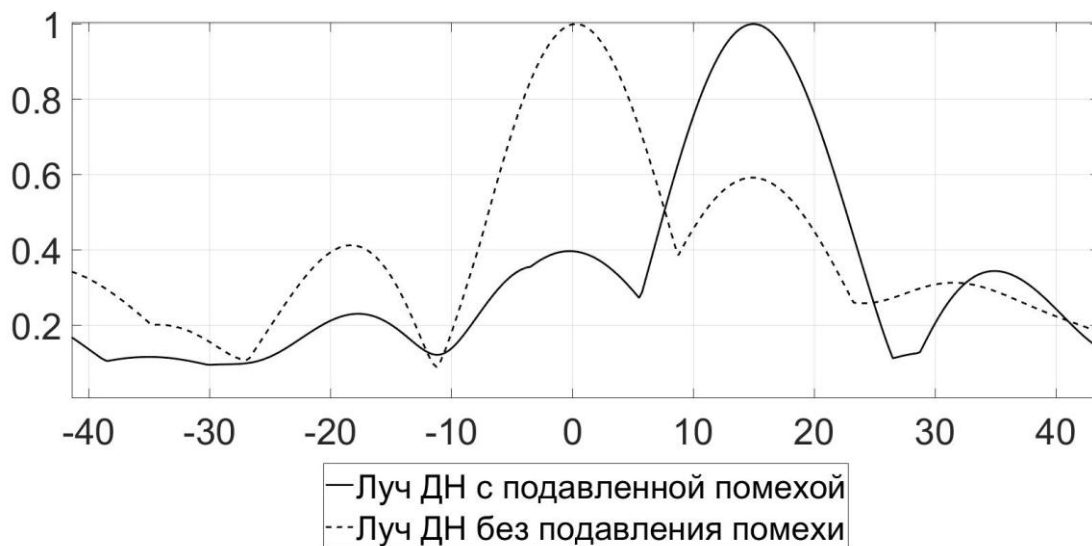


Рис. 11. Лучи ДН при сигнале с подавленной помехой и без

### Применение полученных алгоритмов подавления помехи к реальному сигналу

Спектр реального сигнала  $\square(t_i)$  представлен на рис.12. Он был снят с выхода смесителя автомобильного радара.

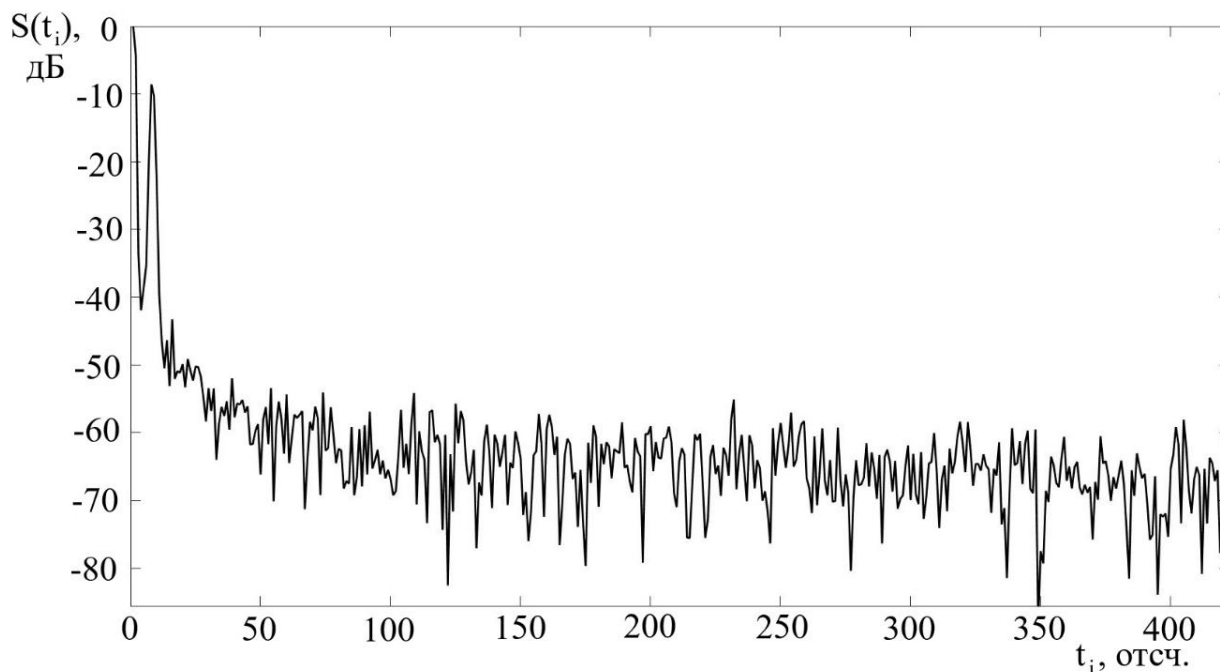


Рисунок 12. Спектр реального сигнала с помехой

Применим все полученные алгоритмы на реальном сигнале. Результаты изображены на рис.13.



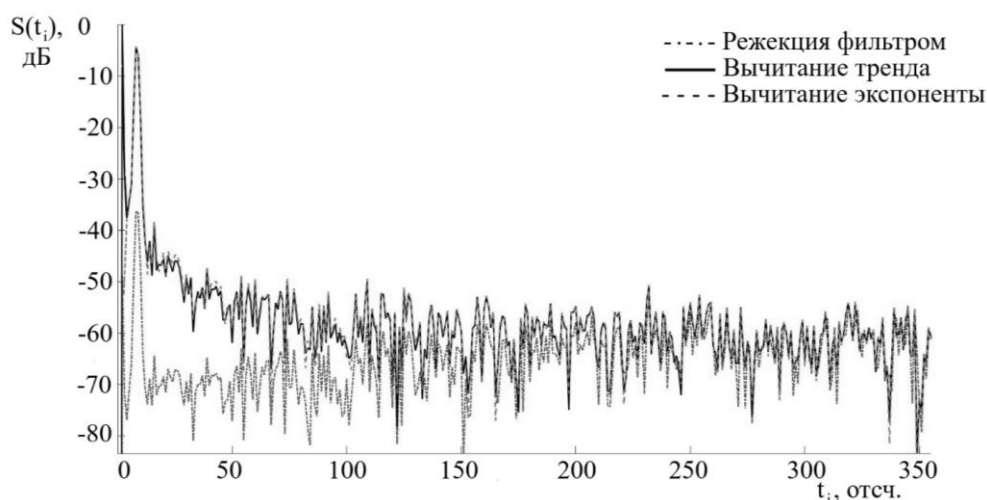


Рисунок 13. Спектры сигналов после обработки

### Заключение

В результате исследования было выяснено, что наиболее выгодный способ подавления низкочастотной помехи – это компенсация экспоненты. Он обеспечивает наиболее эффективное подавление, чем подавление тренда, и при этом не создает затухания в полосе сигнала. С точки зрения потребления вычислительных ресурсов эти методы экономичны и не вызывают проблем при межпериодной обработке сигналов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-37-20383.*

**I.K. Malyshevskiy, A.A. Kuzin, A.V. Myakinkov**

### ALGORITHMS FOR SUPPRESSING LOW-FREQUENCY INTERFERENCE IN AUTOMOTIVE RADAR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to research the effectiveness of digital signal processing algorithms for suppressing low-frequency interference in automotive radar. Selection of the most effective algorithms for high processing speed and interference suppression efficiency.

**Design/methodology/approach:** The methodology consists in testing three digital signal processing algorithms: linear filtering using a cutting FIR filter, subtracting the trend in quadrature, subtracting the exponent in quadrature, analyzing the results, and choosing the most effective algorithm.

**Findings:** Research limitations/implications: As a result of modeling the given situation, the pros and cons of each algorithm were identified. Based on the data obtained, the most appropriate algorithm was selected.

**Originality/value:** The implementation of the algorithms created during the study can improve the characteristics of the car radar in the near zone.

**Key words:** car radar, antenna array, low-frequency interference, algorithm, digital signal processing, difference frequency, homodyne receiver, resolution, mathematical model, mixer, filter, trend.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассмотрены способы получения радиолокационного изображения высокого разрешения автомобильным радаром.

**Ключевые слова:** автомобильный радар, синтез апертуры, радиовидение, автофокусировка.

### Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие различных активных систем безопасности автотранспорта (систем интеллектуальной помощи водителю), основной задачей которых является радикальное снижение вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий за счёт снижения влияния человеческого фактора. Успех внедрения таких систем прежде всего зависит от качества сбора информации об обстановке вокруг автомобиля, а так же быстрое принятие исключительно верных мер по уходу от столкновений. Наивысшей точкой развития активных систем безопасности является возможность обеспечения движения автомобиля без участия человека.

Наиболее предпочтительным способом сбора информации об обстановке на дороге является применение миллиметровых радаров, так как их работоспособность не зависит от погодных условий. При этом для реализации полноценного беспилотного автомобиля требуется получение высококачественного радиоизображения местности, которое позволит точно оценивать форму и габариты любых возможных препятствий и положение транспортного средства относительно них. В данной статье рассмотрены различные методы получения высококачественного радиоизображения в контексте их применения в автомобильном радаре.

### Способы улучшения качества радиоизображения

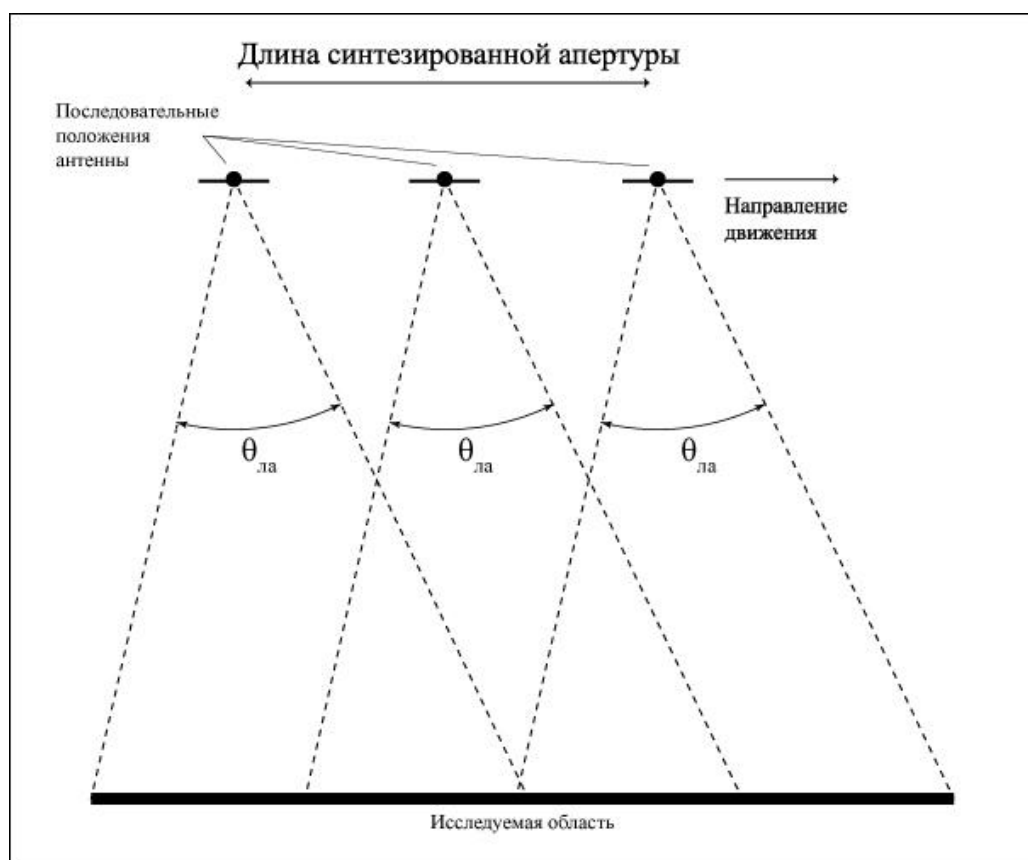
Качество получаемого радиоизображения зависит, прежде всего, от разрешающей способности радара по дальности и по угловым координатам. Разрешающая способность по дальности обеспечивается за счёт большой ширины спектра зондирующего сигнала на частотах миллиметрового диапазона (76 – 81 ГГц) [1]. Разрешающая способность по угловым координатам  $\delta\theta$  зависит от отношения размера антенной решётки  $d$  к длине волны излучаемого сигнала  $\lambda$ :

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

При этом линейное разрешение  $\delta l$  на дальности  $R$  будет  $\delta l = R\delta\theta = \lambda R/d$  [2]. Для решения поставленной задачи требуется иметь линейное разрешение как минимум несколько сантиметров на дальности 10 м. Используя приведённые выше отношения, получим, что при длине волны  $\lambda = 3,8$  мм, ширина антенной решётки  $d$  должна составлять порядка нескольких мет-

ров, что сопоставимо с габаритами автомобиля. Использование антенной решётки таких размеров не представляется возможным, так как на указанных частотах когерентная обработка сигналов, принятых излучателями, расположенными друг от друга на расстоянии, сравнимом с габаритами автомобиля технически не реализуема.

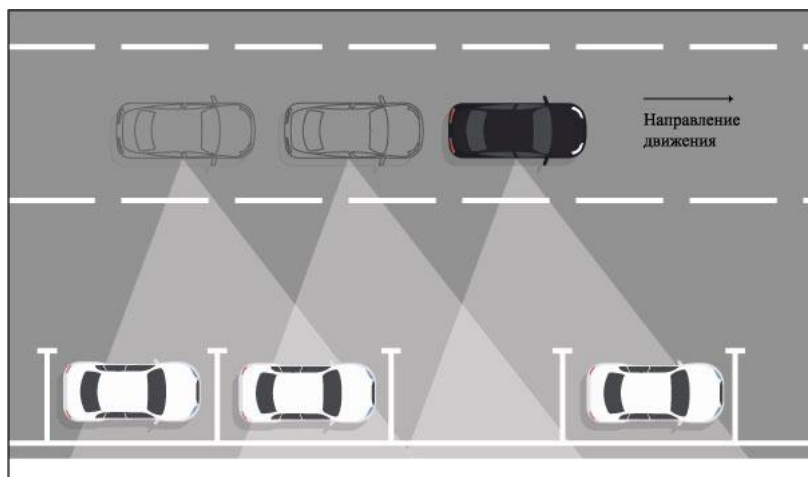
Решением проблемы углового разрешения может стать синтез апертуры [2], [3]. Алгоритмы синтеза апертуры позволяют искусственно увеличить ширину раскрыва антенны за счёт её перемещения относительно некоторого изучаемого объекта (рис.1). На рисунке  $\theta_{ла}$  – ширина луча, образованного реальной апертурой антенной решётки. При когерентной обработке сигналов, принятых из разных положений антенны, ширина луча уменьшится пропорционально отношению длины реальной апертуры к расстоянию между крайними положениями ФАР, сигналы с которых обрабатываются когерентно.



**Рисунок 1. Принцип синтеза апертуры**

Так, при перемещении автомобиля, антенна сканирует пространство слева и справа. Полученные в разные моменты времени данные обрабатываются когерентно, получая эффект антенной решётки с большой апертурой. Такое решение позволит оценивать окружающую обстановку по бортам автомобиля. Помимо информации о подвижных объектах, таких как другие автотранспортные средства, боковое сканирование позволит получать изображения неподвижных объектов, что расширяет возможность использования автомобильного радара (рис. 2).

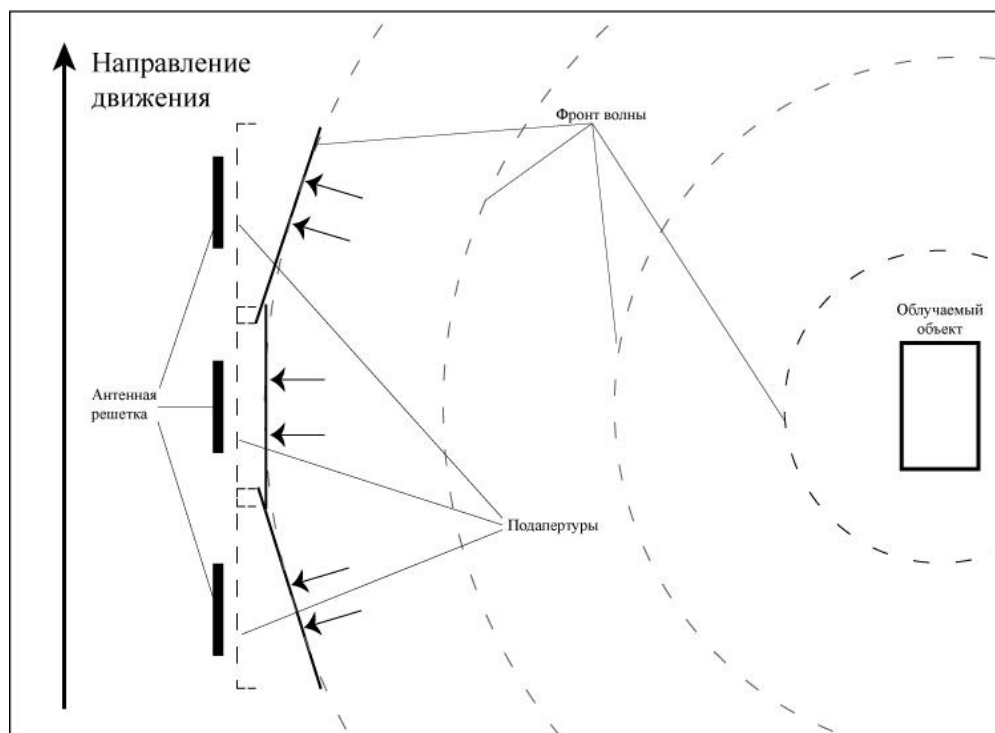
Так, изображения разного рода сооружений, края проезжей части могут использоваться для формирования карты маршрута, обеспечивая тем самым более точную навигацию при движении без непосредственного участия водителя. Также боковое сканирование позволит обнаруживать свободные места для парковки [4].



**Рисунок 2. Синтез апертуры при сканировании бокового пространства**

### **Алгоритмы автофокусировки**

При увеличении апертуры многие объекты оказываются в ближней зоне обнаружения, что не позволяет пренебрегать сферичностью фронта волны (рис. 3). Существуют особые алгоритмы автофокусировки, с помощью которых удаётся компенсировать нелинейность набега фазы. Следует сразу исключить алгоритмы автофокусировки, принцип работы которых предполагает наличие мощного источника сигнала от точечного отражателя вблизи изучаемого объекта (т.н. ориентира). Таким образом, имеем для сравнения два варианта алгоритмов автофокусировки: алгоритм автофокусировки радиолокационного изображения на основе оценки средней доплеровской частоты и фазоразностный алгоритм автофокусировки [2].



**Рисунок 3. Приём сигнала, отражённого от объекта в ближней зоне**

Оба рассматриваемых алгоритма предполагают разделение синтезированной апертуры на несколько подапертур, то есть участков апертуры, в пределах которых фронт волны можно считать плоским. При этом количество подапертур влияет на степень компенсируемой фазовой ошибки. Обработка двух подапертур даёт компенсацию квадратичной ошибки, три подапертуры позволяют компенсировать кубические ошибки и т.д. Функцию фазовой ошибки можно представить в виде полинома  $N$ -ой степени:

$$\Psi(t) = \sum_{k=2}^N c_k t^k, \quad -\frac{T_c}{2} \leq t \leq \frac{T_c}{2}, \quad (2)$$

где  $N$  – число подапертур,  $c_k$  – коэффициенты разложения фазовой ошибки,  $T_c$  – время синтеза апертуры. Основной задачей алгоритмов автофокусировки является нахождение неизвестных коэффициентов  $c_k$ .

Алгоритм автофокусировки радиолокационного изображения на основе оценки средней доплеровской частоты предполагает нахождение корреляционной функции радиолокационных изображений, сформированных каждой подапертурой, с последующим её усреднением по всем каналам дальности. После этого проводится поиск максимума усреднённой функции и, соответственно, нахождение неизвестных коэффициентов.

Фазоразностный алгоритм автофокусировки предполагает перемножение сигналов подапертур, с предварительным комплексным сопряжением одного из них. Тем самым формируется корреляционная функция комплексных изображений. К полученной функции применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Дальнейшие преобразования, а именно: усреднение по всем каналам дальности, поиском максимумов усреднённой функции и нахождение коэффициентов разложения фазовой ошибки – аналогичны алгоритму автофокусировки радиолокационного изображения на основе оценки средней доплеровской частоты.

Оба алгоритма реализуют пространственно-инвариантную фокусировку. Кроме того, при появлении в зоне обзора мощного точечного отражателя, работа алгоритмов не нарушается. Оба алгоритма дают схожие результаты, однако фазоразностный алгоритм требует меньших вычислительных ресурсов.

### **Формирование радиоизображения в переднем секторе обзора**

Синтез апертуры совместно с алгоритмом автофокусировки позволяет получить высококачественное радиоизображение в боковых секторах обзора автомобиля. Однако эффективная ширина апертуры уменьшается пропорционально уменьшению угла между направлением сканирования пространства и вектором перемещения антенны [5].

$$L_{\text{эфф}}(\theta) = L \sin \theta, \quad (3)$$

где  $L$  – ширина синтезированной апертуры,  $\theta$  – угол между направлением сканирования и вектором перемещения антенны. Разрешение по угловым координатам при этом так же пропорционально ухудшается. Поэтому использование описанного метода для оценки обстановки в переднем секторе обзора без принятия дополнительных мер оказывается неэффективно.

Принимая во внимание (3), можем заметить, что малую эффективную ширину апертуры антенны  $L_{\text{эфф}}(\theta)$  на малых углах  $\theta$  можно компенсировать использованием более длинной

синтезированной апертуры  $L$ , полученной при более длительном сканировании при той же скорости движения.

Другим решением может стать метод, описанный в [5]. Он основывается на применении алгоритмов обратных проекций. Данный метод требует использования значительных вычислительных мощностей. Однако в [5] предложены модифицированные варианты алгоритмов обратных проекций со значительно меньшей вычислительной сложностью. Данный метод не только уменьшает ширину сканирующего луча, но и существенно увеличивает коэффициент усиления антенной решётки за счёт уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности.

### Заключение

В статье были рассмотрены алгоритмы, позволяющие улучшить угловое разрешение автомобильного радара. Применение этих алгоритмов теоретически даёт возможность получения высококачественного радиоизображения окружающего транспортного средства пространства, избегая при этом сложных технических решений по части конструкции и расположения антенн. Действительная эффективность описанных методов подлежит проверке с помощью компьютерного моделирования, что является предметом дальнейшего исследования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-37-20383.*

### Библиографический список

1. **Oberhammer, J., Somjit N., Shah U., Baghchehsaraei Z.** RF MEMS for automotive radar/ J. Oberhammer, N. Somjit, U. Shah, Z. Baghchehsaraei// Handbook of Mems for Wireless and Mobile Applications.– 2013. – P. 518-549.
2. **Кондратенков, Г.С.** Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли. / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
3. **Parker, M.** Space Time Adaptive Processing (STAP) Radar/ M. Parker // Digital Signal Processing 101 (Second Edition).– 2017. – P. 277-286.
4. **Wu H., Zwick T.** Automotive SAR for Parking Lot Detection/ H. Wu, T. Zwick// German Microwave Conference. – 2009.
5. **Gishkori, S., Daniel L., Gashinova M., Mulgrew B.** Imaging for a Forward Scanning Automotive Synthetic Aperture Radar/ S. Gishkori, L. Daniel, M. Gashinova, B. Mulgrew// IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.– 2018.

**A. D. Mikhailov, A. V. Myakinkov**

### Analysis of the methods of radar image forming for automotive radar

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Methods of obtaining a high-resolution radar image by an automotive radar are considered.

**Key words:** automotive radar, aperture synthesis, radio imaging, autofocus.

А.В. Пилькевич, В. Д. Садков

## ПЛЕНОЧНЫЕ ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АТТЕНЮАТОРОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МОЩНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Предложены топологии поглощающих элементов для волноводных, коаксиальных и плосковых аттенюаторов, обеспечивающие снижение в среднем в 1,8-2 раза максимальных значений градиента потенциала и в 20-80 раз максимальной плотности мощности по сравнению с типовыми топологиями путем введения вблизи входного и выходного контактов резистивного слоя с повышенным удельным сопротивлением. Приведены графики, показывающие выигрыш в величине градиента потенциала и плотности мощности в зависимости от соотношений размеров и удельных поверхностных сопротивлений резистивных плёнок в поглощающем элементе.

**Ключевые слова:** резистивные пленочные поглощающие элементы, фиксированные аттенюаторы.

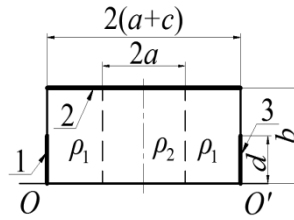
Широкополосные фиксированные аттенюаторы с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах [1-5]. ПЭ таких аттенюаторов выполняются, как правило, на основе распределенных резистивных структур, отличающихся от ПЭ с дискретными пленочными резисторами (по П- или Т- схемам) повышенной широкополосностью, малой чувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, разбросу технологических параметров, большей надежностью и устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям [6-11].

Для реализации требуемого диапазона ослаблений используются ПЭ прямоугольной (большие и средние ослабления) и Т-образной топологии (средние и малые ослабления) [12, 13]. Расширение диапазона ослаблений в ПЭ малых габаритов достигается введением дополнительной резистивной плёнки между входным и выходным контактами [14, 15].

Исследования показывают, что распределение плотности тока и рассеиваемой мощности по поверхности всех перечисленных ПЭ сильно неоднородно. Это приводит к снижению уровня допустимой мощности, ухудшению температурной и временной стабильности, надежности аттенюаторов

Цель работы – предложить топологии ПЭ с существенно меньшими значениями градиентов потенциалов и плотностей мощности в резистивной пленке (за счёт введения вблизи входного и выходного контактов резистивного слоя с повышенным удельным сопротивлением), оценить величину этого снижения и получить соотношения для расчета.

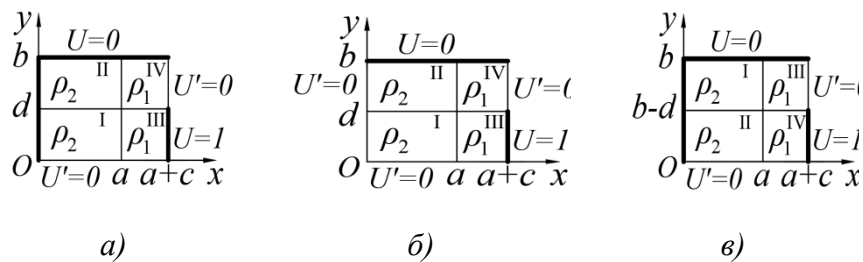
Предлагаемая топология ПЭ показана на рис. 1.



**Рисунок 1.** ПЭ с резистивным слоем  $\rho_1$  повышенного удельного сопротивления: 1, 3 – входной, выходной контакты; 2 – заземленный контакт

На практике чаще используют симметричные относительно линии  $OO'$  ПЭ, отличающиеся от несимметричного ПЭ рис. 1 в два раза большими значениями удельных поверхностных сопротивлений резистивных пленок при одинаковом ослаблении.

Задачу анализа ПЭ рис. 1 (определения параметров его П-образной схемы замещения) решаем методом разделения переменных. Для режима асимметричного и симметричного возбуждения (потенциалы на входном и выходном контакте равны соответственно -1, 1 и 1, 1) получаем структуры рис. 2, а и рис. 2, б. Последняя инверсией граничных условий приводится к структуре рис. 2, в, аналогичной структуре рис. 2, а.



**Рисунок 2.** Структуры режима асимметричного и симметричного возбуждения

Для структуры рис. 2, а записываем краевую задачу

$$\frac{d^2 U_i}{dx^2} + \frac{d^2 U_i}{dy^2} = 0, \quad i = I, II, III, IV$$

с граничными условиями

$$U_I(x, d) = U_{II}(x, d), \quad U_I(a-c, y) = U_{III}(a-c, y), \quad U_{III}(x, d) = U_{IV}(x, d), \quad U_{II}(a-c, y) = U_{IV}(a-c, y), \quad (1)$$

$$\text{при } y = d \quad \frac{dU_I}{dy} = \frac{dU_{II}}{dy} \quad \text{и} \quad \frac{dU_{III}}{dy} = \frac{dU_{IV}}{dy}, \quad (2)$$

$$\text{при } x = a-c \quad \omega \frac{dU_I}{dx} = \frac{dU_{III}}{dx} \quad \text{и} \quad \omega \frac{dU_{II}}{dx} = \frac{dU_{IV}}{dx}, \quad \omega = \rho_1 / \rho_2. \quad (3)$$

Для потенциалов в областях I-IV получаем

$$U_I = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi}{a-c} x \cdot \operatorname{ch} \frac{n\pi}{a-c} y + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin \frac{(2n+1)\pi}{a-c} x \cdot \operatorname{ch} \frac{(2n+1)\pi}{a-c} y,$$

$$U_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi}{a-c} x \cdot \operatorname{sh} \frac{n\pi}{a-c} (b-y) + \sum_{n=0}^{\infty} D_n \sin \frac{(2n+1)\pi}{a-c} x \cdot \operatorname{sh} \frac{(2n+1)\pi}{a-c} (b-y),$$

$$U_{III} = 1 + \frac{x-a}{c} + \sum_{n=0}^{\infty} E_n \sin \frac{(2n+1)\pi}{c} (a-x) \cdot \operatorname{ch} \frac{(2n+1)\pi}{c} y,$$



$$U_{IV} = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \sin \frac{(2n+1)\pi}{c} (x-a+c) \cdot ch \frac{(2n+1)\pi}{c} (b-y) + \sum_{n=0}^{\infty} G_n \sin \frac{n\pi}{c} (x-a+c) \cdot ch \frac{n\pi}{c} (b-y).$$

Для определения коэффициентов  $A_n - G_n$  используем граничные условия (1) – (3) и ортогональность тригонометрических функций. Полученные системы уравнений в соответствии с теоремой Гильберта имеют единственное решение, для отыскания которого применим метод редукции.

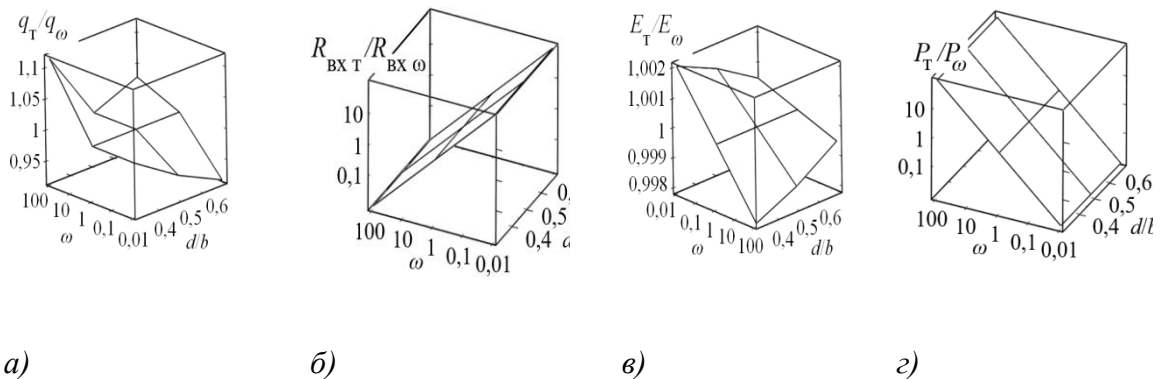
Проводимости  $Y_1, Y_{инв}$  и  $Y_2$  структур рис. 2,а, в и б численно равны величине тока, протекающего через контакт при  $x=a$ :

$$Y_1 = \frac{1}{\rho_1} \int_0^d \frac{dU_{III}}{dx} dy, \quad Y_{инв} = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{b-d} \frac{dU_{IV}}{dx} dy = \frac{1}{\rho_1} \Delta, \quad Y_2 = \frac{1}{\rho_1} \Delta.$$

Матрицу  $Y$  – параметров ПЭ, симметричного относительно линии  $OO'$ , находим, используя теорему бисекции:

$$[Y] = 2 \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix}.$$

Тогда для входного сопротивления и ослабления согласованного симметричного ПЭ получаем:  $R_{вх} = 0,5 / \sqrt{Y_1 Y_2}$ ,  $q = 10 \lg(1 + Y_2 / Y_1 + 2\sqrt{Y_2 / Y_1}) / (1 + Y_2 / Y_1 - 2\sqrt{Y_2 / Y_1})$ .



**Рисунок 3. Зависимости ослабления (а), входного сопротивления (б), максимального значения градиента потенциала (в) и мощности тепловыделения (з) однородного ПЭ рис. 1, нормированных к соответствующим параметрам неоднородного ПЭ при  $a/c = 0,1$  от  $d/b$  и  $\omega$  при  $b/a = 5$**

Результаты расчетов (рис. 3) позволяют сравнить параметры однородного ( $\omega = 1$ ,  $q_T, R_{вх T}$ ) и неоднородного ( $\omega \neq 1$ ,  $q_\omega, R_{вх \omega}$ ) ПЭ рис. 1. Отношение  $q_T/q_\omega$  при изменении  $\omega$  и  $a/c$  в интервале  $0,01 \div 100$  и  $0,1 \div 0,4$  изменяется в пределах  $\pm 15\%$ , а изменение отношения максимальных градиентов потенциала  $E_T/E_\omega$  не превышает  $\pm 0,5\%$ . Отношение  $R_{вх T}/R_{вх \omega}$  и плотности мощности тепловыделения  $P_T/P_\omega$  линейно зависят от степени неоднородности  $\omega$ . При этом  $R_{вх T}/R_{вх \omega}$  уменьшается в 100 раз с ростом  $\omega$  и увеличивается в 100 раз с его уменьшением.  $P_T/P_\omega$  уведет себя ровно наоборот. Результаты при других  $b/a$  аналогичны.

Таким образом, снижение плотности мощности на входе ПЭ достигается при  $\omega > 1$ .

Для снижения величин  $E$  и  $P$  на входе ПЭ не менее чем в 1,8 раза используем топологию со скругленным профилем на входе и выходе ПЭ (рис. 4) [16].

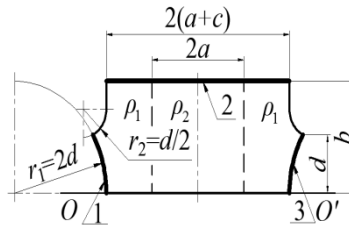


Рисунок 4. ПЭ со скругленным профилем входных контактов

Результаты моделирования в программном комплексе *Elcut* [17] приведены на рис. 5.

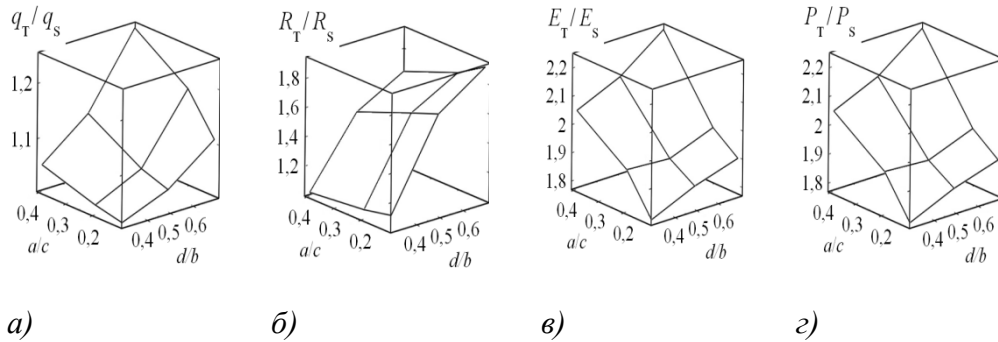


Рисунок 5. Зависимость отношения ослабления (а), входного сопротивления (б), максимального значения градиента потенциала (в) и мощности тепловыделения (з) ПЭ прямоугольной конфигурации рис. 1 к соответствующим параметрам ПЭ скругленной конфигурации рис. 4 от  $a/c$  и  $d/b$ .

По сравнению с ПЭ рис. 1 максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности снижаются в среднем в 1,8-2 раза, а увеличенное в ПЭ рис. 1 значение входного сопротивления уменьшается в среднем в 1,4 раза при незначительном уменьшении ослабления.

Формулы (4) и (5), полученные аппроксимацией результатов моделирования, имеют погрешность не более 3 % в использованном диапазоне изменения переменных:  $b/a = 5$ ,  $0,01 \leq w \leq 100$ ,  $0,3 \leq d/b \leq 0,7$ ,  $0,1 \leq a/c \leq 0,4$ .

$$q = A_q \alpha^2 + B_q \alpha + C_q; \quad (4)$$

$$A_q = D_q \beta^2 + E_q \beta + F_q; B_q = G_q \beta^2 + H_q \beta + I_q; C_q = J_q \beta^2 + K_q \beta + L_q;$$

$$D_q = 14,136\omega^2 - 1375,8\omega + 1831; E_q = -3,1053\omega^2 + 287,86\omega - 493,14;$$

$$F_q = -0,8284\omega^2 + 85,624\omega - 70,012; G_q = -13,382\omega^2 + 1307,1\omega - 1779,3;$$

$$H_q = 2,4477\omega^2 - 225,63\omega + 459,39; I_q = 1,006\omega^2 - 103,09\omega + 71,111;$$

$$J_q = 2,5446\omega^2 - 250,4\omega + 1030,6; K_q = -0,2876\omega^2 + 26,028\omega - 555,22;$$

$$L_q = -0,3056\omega^2 + 31,042\omega + 79,034.$$

$$R_{ax}/\rho_2 = A_R \alpha^2 + B_R \alpha + C_R; \quad (5)$$

$$A_R = D_R \beta^2 + E_R \beta + F_R; B_R = G_R \beta^2 + H_R \beta + I_R; C_R = J_R \beta^2 + K_R \beta + L_R;$$

$$D_R = -0,0254\omega^2 - 8,0266\omega + 0,022; E_R = -0,0141\omega^2 + 3,5925\omega + 0,016;$$

$$F_R = 0,0016\omega^2 + 2,3765\omega - 0,0005; G_R = 0,0447\omega^2 + 8,6283\omega - 0,0413;$$

$$H_R = 0,0189\omega^2 - 4,0393\omega + 0,0009; I_R = -0,0022\omega^2 - 3,3791\omega + 0,0004;$$

$$J_R = -0,0239\omega^2 - 2,2165\omega + 0,0222; K_R = -0,0068\omega^2 + 1,2276\omega - 0,0023;$$

$$L_R = 0,0009\omega^2 + 1,3785\omega$$

Технологические вопросы изготовления ПЭ изложены в [18].

### Библиографический список

1. **Горячев, Ю.А.** Плоская тонкоплёночная резистивная линия // Вопросы радиоэлектроники, сер. Радиоизмерительная техника, 1969, вып. 2, с. 91-99.
2. **Садков, В.Д.** Расчет тонкоплёночной аттенуаторной пластины / В.Д. Садков, Ю.А. Горячев // Техника средств связи, сер. Радиоизмерительная техника, 1977, вып. 2, с. 13-19.
3. **Ломакин, А.М.** Об исследовании устойчивости резистивных элементов для коаксиальных аттенуаторов к воздействию импульсной мощности / А.М. Ломакин [и др.] // Техника средств связи, сер. Радиоизмерительная техника, 1979, вып. 7, с. 50-53.
4. **Кочемасов, В.** Фиксированные аттенуаторы – производители и характеристики. Ч. 1 / В. Кочемасов, Л. Белов // Электроника НТБ, 2017, № 6, с. 108 – 116.
5. **Кочемасов, В.** Фиксированные аттенуаторы – производители и характеристики. Ч. 2 / В. Кочемасов, Л. Белов // Электроника НТБ, 2017, № 7, с. 90 – 94.
6. **Рудоясова, Л.Г.** Тонкоплёночные полосковые аттенуаторы / **Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков** // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014, № 5, с. 40 – 46.
7. **Шишков, Г.И.** Широкополосные фиксированные аттенуаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. -2011, № 1, с. 110 – 114.
8. **Бажилов, В.А.** Проектирование малогабаритных аттенуаторов с малым уровнем ослабления / В.А. Бажилов, Е.А. Михалицын // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2014, т. 17, № 1, с. 54 – 63.
9. Film attenuators new generation / М. Rubanovich, V. Khrustalev, K. Aubakirov, V. Razinkin, A. Stolyarenko, P. Bogomolov // American Journal of Scientific and Educational Research. - 2014. - № 1 (4), p. 634-647.
10. **Богомолов, П.Г.** Широкополосный плёночный СВЧ аттенуатор / П.Г. Богомолов [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ: Матер. Всероссийской конф. – Санкт – Петербург, 2014, с. 93 – 97.
11. **Чижилов, С.В.** Анализ тенденций развития чип-резистивных СВЧ-аттенуаторов // Успехи современной радиоэлектроники, 2017, № 8, с. 36 - 42.
12. **Уткин, В.Н.** Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа / В.Н. Уткин, В.Д. Садков, Д.Ю. Якимов // Известия вузов. Электроника, 2008, № 1, с. 86 – 88.
13. **Садков, В.Д.** Расчет П-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа / В.Д. Садков, Д.Ю. Якимов // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2009, № 10, с. 76 -80.
14. **Садков, В.Д.** Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона / В.Д. Садков, К.С. Фомина // Нано- и микросистемная техника, 2017, т. 19, № 4, с. 238 – 243.

15. Садков, В.Д. Поглощающие элементы на основе однородной резистивной пленки для реализации широкого диапазона ослаблений мощности радиосигналов / В.Д. Садков, К.С. Фомина, А.В. Пилькевич // Известия вузов. Электроника, 2018, № 5, с. 477 – 485.
16. Садков, В.Д. Оптимальный профиль входных контактов аттенуаторной пластины на основе распределенных резистивных структур / В.Д. Садков, В.Н. Уткин // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2008, № 12, с. 65 – 67.
17. Программный комплекс *Elcut* . Сайт компании ООО «Тор»: [www.tor.ru](http://www.tor.ru)
18. Седаков, А.Ю. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления/ А.Ю. Седаков, В.К. Смолин. - М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.

**A.V.Pilkevich, V.D. Sadkov**

**FILM ABSORBING ATTENUATOR ELEMENTS WITH INCREASED  
POWER CHARACTERISTICS**

Nizhny Novgorod state technical University n.a. R.E. Alekseeva

Topologies of absorbing elements for waveguide, coaxial and strip attenuators are proposed, which provide reduction of maximum values of potential gradient by 1.8 - 2 times on average and maximum power density by 20-80 times in comparison with typical topologies by introduction of resistive layer with other resistivity near input and output contacts. Graphs showing the gain in value of potential gradient and power density depending on ratio of dimensions and specific surface resistances of resistive films in absorbing element are given.

**Keywords:** resistive film absorbing elements, fixed attenuators.

Е.А. Спирина<sup>1,2</sup>, В.В. Баранов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Приблудова<sup>2</sup>

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ

<sup>1</sup>«Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Приведена структурная схема многоканального цифрового приемного модуля, предназначенного для применения в цифровой приемной антенной решетке мобильной радиолокационной станции с полностью цифровой активной фазированной антенной решеткой, двумерным электронным сканированием. Рассмотрен принцип работы приемного модуля с аналого-цифровым преобразованием и цифровой фильтрацией в каждом приемном канале, с внутренним формированием сигналов гетеродина и тестового пилот-сигнала для фазирования антенной решетки, с оптическим каналом обмена информацией и управления.

**Ключевые слова:** цифровой приемный модуль, цифровая активная фазированная антенная решетка.

### Введение

Для создания перспективных наземных средств обнаружения систем ПВО, действующих эффективно в условиях непрерывно меняющейся боевой обстановки при наличии активных и пассивных помех, необходимо разработать РЛС, оснащенную многоэлементными антенными решетками с цифровым формированием лучей, первичной и вторичной обработкой непосредственно в антенной решетке, обеспечивающих многофункциональную работу с гибким управлением, пространственными характеристиками и высоким энергетическим потенциалом, адаптацию к быстро изменяющейся целевой и помеховой обстановке. Перед нами была поставлена задача: разработать многоканальный цифровой приемный модуль с аналого-цифровым преобразованием и цифровой фильтрацией для применения в цифровой приемной антенной решетке мобильных РЛС с полностью цифровой активной фазированной антенной решеткой (ЦАФАР) и двумерным электронным сканированием [1].

Приемный модуль предназначен для:

- приема эхосигналов, излученных передающей антенной;
- усиления сигналов, приходящих с антенных элементов;
- предварительной аналоговой фильтрации принимаемых сигналов;
- однократного преобразования частоты сигнала;
- аналого-цифрового преобразования;
- цифрового фазового детектирования;
- цифровой полосовой и весовой фильтрации принимаемых сигналов;
- формирования сигналов имитатора;
- формирования сигналов гетеродина;

- передачи потока информации 16 разрядов *sin*-квадратуры и 16 разрядов *cos*-квадратуры цифровых приемных каналов по волоконно-оптической линии связи на лучеобразующее устройство;
- приема тактового сигнала и комплексного сигнала хронизации и управления.

Анализ характеристик и возможностей существующих РЛС показывает, что решение всего комплекса поставленных задач путем совершенствования параметров РЛС кругового обзора с механическим вращением антенны является невозможным при приемлемой стоимости и массогабаритных характеристиках. Кроме того, требуемые характеристики сопровождения высокоскоростных и баллистических целей, распознавание классов воздушных объектов по сигнальным признакам, обеспечение повышенной скрытности и реализации активного противодействия средствам радиоэлектронного противодействия противника невозможно получить при механическом вращении антенны по азимуту без двумерного электронного сканирования.

Значительно большими возможностями обладают РЛС с ЦАФАР. Высокие тактико-технические характеристики радиолокационных станций на основе ЦАФАР делают их перспективными для использования в авиации и зенитно-ракетных системах наземного и морского базирования, а также комплексах радиолокационного обзора пространства и управления оружием, работающих в различных диапазонах волн.

РЛС с ЦАФАР позволяют реализовать как совмещенный, так и разнесенный режим приема-передачи, могут одновременно работать в режимах регулярного обзора (поиска) и сопровождения целей, в специальных режимах, таких как, распознавание класса целей по сигнальным признакам, быстрое взятие высокоскоростных целей на сопровождение, сопровождение высокоскоростных и маневрирующих целей, боевых блоков крылатых ракет и так далее, обеспечивая, тем самым, повышение информативности и помехозащищенности радиолокационных средств.

Существующие прототипы не могут обеспечить требуемую помехозащищенность и надежность. Общими недостатками аналогов являются малое количество каналов, объединенных в одном корпусе. Это усложняет конструкцию АФАР, построенную на базе таких модулей, и уменьшает надежность приемной системы из-за большого количества высокочастотных и низкочастотных кабелей. Это вызывается отсутствием встроенных излучающих элементов (диполей), что приводит к увеличению потерь и, следовательно, к уменьшению дальности обнаружения цели, а также невозможность обработки сигналов от каждого приемного канала в отдельности, а только лишь группы приемных каналов, что ухудшает характеристики диаграммы направленности антенной решетки [2].

### **Основные требования и выбор варианта построения цифрового приемного модуля**

В настоящее время цифровые технологии внедряются во многие области науки и техники, где до сих пор использовались аналоговые компоненты. В РЛС, в антенных решетках стала возможной замена многих аналоговых элементов на гораздо более компактные, менее дорогостоящие цифровые аналоги. Цифровое генерирование сигналов, цифровые приемники, цифровое формирование диаграмм направленности фазированных антенных решеток делают РЛС цифровым устройством с гораздо лучшими характеристиками, чем аналоговые, а благодаря цифровой микроэлектронике, более компактным и менее дорогостоящим.

Концепция «цифровой РЛС» позволяет исключить аналого-цифровое преобразование из процессора обработки сигналов и установить его на каждый приемный модуль и цифро-аналоговое преобразование на каждый передающий модуль ЦАФАР. После аналоговой фильтрации и усиления с низким уровнем собственных шумов принимаемые сигналы переводятся в цифровую форму непосредственно на уровне каждого элемента антенны или в области сверхвысоких частот, или, после преобразования с понижением частоты, цифрового фазового детектирования и полосовой весовой фильтрации, передаются на когерентную пространственно-временную обработку любых сигналов.

Поскольку РЛС наземного базирования с большой апертурой должны иметь большую мощность излучения (для обеспечения дальнего обнаружения) при строгом ограничении веса и габаритов, наиболее рациональным является следующее – разделить функции передачи и приема: поверхность приемной антенны можно максимально увеличить, при сведении к минимуму общего потребления энергии.

Из этого вытекает следующее конструктивное предложение: антенная решетка приемных устройств должна быть полностью отсоединена от антенной решетки передающих устройств с целью исключения непосредственного влияния передатчиков на приемники и необходимости установки мощной защиты на входе приемника.

### Структурная схема и принцип работы

Структурная схема многоканального цифрового приемного модуля приведена на рис.1.

Приемный модуль представляет собой многоканальное приемное устройство, принимающее эхосигнал с пассивных диполей с линейной поляризацией. Пассивные диполи представляют собой антенные элементы с частотно-избирательной характеристикой и выполняют функцию приемных антенн и предварительных полосно-пропускающих фильтров (ППФ). Для защиты от метеосадков модуль со стороны антенных элементов закрывается П-образным радиопрозрачным укрытием [3]. Таким образом, приемный модуль представляет собой многоканальный супергетеродинный приемник с однократным преобразованием частоты. В каждом приемном канале высокочастотный сигнал с пассивных диполей поступает на вход коммутатора, выполняющего функции пассивной и активной защиты, при этом собственные потери коммутатора минимально возможные.

После малошумящего усилителя (МШУ) установлен ППФ зеркального канала, он обеспечивает подавление зеркального и других побочных каналов приема. Усилитель динамического диапазона (УДД) усиливает высокочастотный сигнал до уровня, необходимого для нормальной работы смесителя (СМ). После СМ сигнал промежуточной частоты (ПЧ), пройдя через аттенюатор, необходимый для ослабления принимаемого сигнала в стробе пеленга, усиливается в усилителе промежуточной частоты (УПЧ) и поступает на ППФ на поверхностно акустических волнах (ПАВ). После ППФ на ПАВ сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а затем на цифровой фазовый детектор (ЦФД), который осуществляет перенос спектра сигнала с шумом на нулевую частоту. После ЦФД сигналы *sin* и *cos* квадратур поступают на цифровые фильтры (ЦФ) с разной длительностью импульсной характеристики. После ЦФ происходит упаковка 16 разрядов *sin*-квадратуры и 16 разрядов *cos*-квадратуры цифровых приемных каналов в последовательный код, преобразование из цифрового в оптический сигнал с помощью бинарного оптического модулятора для после-

дующей передачи по волоконно-оптической линии связи на лучеобразующее устройство в составе антенной решетки.

В цифровом фильтре объединены функции согласования по полосе сигнала и весовой обработки по уровню боковых лепестков. Объединение двух функций в ЦФ было вызвано следующей причиной: ЛЧМ сигнал имеет спектр, приближенный к прямоугольному, полосовой фильтр для такого сигнала должен иметь бесконечную импульсную характеристику, что практически нереализуемо. В то же время с целью уменьшения уровня боковых лепестков ЛЧМ-сигнала необходимо вводить весовую обработку, которая позволяет ограничить импульсную характеристику фильтра по длительности. В нашем случае выбран нерекурсивный фильтр с «окном Хэмминга». Для проверки функционирования и амплитудно-фазовой подстройки приемных каналов в модуле, модулей и РЛС в целом, в составе приемного модуля реализован синтезатор сигналов имитатора, формирующий ЛЧМ - сигнал и *sin* сигналы. Синтезатор сигналов имитатора формирует сигналы на ПЧ, которые после фильтрации и преобразования на несущую частоту с помощью делителя мощности синфазно и равноамплитудно раздаются на входы приемных каналов через коммутаторы.

Синтезатор сигналов гетеродина формирует опорные частоты в определенном диапазоне, которые после умножения частоты, фильтрации и усиления с помощью делителя мощности равноамплитудно, через усилители, необходимые для усиления и обеспечения требований по межканальной развязке, подаются на входы смесителей.

Для обеспечения работы приемного модуля, в том числе в составе ЦАФАР, на него поступают по волоконно-оптической линии связи или по радиочастотному кабелю тактовый сигнал и комплексный сигнал хронизации и управления. По тактовому сигналу установлена программируемая линия задержки (ПЛЗ), с помощью которой будет производиться межмодульная временная калибровка модулей при работе в составе цифровой активной фазированной антенной решетки.

С помощью комплексного сигнала хронизации и управления осуществляется управление режимами работы ЦФ, осуществляется включение ЛЧМ-сигнала определенной амплитуды и в заданном месте на дистанции, а также *sin* сигнала, сформированных в синтезаторе сигналов имитатора. Кроме того, с помощью комплексного сигнала хронизации и управления осуществляется переключение рабочих точек гетеродина синтезатора сигналов гетеродина.

Конструктивно приемный многоканальный модуль состоит из герметичного модуля в гибридно-интегральном исполнении, 16-ти пассивных диполей и радиопрозрачного укрытия. Общий вид многоканального цифрового приемного модуля представлен на рис. 2.

Для обеспечения наилучшего согласования излучателей с учетом их взаимного влияния в составе модуля, была разработана электродинамическая модель и проведен компьютерный анализ с целью определения оптимального углового положения излучателя. Электродинамический расчет согласования производился на основе волноводной модели, имитирующей размещение излучателя в бесконечной антенной решетке для двух случаев углового положения излучателя: соосного и развернутого на  $45^\circ$ . Исходя из проведенного математического моделирования следует, что излучатели, развернутые на  $45^\circ$ , обеспечивают наилучшее согласование. Коэффициент стоячей волны (КСВ) при таком расположении не превышает 2.5 на краях диапазона, а в центральной его части не превышает 1.75 во всем рабочем секторе углов сканирования. При соосном положении на некоторых частотах наблюдается значительный подъем КСВ (более 10), что недопустимо, потому что это приводит к значительным потерям энергии принимаемого сигнала.



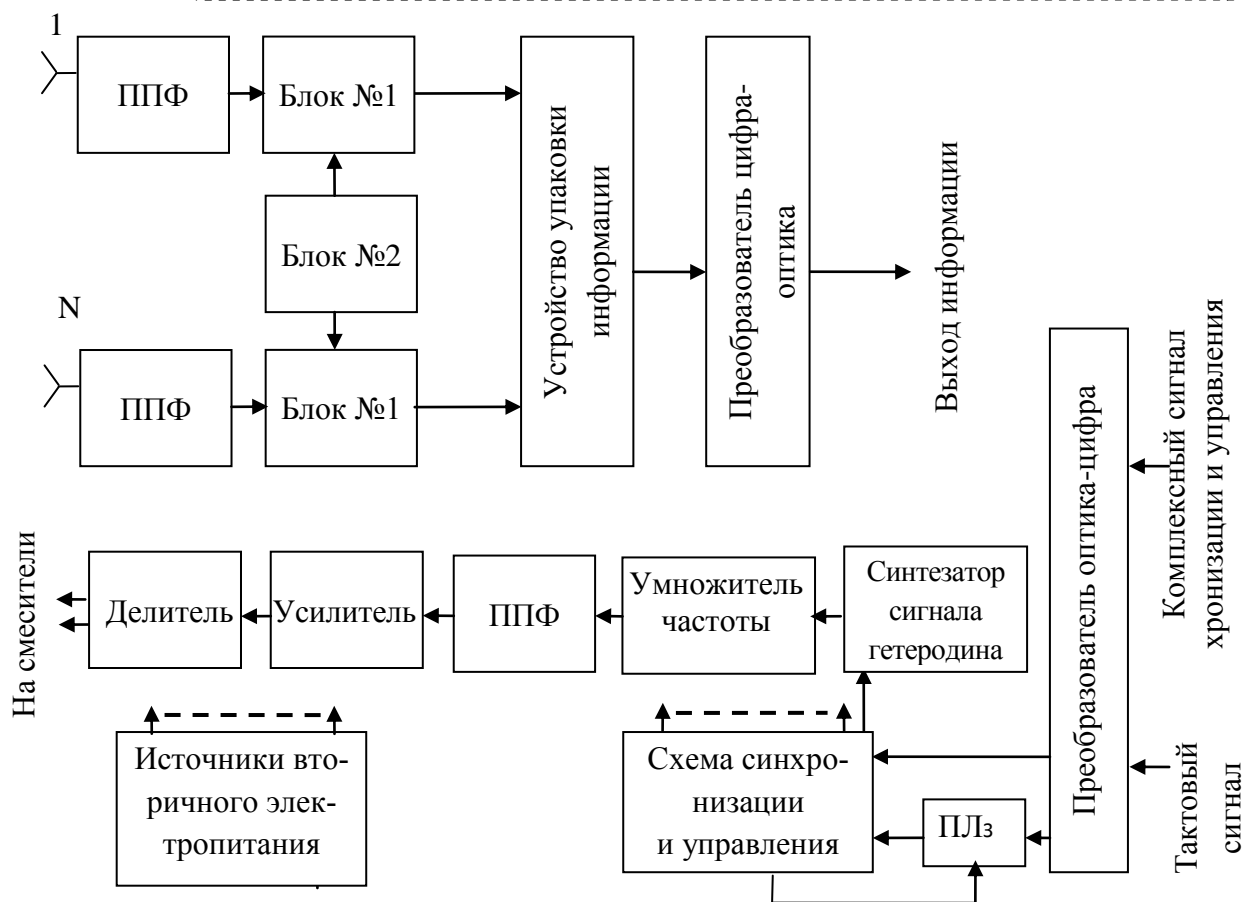
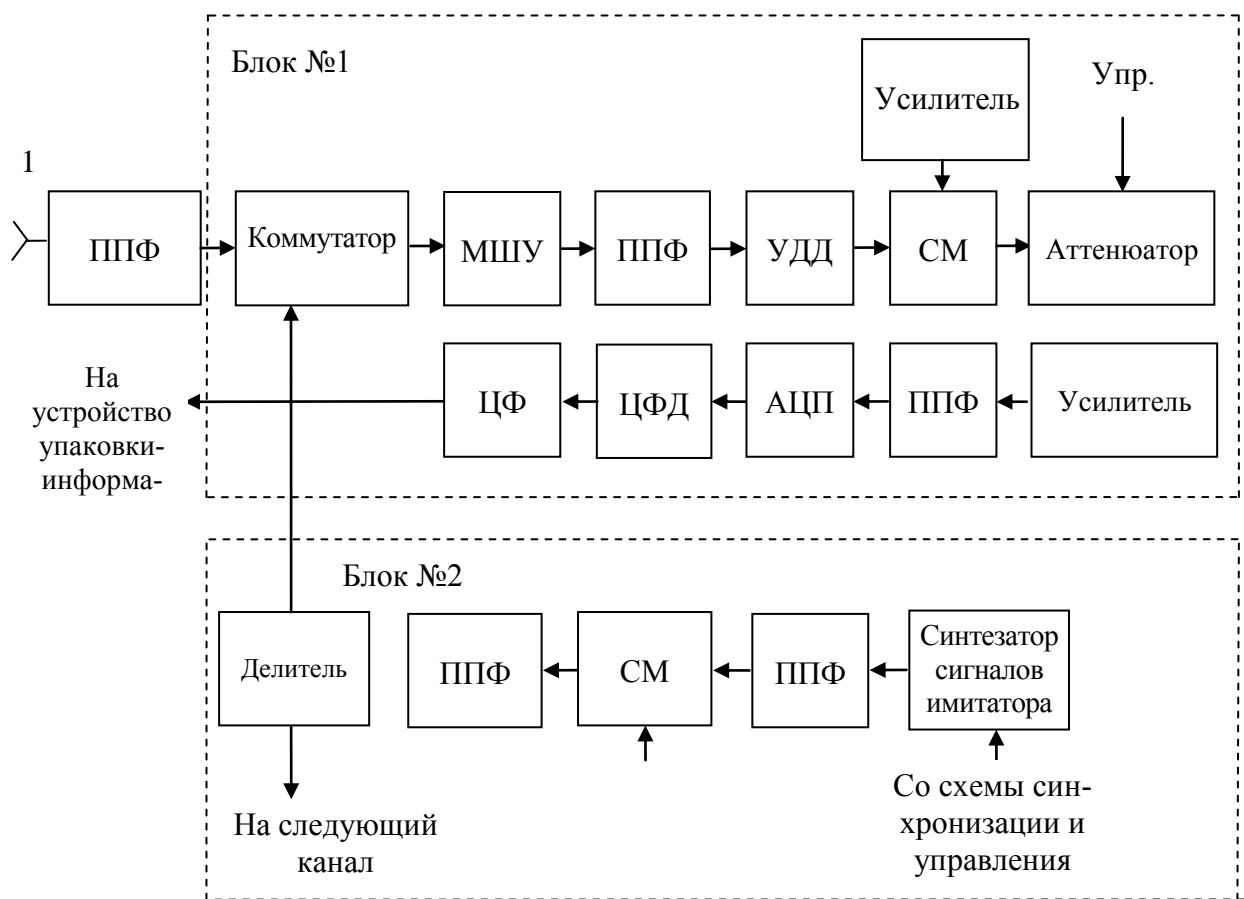
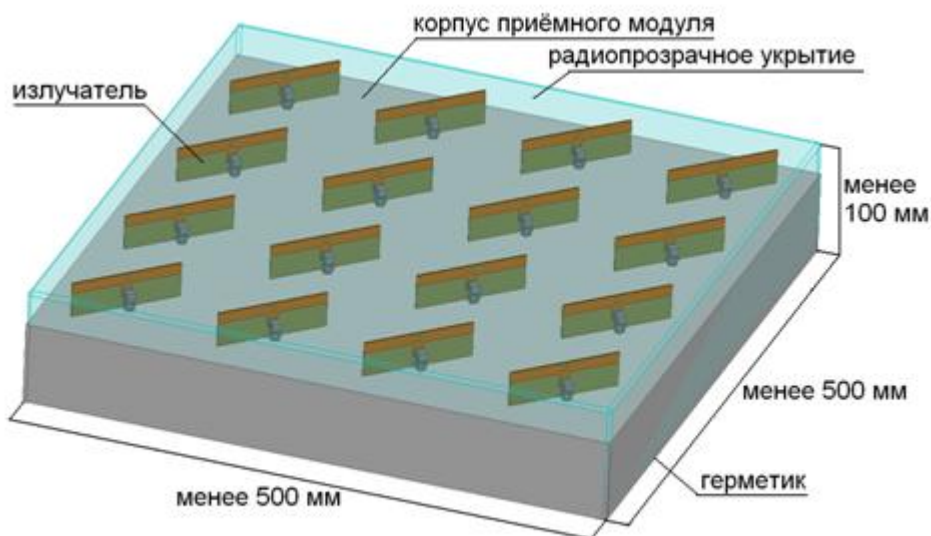


Рисунок 1. Структурная схема многоканального цифрового приемного модуля



**Рисунок 2. Общий вид многоканального цифрового приемного модуля**

### **Заключение**

Использование цифровых приемников, цифровое формирование и управление диаграммой направленности фазированной антенной решетки делают современные РЛС цифровыми устройствами с гораздо лучшими характеристиками, а благодаря микроэлектронике, более компактными и менее дорогостоящими.

Техническими результатами разработанного цифрового приемного модуля являются:

- улучшение технико-эксплуатационных показателей, а именно улучшение помехозащищенности РЛС путем использования высокоскоростных оптических линий связи;
- упрощение конструкции антенной решетки за счет исключения высокочастотных и низкочастотных связей, оставив только питание и используя оптическую линию связи;
- появление возможности обработки каждого приемного канала по отдельности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### **Библиографический список**

1. **Андрианов, В.И.** Активные фазированные антенные решётки для авиационных и космических радиолокационных комплексов наблюдения / С.В. Кривицкий, А.П. Курочкин, В.В. Ринкус, В.В. Рыков, Л.М. Якуцбень // Международная конференция «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления». - Нижний Новгород, 2002. -С. 78-82.
2. **Леманский, А.А.** ЗРС С-400 «Триумф»: обнаружение – дальнее, сопровождение – точное, пуск – поражающий / А.А. Леманский, И.Р. Ашурбейли, Н.Э. Ненартович // Воздушно-космическая оборона, 2008. - № 3. -С. 68-76.
3. **Боев, С. Ф.** Новые разработки концерна «РТИ системы» // Военный парад, 2002. -С. 54-55.

E.A.Spirina<sup>1,2</sup>, V.V.Baranov<sup>1,2</sup>, E.N. Pribludova<sup>2</sup>

## MULTICHANNEL DIGITAL RECEIVING MODULE

<sup>1</sup>Federal research and production centre “Nizhny Novgorod research institute of radio engineering”

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article is devoted to consideration of the principle of operation of the developed digital receiving module.

**Approach:** Analysis of the characteristics and capabilities of existing radars.

**Findings:** A multichannel digital receiving module with analog-to-digital conversion and digital filtering has been developed. This module is necessary for use in a digital receiving antenna array of mobile radars with a fully digital active phased array and two-dimensional electronic scanning

**Research limitations/implications:** The technical result of the developed digital receiving module is to improve technical and operational indicators, simplifying the design of the antenna array by eliminating high-frequency and low-frequency communications, which leads to increased reliability of the radar, it becomes possible to process each receiving channel individually.

**Originality/value:** Existing prototypes cannot provide the required noise immunity and reliability.

**Keywords:** digital receiving module, digital active phased array.

П.А. Тупиков, А.И. Морозкина, С.С. Хлыбова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА СТАНДАРТА IEEE802.15.4-2011

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Проведено исследование скорости передачи данных и качество сверхширокополосной связи на базе платы DWM1001-Dev компании Decawave.

**Ключевые слова:** СШП, битовые ошибки, скорость передачи данных, качество связи.

### Введение

Сверхширокополосная (СШП) связь представляет собой способ передачи информации при использовании сигналов, полоса частот которых более одной октавы, то есть верхняя и нижняя граничные частоты отличаются более чем в два два раза. В системах СШП связи используются модулированные импульсы с длительностью менее 1 нс.

Связь с помощью таких сигналов получила новый стимул для развития с широким распространением устройств интернета вещей, где оказались востребованными такие характеристики СШП связи как очень большая информационная ёмкость каналов, скрытность и устойчивость к подавлению, высокая проникающая способность, высокая электромагнитная совместимость с другими системами связи, работающими в перекрывающихся диапазонах частот. Дополнительным преимуществом использования СШП сигналов является возможность позиционирования приёмников относительно передатчиков с помощью обработки принимаемых сигналов.

Целью данной статьи является оценка достижимой скорости передачи данных, а также качества связи стандарта IEEE802.15.4-2011, в частности платы DW1001-Dev компании Decawave. В системах позиционирования в режиме реального времени микросхема DWM1001-Dev может выступать в качестве электронного устройства, которое обнаруживает СШП-импульсы (так называемый якорь или anchor) или устройства, передающего СШП-импульсы (так называемая метка или tag).

### Описание и результаты эксперимента

Макет для проведения эксперимента по исследованию скорости передачи данных и оценки качества связи показан на рис. 1.

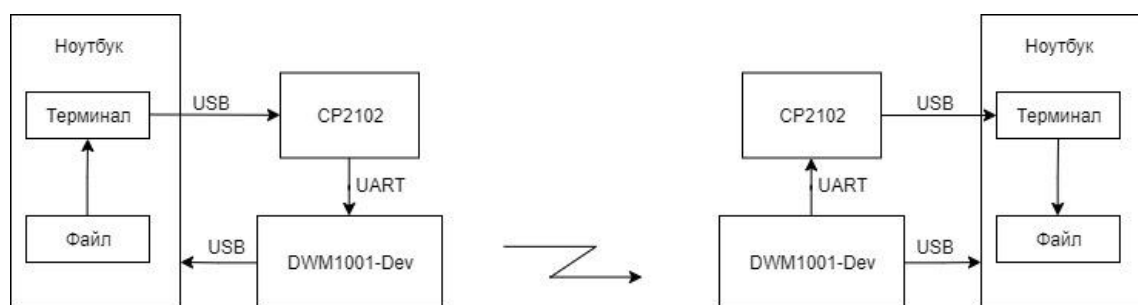


Рисунок 1. Схематическое изображение подключения всех модулей для проведения эксперимента

## Результаты проведения эксперимента по определению скорости передачи

Такие характеристики как скорость и качество передачи данных связаны между собой. Восстановление данных в декодерах Витерби и Рида-Соломона, используемых в приемниках DW1000, может быть не эффективным при попытках передачи очень большого сообщения. Таким образом, необходимо исследовать максимально возможную длину пакета данных и характер правильности декодирования сообщения, так как при больших ошибках восстановления даже на малых расстояниях нет смысла в дальнейшем исследовать скорость и качество связи при установленных характеристиках.

По данным производителя при расширенном формате сообщения за одну транзакцию можно передать до 1023 байт. Однако на практике при попытках передачи массива размером больше 800 элементов возникает ошибка транзакции последовательного периферийного интерфейса на передатчике, при попытке передать от 600 до 800 байт – ошибка транзакции последовательного периферийного интерфейса на приемнике.

Экспериментально найден оптимальный размер массива и длительность задержки между транзакциями передатчика и приемника. Максимальный размер массива, позволяющий передавать данные без искажений внутри пакета на расстоянии 1 м, равен 200 символам или байтам. В данном случае оптимальная задержка между транзакциями равна 20 мс на передатчике и 15 мс на приемнике. Скорость передачи при таких параметрах равна 13701 байт/с или 13,38 кбайт/с.

Экспериментально выявлено сильное влияние интерфейса передачи данных DW1000 на результирующую скорость, вызванную, вероятно, тем, что функция передачи данных не является основной в приёмопередатчиках этого стандарта.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента по измерению максимальной скорости при использовании UART в лабораторных условиях при расстоянии между передатчиком и приемником 1 м.

Таблица 1

### Результаты исследования влияния UART на скорость передачи

Скорость передачи без UART(передаваемый массив хранится в памяти программы передатчика, а на приемнике установлен счетчик) , байт/с	Скорость передачи при использовании UARTтолько на одном из устройств – например, на приемнике, байт/с	Скорости передачи при использовании UARTи на приемнике, и на передатчике, байт/с
13670	10105	3890

Согласно проведенному эксперименту, измеренная максимальная скорость передачи значительно уменьшается при использовании UART.DW1000 позволяет использовать также последовательный периферийный интерфейс SPI, скорость которого выше, а задержки при обработке – меньше.

### Результаты проведения эксперимента по исследованию качества связи

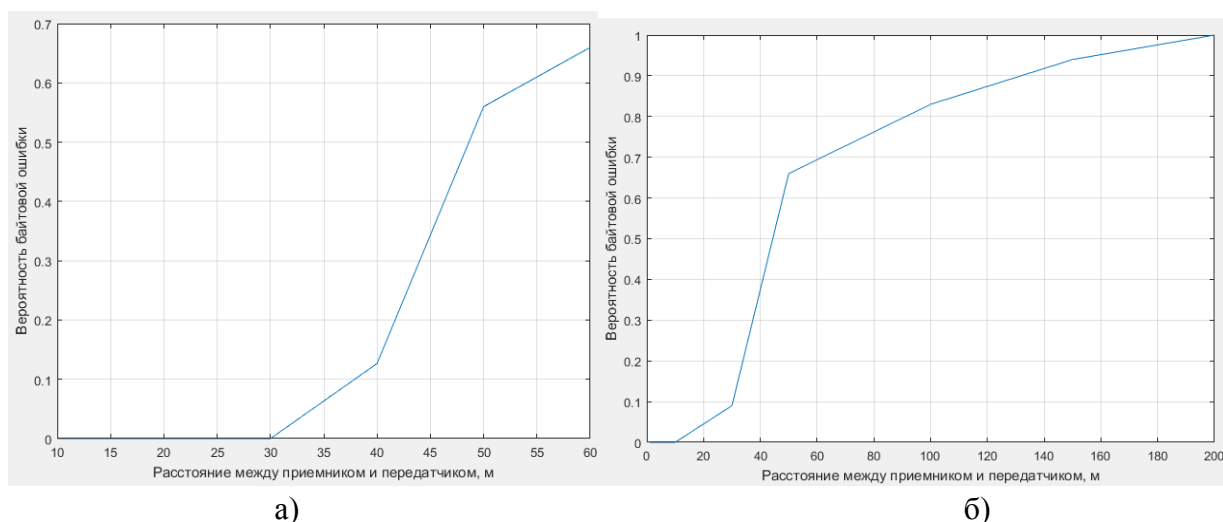
Для исследования качества связи требуется оценить вероятность байтовой (или битовой) ошибки при различных скоростях передачи данных на различных расстояниях. Наи-

большой интерес представляет максимальная дальность, поэтому качество связи будем оценивать только на минимальной скорости.

В эксперименте передавалось пять различных файлов с псевдослучайными данными размером 1 Мб на расстояниях между приемником и передатчиком от 1 до 65 метров. Место проведения эксперимента - коридор университета. В результате установлено, что вероятность байтовой ошибки внутри пакета, обусловленная ошибками кодирования и декодирования, равна нулю.

Аналогичные результаты наблюдаются при исследовании вероятности байтовой ошибки в пределах пакета на открытом пространстве. Таким образом, можно утверждать, что вероятность ошибки при передаче может существенно характеризоваться только вероятностью потери целого пакета. Это объясняется тем, что приёмопередатчик рассматриваемого стандарта IEEE 802.15-2011 имеет встроенный контроль чётности и восстановление ошибок, поэтому при превышении количества ошибок сообщение повреждается целиком.

Графики вероятностей байтовой ошибки, обусловленной потерей пакета, при передаче данных в помещении и открытом пространстве изображены на рис. 2, а и б соответственно.



**Рисунок 2. Графики зависимости вероятности байтовой ошибки от расстояния между приемником и передатчиком при измерении в помещении (а) и на открытом пространстве (б)**

Из рис. 2, а видно, что в помещении на расстоянии между передатчиком и приемником до 30 м наблюдается отсутствие потерь, на расстоянии больше 30 м зависимость имеет экспоненциальный характер. Условия проведения эксперимента в помещении не позволили оценить максимальную возможную дальности передачи, но можно утверждать, что уже на расстоянии 50 м приемник не получает больше 50 % переданных данных.

В открытом пространстве график (рис. 2, б) также имеет экспоненциальную зависимость, но в целом качество связи хуже при всех значениях расстояния между передающим и приемным модулем, а нулевая вероятность ошибки наблюдается при расстоянии только до 10 м по сравнению с 30 м при измерении в помещении. Также данный эксперимент позволяет оценить максимальное возможное расстояние между передатчиком и приемником. На расстоянии 200 метров наблюдается вероятность ошибки, равная 1, это означает, что все данные теряются.

Также проведен эксперимент по исследованию качества связи при следующих условиях:

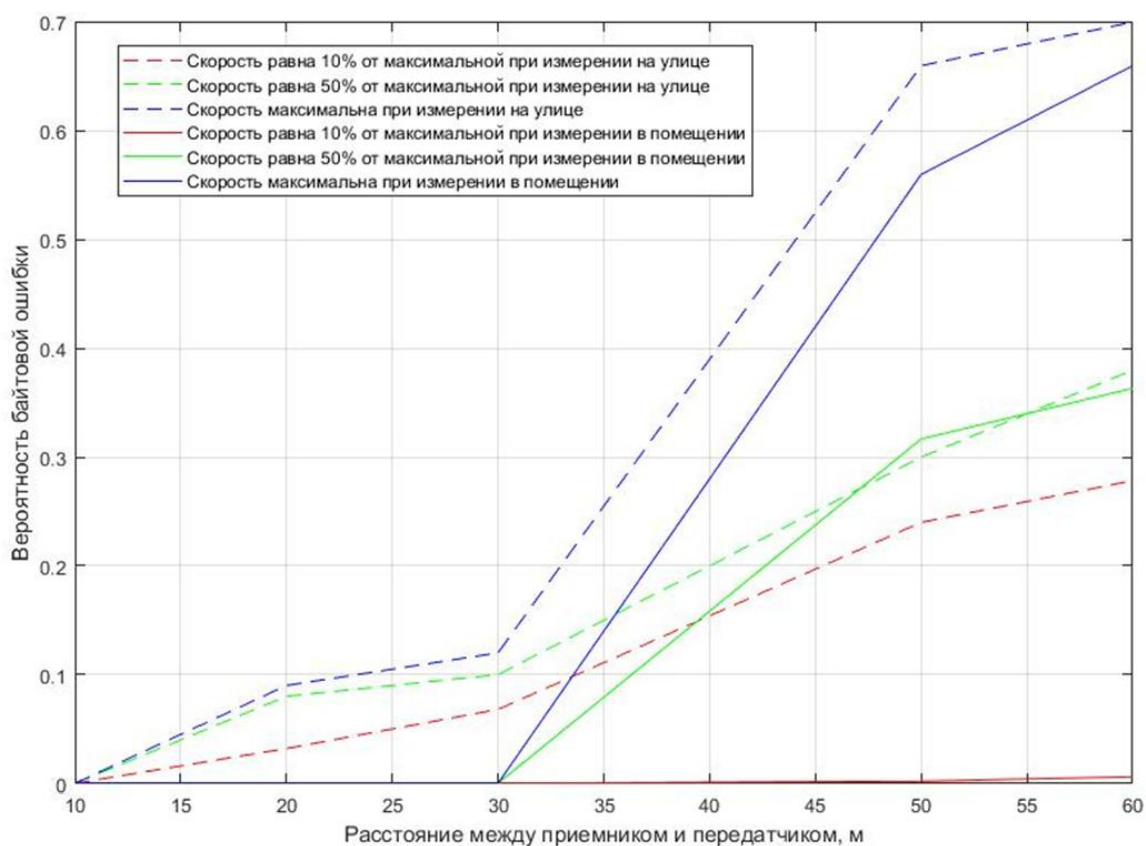
- 1) передатчик и приемник находятся на расстоянии 3 метра друг от друга, между ними железобетонная стена лаборатории;
- 2) передатчик и приемник находятся на расстоянии 6 метров друг от друга, между ними пластиковая дверь.

В результате проведенных экспериментов получено, что вероятность байтовой ошибки в обоих экспериментах равна 0.

Для более подробного исследования качества связи требовалось исследовать также вероятность байтовой ошибки от расстояния при разных скоростях:

- при максимальной скорости 3890 байт/с;
- при скорости 1950 байт/с, составляющей 50% от максимальной;
- при скорости 398 байт/с, составляющей 10% от максимальной.

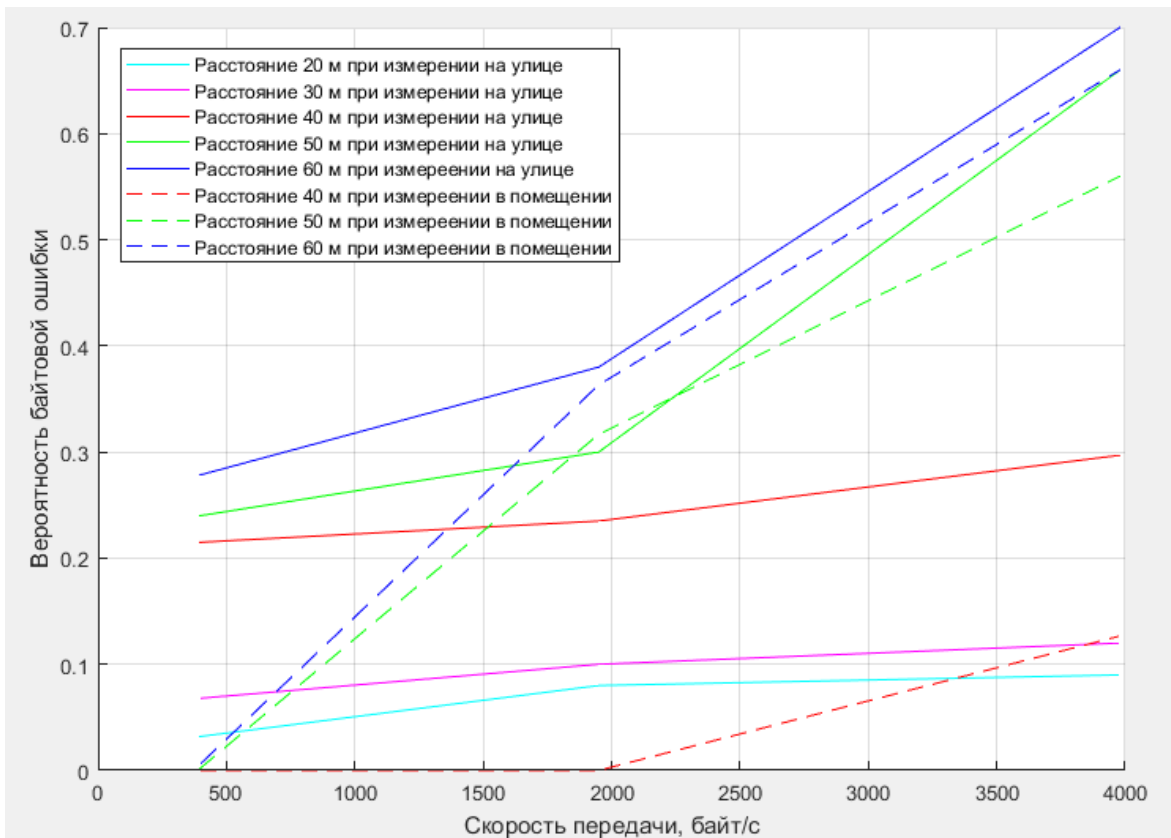
Результаты эксперимента в различных условиях, а именно в помещении и на открытом пространстве (улице) представлены на рис. 3.



**Рисунок 3. График зависимости вероятности байтовой ошибки от расстояния**

Согласно полученным результатам, можно утверждать, что уменьшение скорости передачи, а именно уменьшение размера передаваемого массива, позволяет увеличить качество связи. Более того, при передаче в условиях помещения без мешающих объектов возможно добиться минимальной вероятности байтовой ошибки даже на расстоянии 60 метров при условии скорости 400 байт/с. Качество связи при использовании данных приемопередатчиков в помещении лучше, чем при использовании на улице.

На базе проведенных экспериментов также были построены графики зависимости вероятности байтовой ошибки от качества связи. Графики результатов измерений в помещении и на улице приведены на рис. 4.



**Рисунок 4. График зависимости вероятности байтовой ошибки от скорости при разных расстояниях**

Графики результатов исследования, представленные на рис. 3 и 4, показывают, что вероятность байтовой ошибки увеличивается при увеличении скорости на всех расстояниях, однако на больших расстояниях между передатчиком и приемником наблюдается более резкое ухудшение качества связи. Также результаты показывают, что качество связи в целом лучше при измерении в помещении, чем на открытом пространстве.

### Выводы

Из полученных результатов следует, что при измерении на улице вероятность байтовой ошибки принимает ненулевые значения уже на расстоянии в 15 м, тогда как при измерении в помещении – с 30 м при любой скорости.

Вероятность байтовой ошибки увеличивается при увеличении расстояния. В целом качество связи лучше в помещении, чем на улице – это может быть связано с тем, что в помещении имеет место быть отражения сигналов от стен коридора, а на открытом пространстве дополнительные помехи могли создавать люди, которые ходили между передающей и приемной станциями. На расстоянии более 30 метров наблюдается резкий рост вероятности байтовой ошибки, как на улице, так и в помещении.

Результаты эксперимента по исследованию качества связи в зависимости от скорости передачи данных показали пропорциональную зависимость вероятности байтовой ошибки от размера передаваемого сообщения. Это можно обосновать тем, что при большем размере сообщения более вероятно появление групповых ошибок, которые с большей вероятностью приводят к невозможности восстановления на приемнике целого пакета.



Результаты работы позволяют утверждать, что приемопередатчик стандарта IEEE 802.15-2011 возможно использовать в распределенных системах, не требующих скоростной передачи данных на больших расстояниях. Например, такие устройства могут быть использованы в задачах определения местоположения, в том числе в качестве радиометок. Как показали проведенные эксперименты, возможно добиться хороших показателей качества и дальности СШП связи на расстоянии до 65 метров в помещении и до 30 метров на открытом пространстве. Анализ фактической скорости передачи и качества связи показал, что интегральная схема DW1000 подходит для задач, в которых приемлема скорость передачи данных порядка 2 кБ/с.

### Библиографический список

1. Лазоренко, О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2008, т. 13, №2. - С.166- 194
2. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. - М. : Техносфера, 2005. 305 с.
3. Decawave DW1000 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/dwm1000/datasheet/>
4. Decawave DWM1001 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/dwm1001/datasheet/>
5. Decawave DWM1001-Dev Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/dwm1001dev/datasheet/>
6. Decawave DWM1001 Firmware API Guide – Decawave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/dwm1001/api/>
7. Decawave DWM1001 Firmware User Guide – Decawave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/dwm1001/firmware/>
8. CP2102 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>
9. Nordic Semiconductor nRF52832 datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF52832>
10. Официальный сайт фирмы Decawave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.decawave.com/>

**P.A. Tupikov, A.I. Morozkina, S.S. Khlybova**

### **STUDY OF CHARACTERISTICS OF AN ULTRA-WIDEBAND TRANSCEIVER OF THE IEEE 802.15.4-2011 STANDARD**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** this article is devoted to the study of the maximum possible data transfer rate and quality of ultra-wideband communication based on the DWM1001-Dev board.

**Design / methodology / approach:** the technique consists in measuring the bit error rate at different data rates and different distances of the transmitter from the receiver.

**Conclusions:** the bit error rate increases with increasing distance and data transfer rate. Therefore, ultra-wideband communication is suitable for use over short distances.

**Limitations / consequences of the study:** this study opens up further prospects for exploring the possibilities of using ultra-broadband communication technologies

**Originality / value:** the results suggest that the transceiver based on this DWM1001-Dev board can be used in distributed systems that do not require the transmission of large data over long distances.

**Keywords:** UWB, bit error rates, data transfer rate, communication quality.

К.С. Фомина, А.В. Пилькевич, В.Д. Садков

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Предложена методика оценки влияния сопротивления многослойных контактов на ослабление и входное сопротивление пленочных поглощающих элементов для волноводных, коаксиальных и микрополосковых аттенуаторов с планарными, торцевыми и охватывающими контактами. Построена схема замещения таких элементов с учетом сопротивления входного, выходного и заземляющих контактов. В качестве примера проведена оценка влияния контактных сопротивлений контактов различного технологического исполнения на основные параметры поглощающих элементов габарита 2x2x0,5 мм для поверхностного монтажа.

**Ключевые слова:** поглощающий элемент; многослойный контакт; охватывающий, планарный и торцевой контакт; контактное сопротивление; ослабление.

Волноводные, коаксиальные и микрополосковые аттенуаторы с резистивными пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в радиоприемных, телевизионных и измерительных системах, в телефонии, устройствах аудио- и видеотехники для измерения и калиброванного ослабления мощности радиосигналов, взаимной развязки трактов и уменьшения вносимых ими отражений, формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток, расширения пределов измерений и изменения чувствительности радиоизмерительных приборов, в значительной степени определяя их технико-экономические и эксплуатационные характеристики [1-4]. Диапазон измеряемых ослаблений аттенуаторов постоянно расширяется, в том числе и в область малых ослаблений, где может потребоваться учет ряда новых факторов, оказывающих влияние на параметры поглощающих элементов, в частности, контактных сопротивлений [5-8].

Под контактным сопротивлением понимается сопротивление контактного узла между точками входа тока в контакт и выхода из него. Оно включает в себя сопротивление электрода контакта и переходное контактное сопротивление – дополнительное сопротивление области перехода тока из резистивной пленки в проводящую или наоборот.

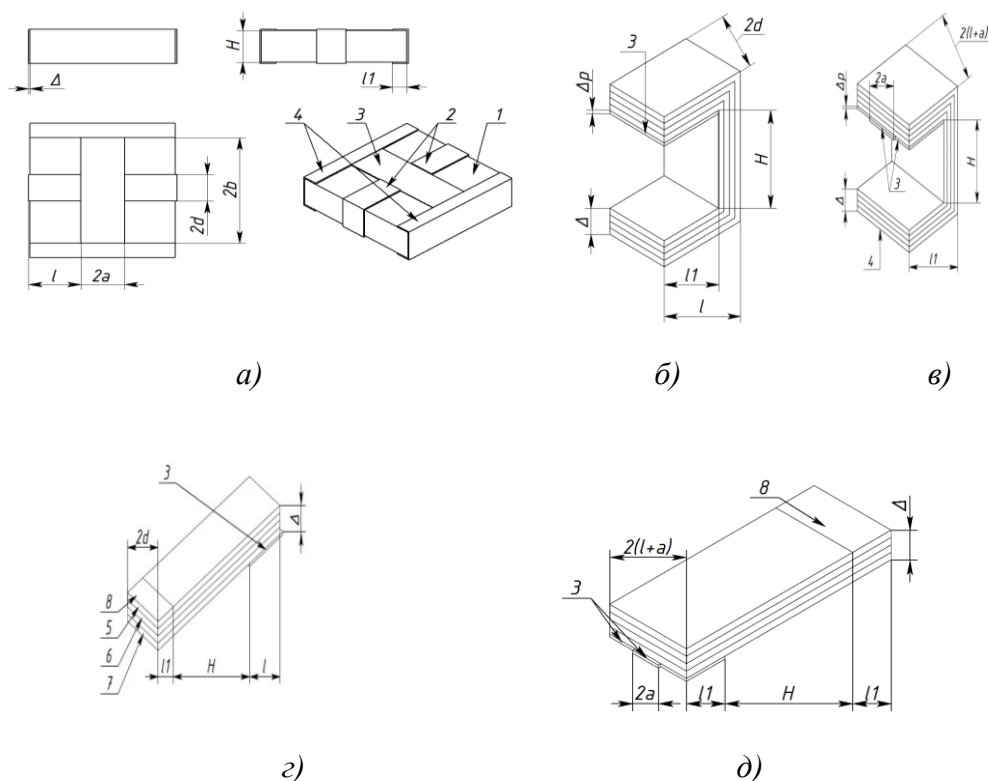
Необходимость выделения контакта как элемента конструкции пленочного ПЭ обусловлена тем, что ток и выделяемая мощность вприконтактной области имеют резко неравномерное распределение по длине и толщине в проводящих и резистивной пленках. Это приводит к дополнительному увеличению электрического сопротивления контакта, что может оказать влияние на ослабление и входное сопротивление ПЭ.

Лучшими материалами для контактов являются медь, серебро, золото, алюминий. Ухудшение прочности медных покрытий и их паяемости связано с образованием интерметаллического слоя медь – олово. Образование и рост интерметаллических соединений происходит в процессе пайки, эксплуатации и хранения. Для устранения этого явления между слоем меди и олова наносится барьерный слой химического никеля, препятствующий диффузии олова в

медь. Аналогичная ситуация имеет место с золотом и серебром. Последнее почти не применяется из-за повышенной электромиграции.

В настоящее время в качестве металла для контактов в микроэлектронике широко используется алюминий из-за низкого удельного сопротивления и технологичности. Он обладает высокой адгезией к керамическим материалам на основе  $Al_2O_3$ , может наноситься испарением в вакууме, ионным распылением или осаждением из газовой фазы. Алюминий относительно стоек к окислению и стабилен, вплоть до температуры  $600^\circ C$ . С целью ослабления электромиграции под контактные материалы наносят подслои из титана, хрома, никеля и других металлов. Таким образом, проводящие контакты многослойны и включают в себя адгезионный, высокопроводящий, барьерный и защитно-монтажный слои [8].

Цель настоящей работы – разработка методики оценки влияния сопротивления многослойных контактов на ослабление и входное сопротивление пленочных ПЭ аттенюаторов с любыми типами контактов. Конструкция ПЭ (в общем случае с охватывающими контактами для поверхностного монтажа), структура охватывающих контактов (входного/выходного и заземленных) и их развернутый вид приведены на рис. 1. Размеры  $2(a+l)$  и  $2(b+l_1)$  определяют габариты диэлектрической подложки, а  $2d$ ,  $2l$  и  $l_1$  – ширину, длину входного(выходного) и заземленных контактов на лицевой стороне подложки. В ряде применений контакты планарны (длиной  $l$  и  $l_1$  по рис. 1,б, в), в других – продолжают на торцевые поверхности (металлизация на обратной стороне подложки отсутствует).



**Рисунок 1.** Конструкция ПЭ с охватывающими контактами (а), уголкового (б, в) и развернутого (г, д) структура входного/выходного и заземленных контактов: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – входной/выходной контакты; 3 – резистивная пленка; 4 – заземленные контакты; 5 – защитно-монтажный слой; 6 – барьерный слой; 7 – высокопроводящий слой; 8 – область электрического контакта с фольгой печатной платы

Как правило, ПЭ изготавливается с использованием метода фотолитографии и под планарными контактами остается резистивная пленка. Величина  $\ell$  определяется как разница между габаритным размером и шириной резистивной пленки  $2a$  (зависит от величины ослабления), а  $\ell_1$  – технологическими требованиями надежного контакта при монтаже (зависит от габаритов подложки). Удельные объемные сопротивления  $\rho_{vi}$  и толщины  $\Delta_i$  (рис. 1, з, д) резистивной пленки, высокопроводящего, барьерного и защитно-монтажного слоев обозначены как  $\rho_{vp}$  и  $\Delta_p$ ;  $\rho_{vp}$  и  $\Delta_p$ ;  $\rho_{vb}$  и  $\Delta_b$  и  $\rho_{vz}$  и  $\Delta_z$ .

В работе авторов [8] показана возможность приведения многослойной пленочной структуры со слоями 5–7 (рис. 1, з, д) к эквивалентной однородной толщиной  $\Delta = \Delta_p + \Delta_b + \Delta_z$  и удельным объемным сопротивлением

$$\rho_{v\text{экв}} = \Delta \cdot \left( \frac{\Delta_p}{\rho_{vp}} + \frac{\Delta_b}{\rho_{vb}} + \frac{\Delta_z}{\rho_{vz}} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Для корректного перехода от контактной структуры рис. 1, б, в к развернутой вида рис. 1, з, д используем аппарат теории функций комплексного переменного [9]. Разделяем структуру рис. 1, б или рис. 1, в на 2 примерно равные уголкового части (рис. 2) и отображаем уголок

в плоскости  $Z$  на плоскость  $W$  с помощью функции

$$Z = \frac{2b}{\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{a_1}} \arctg \beta + \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{a_1} \beta}{1 - \sqrt{a_1} \beta} \right], \quad \sqrt{a_1} = \frac{b}{a}.$$

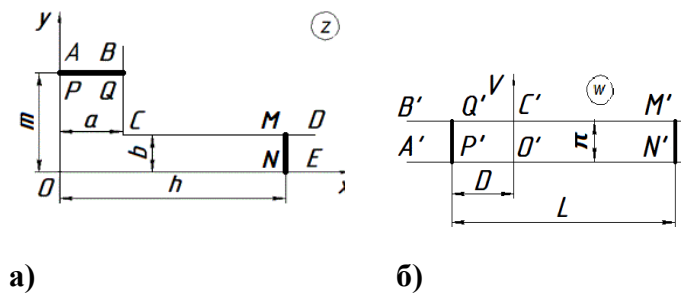


Рисунок 2. Отображение полосы в плоскости  $W$  (б) на уголковою в плоскости  $Z$  (а)

Для линий границы в плоскости  $Z$  получаем следующие соотношения для линий  $OA, OE, CD, CB$ :

$$y_{OA} = \frac{a}{\pi} \left[ 2\sqrt{a_1} \arctg(\sqrt{a_1} f) - \ln \frac{1+f}{1-f} \right], \quad f = \sqrt{(1-e^{-u})/(1+a_1 e^{-u})},$$

$$x_{OE} = \frac{a}{\pi} \left[ 2\arctg(g) + \sqrt{a_1} \ln \frac{1+g\sqrt{a_1}}{1-g\sqrt{a_1}} \right], \quad g = \sqrt{(e^u - 1)/(a_1 e^u + 1)},$$

$$y_{CB} = \frac{a}{\pi} \left[ 2\sqrt{a_1} \arctg(\sqrt{a_1} \xi) - \ln \frac{\xi+1}{\xi-1} \right], \quad \xi = \sqrt{(1+e^{-u})/(1-a_1 e^{-u})},$$

$$x_{сд} = \frac{a}{\pi} \left[ 2 \operatorname{arctg}(\alpha) + \sqrt{a_1} \ln \frac{\alpha \sqrt{a_1 + 1}}{\alpha \sqrt{a_1 - 1}} \right], \quad \alpha = \sqrt{(e^u + 1)/(a_1 e^u - 1)}.$$

При малых  $u$  структура поля вблизи угла в плоскости  $Z$  двумерна. Отображение прямоугольника  $P'Q'N'M'$  на уголок с прямыми линиями  $PQ$  и  $MN$  с заданным уровнем искажений, как следует из графиков отношений  $x_{оe}/x_{сд}$  и  $y_{оa}/y_{сb}$  от  $u/\pi$  (рис. 3), возможно только при достаточном удалении прямых  $PQ$  и  $MN$  от уголка.

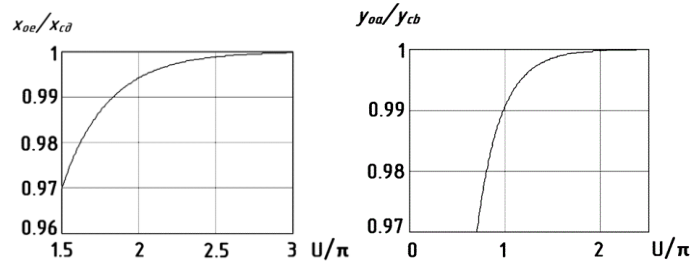


Рисунок 3. Зависимость отношений  $x_{оe}/x_{сд}$  и  $y_{оa}/y_{сb}$  от  $u/\pi$

Уже при  $u/\pi > 2$  различие в координатах  $x_{оe}$  и  $x_{сд}$ ,  $y_{оa}$  и  $y_{сb}$  не превосходит 0,5 %, а погрешность в определении сопротивлений как интегральных характеристик будет на порядок меньше.

Координата точки  $N$  по линии  $OE$  равна  $h$ , соответствующая ей координата точки  $N'$  равна

$$U_{N'} = \left( \frac{h\pi}{a\sqrt{a_1}} \right) - \frac{2}{\sqrt{a_1}} \operatorname{artg} \frac{1}{\sqrt{a_1}} - \ln \frac{4a_1}{1+a_1}.$$

Длина отрезка  $OP$  на линии  $OA$  равна  $m$ , соответствующий ей размер  $D$  в плоскости  $W$  равен

$$D = \sqrt{a_1} \operatorname{arctg} \sqrt{a_1} - \ln \frac{4}{1+a_1} + \frac{m\pi}{a}$$

Результирующий размер  $L$  определится так:

$$L = \frac{\pi}{a} \left( \frac{h+a}{\sqrt{a_1}} + \ell \right) + 2 \left( \frac{1}{\sqrt{a_1}} + \sqrt{a_1} \right) \operatorname{artg} \sqrt{a_1} - \ln \frac{16a_1}{(1+a_1)^2}.$$

Контактные сопротивления для входного и заземленного контактов  $R_k$  и  $R_3$  находятся по формулам [8]:

$$R_k = \frac{\rho_{вэКВ}}{2d} \frac{H + \ell + \ell_1}{\Delta} + \frac{\ln 2}{\pi d} (\rho_{вэКВ} + \rho_{вп}), \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{\rho_{вэКВ}}{2(\ell+a)} \frac{H + \ell_{эКВ} + \ell_1}{\Delta} + \frac{\ln 2}{\pi(\ell+a)} (\rho_{вэКВ} + \rho_{вп}), \quad (3)$$

где  $H, 2d, \ell, \ell_1, 2a$  – геометрические размеры контактов по рис. 1, рис. 1,  $d$ .

Размер  $\ell_{эКВ}$  с учетом растекания тока из резистивной пленки шириной  $2av$  проводящую пленку значительно большей ширины  $2(\ell+a)$ , вычисляется путем приведения длины  $H+2\ell_1$  к эквивалентной (с плоским полем) методом конформных отображений [9]:

$$\ell_{эКВ} = \ell_1 + (\ell+a) K(c) / K'(c), \quad c = \operatorname{dn}\{[a/(\ell+a)]K, k\},$$

где  $K, K'$  – полные эллиптические интегралы 1-го рода модуля  $k$  и дополнительного модуля  $k' = (1-k^2)^{1/2}$  соответственно, определяемые из условия  $K'/K = (\ell+H)/(\ell+a)$ .

Для планарного и торцевого контакта  $\ell_{экс} = (\ell+a)K(c)/K'(c), c = dn\{a/(\ell+a)K, k\}$ , а для  $K, K'$  получаем соответственно  $K'/K = \ell_1/(\ell+a)$  и  $K'/K = (\ell_1+H)/(\ell+a)$ .

ПЭ (половина симметричной структуры) представляется в виде П-образной схемы на рис. 4 с параметрами  $R_1$  и  $R_2$ , дополненной контактными сопротивлениями  $R_K$  и  $R_{3/2}$ , моделирующих контактные сопротивления  $R_K$  (входной/выходной) и  $R_{3/2}$  (разделено на два, т.к. рассматривается половинная структура ПЭ).

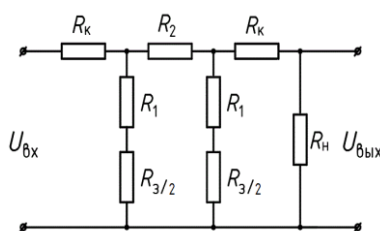


Рисунок 4. Схема замещения половинной структуры пленочного ПЭ с нагрузкой  $R_H = 50$  Ом

Предложенная методика учёта влияния контактных сопротивлений применима для любых видов топологии пленочных ПЭ. Очевидно, что контактные сопротивления (в основном  $R_K$ ) могут оказывать влияние только на ПЭ малых ослаблений. Значения  $R_K$  для ослаблений 0,1–10 дБ, приводящие к погрешности в 0,5 % и 1 % приведены на рис. 5.

В качестве примера рассчитаны конфигурации ПЭс размерами  $2 \times 2 \times 0,5$  мм ( $d = 0,25$  мм,  $b = 0,5$  мм) и охватывающими контактами с  $\ell_1 = 0,5$  мм, обеспечивающие ослабления  $q = 0,2; 0,5; 1; 2; 10$  дБ при входном сопротивлении  $R_{вх} = 50$  Ом. По величинам  $q$  и  $R_{вх}$  вычислялись параметры  $R_1$  и  $R_2$  схемы замещения рис. 4.

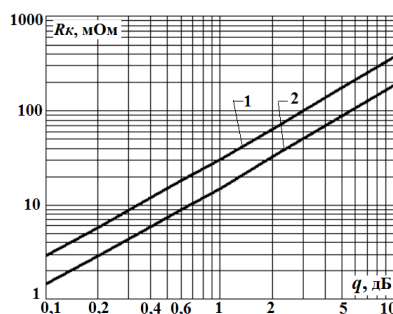


Рисунок 5. Зависимость  $R_K$  от ослабления для погрешности ослабления 1 % (1) и 0,5 % (2)

Параметры слоев выбирались в следующих пределах: резистивная пленка с  $\rho_{vp} = 10^{-6} - 10^{-4}$  Ом·м,  $\Delta_p = 0,06 - 0,3$  мкм; высокопроводящий слой с  $\rho_{vp} = (2-15) \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $\Delta_p = 1,5 - 3$  мкм; барьерный слой с  $\rho_{vб} = 7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $\Delta_б = 5 - 10$  мкм; защитно-монтажный слой с  $\rho_{vз} = 13,9 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $\Delta_з = 25 - 50$  мкм.

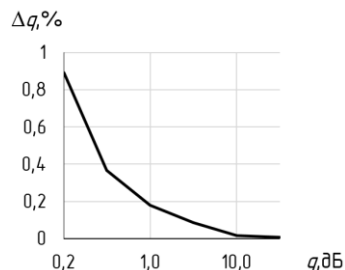
Дополнительно исследовались три известных вида технологических контактов:

- Al-Ti толщиной 3 мкм с  $\rho_v = 0,24 \cdot 10^{-8}$  Ом·м и покрытие Ni толщиной 5 мкм с  $\rho_v = 7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;

- подслой нихром толщиной 0,03 мкм с  $\rho_v = 105 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, медь толщиной 0,6 мкм с  $\rho_v = 1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, никель толщиной 0,06 мкм с  $\rho_v = 6,4 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, ПОС-61 толщиной 10–50 мкм;

- подслоей нихром толщиной 0,05 мкм с  $\rho_v = 105 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, алюминий толщиной 0,25 мкм с  $\rho_v = 2,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, Ni толщиной 0,06 мкм с  $\rho_v = 6,4 \cdot 10^{-8}$  Ом·м и ПОС-61 толщиной 10–50 мкм.

Исследования проводились с использованием методов теории цепей. Результаты изменения ослабления  $q$  относительно заданного с учетом всех контактных сопротивлений представлены на рис. 6 и совпадают для всех рассмотренных видов технологических контактов.



**Рисунок 6. Изменение  $\Delta q$  заданного ослабления  $q$  ПЭ с учетом влияния контактных сопротивлений**

Таким образом, контактные сопротивления влияют на ослабление и особенно существенны при  $q < 1$  дБ. Изменение входного сопротивления ПЭ с учетом контактных сопротивлений не превышает 0,2% от заданного.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

#### **Библиографический список**

1. **Кочемасов, В.** Фиксированные аттенюаторы – производители и характеристики. Ч. 1 / В. Кочемасов, Л. Белов // Электроника НТБ, 2017, № 6, с. 108 – 116.
2. **Кочемасов, В.** Фиксированные аттенюаторы – производители и характеристики. Ч. 2 / В. Кочемасов, Л. Белов // Электроника НТБ, 2017, № 7, с. 90 – 94.
3. **Львов, А.Е.** Тонкопленочные полосковые аттенюаторы / А.Е. Львов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014, № 5, с. 40 – 46.
4. **Шишков, Г.И.** Широкополосные фиксированные аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011, № 1, с. 110 – 114.
5. **Гильмутдинов, А.Х.** Модели оценки сопротивления пленочных контактов и резисторов с распределенными параметрами / А.Х. Гильмутдинов, Ю.П. Ермолаев. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 76 с.
6. **Седаков, А.Ю., Смолин В.К.** Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления / А.Ю. Седаков, В.К. Смолин. – М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
7. **Лугин, А.Н.** Наноразмерные эффекты в тонкопленочном контакте // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 1. – С. 41–45.
8. **Садков, В.Д.** Моделирование многослойного контакта прецизионного тонкопленочного чип-резистора / В.Д. Садков, Ю.В. Еремеев, П.Н. Старанчук // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 6(110). – С. 14–21.
9. **Ямпурин, Н.П.** Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений / Н.П. Ямпурин [и др.] - Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.



**K.S. Fomina, A.V. Pilkevich, V.D. Sadkov**

**PROCEDURE FOR EVALUATION OF THE MULTILAYER CONTACTS  
RESISTANCE EFFECT ON THE ABSORBING ELEMENT MAIN PARAMETERS**

Nizhny Novgorod State Technical University

A technique is proposed for assessing the effect of the multilayer contacts resistance on the attenuation and input resistance of film absorbing elements for waveguide, coaxial, and microstrip attenuators with planar, end, and covering contacts. An equivalent circuit of such elements is constructed taking into account the resistance of the input, output and grounding contacts. As an example, the contact resistance influence of various technological design contacts on the main parameters of absorbing elements of a size of 2x2x0.5 mm for surface mounting is assessed.

**Keywords:** absorbing element; multilayer contact; covering, planar and end contact; contact resistance; attenuation.

## Секция 8. Проектирование радиоэлектронных устройств ВЧ- и СВЧ- диапазонов

УДК 690.192; 623.624.9

А.И. Казьмин, Д.А. Рябов, П.А. Федюнин

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Представлен новый способ измерения эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериалов. Проведена проверка работоспособности способа путем измерения электрофизических параметров метаматериала из SRR-элементов, с использованием компьютерной электродинамической модели в системе CST Studio suite.

**Ключевые слова:** метаматериал, эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемости, измерение, поверхностная электромагнитная волна.

Метаматериалы – это композитные материалы, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Поскольку метаматериалы являются искусственными материалами и получаются за счет включения в диэлектрический материал (матрицу) искусственного материала (среды), то их электрофизические параметры описываются эффективной диэлектрической  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и магнитной  $\mu_{\text{эф}}$  проницаемостями. Уникальные свойства метаматериалов обусловлены в частности тем, что метаматериалы могут обладать одновременно отрицательными значениями эффективных диэлектрической  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и магнитной проницаемостей  $\mu_{\text{эф}}$ , вследствие чего возникают электромагнитные волны, у которых фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления. В результате возникает отрицательное лучепреломление на границе двух сред (падающий и преломленный лучи лежат по одну и ту же сторону нормали границы раздела сред) [1].

Метаматериалы нашли широкое применение при проектировании радиопоглощающих покрытий (РПП). При этом при приближении к металлической подложке эффективные параметры метаматериала начинают меняться, так как меняется расстояние между включением и его изображением за металлической поверхностью. Именно по этой причине хорошо развитый методический аппарат определения электрофизических параметров материалов с положительными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей оказывается непригодным для решения задач оценки параметров метаматериалов.

В [2] представлен радиоволновый метод контроля параметров диэлектрических покрытий, использующий явление «разлития» поверхностной медленной электромагнитной волны (ПМЭМВ) по плоскости и быстродействующего сканирования результатов взаимодействия поля со слоем покрытия в функциях комплекса электрофизических и геометрических пара-

метров. Рассмотрим адаптацию метода для измерения эффективной диэлектрической  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и магнитной  $\mu_{\text{эф}}$  проницаемостей метаматериалов.

Суть разработанного способа заключается в следующем.

1. В исследуемом метаматериале возбуждают электромагнитную волну с вертикальной поляризацией, падающей на пластинку исследуемого материала под углом к нормали, проведенной вдоль металлической подложки к границе раздела «исследуемый метаматериал - металлическая подложка», последовательно на частотах возрастающих от  $f_i$  до  $f_N$  с дискретным шагом по частоте  $\Delta f$ .

2. Измеряют коэффициент затухания  $\alpha(f_i), \alpha(f_{i+1}), \dots, \alpha(f_N)$  каждой электромагнитной волны над поверхностью исследуемого материала по линии перпендикулярной к его поверхности по ту же сторону нормали к границе раздела «исследуемый метаматериал - металлическая подложка», где находится и падающая электромагнитная волна.

3. Сравнивают коэффициенты затухания с нулевым значением. Если  $\alpha(f_i) > 0$ , то принимают решение о том, что пластинка на частоте  $f_i$  является метаматериалом.

4. Используя два значения коэффициентов затухания на двух рядом расположенных частотах  $\alpha(f_i)$  и  $\alpha(f_{i+1})$ , на которых пластинка является метаматериалом, при условии, что  $(f_{i+1} - f_i) / f_i \ll 1$ , определяют ее значения эффективных диэлектрической  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и магнитной проницаемости  $\mu_{\text{эф}}$ , решая систему из двух дисперсионных уравнений [3]:

$$\begin{cases} q_i \tan(q_i b) - |\varepsilon_{\text{эф}}| \alpha(f_i) = 0 \\ q_{i+1} \tan(q_{i+1} b) - |\varepsilon_{\text{эф}}| \alpha(f_{i+1}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_i$  – поперечное волновое число в слое метаматериала на частоте  $f_i$ ,

$q_i = \sqrt{\left(\frac{2\pi f_i}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}} \mu_{\text{эф}}}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_i}{c}\right)^2 - \alpha^2(f_i)}$ ,  $q_{i+1}$  – поперечное волновое число в слое метамате-

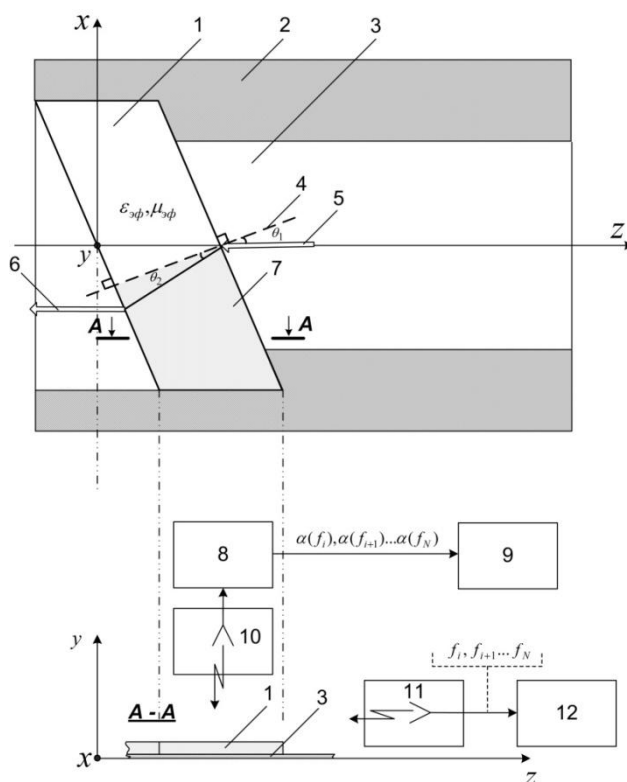
риала на частоте  $f_{i+1}$ ,  $q_{i+1} = \sqrt{\left(\frac{2\pi f_{i+1}}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}} \mu_{\text{эф}}}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_{i+1}}{c}\right)^2 - \alpha^2(f_{i+1})}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – вели-

чина скорости электромагнитных волн в вакууме;  $b$  – толщина метаматериала,  $\varepsilon_{\text{эф}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость,  $\mu_{\text{эф}}$  – эффективная магнитная проницаемость.

На рис. 1 представлен один из возможных вариантов устройства, реализующего предлагаемый способ определения эффективной диэлектрической  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и магнитной  $\mu_{\text{эф}}$  проницаемостей метаматериалов, где цифрами обозначено: 1 – исследуемый материал, 2 – радиопоглощающее покрытие, 3 – металлическая поверхность, 4 – нормаль к границе раздела «металлическая поверхность–исследуемый материал», 5 – падающая электромагнитная волна с вертикальной поляризацией, 6 – преломленная электромагнитная волна, 7 – область над исследуемым материалом для измерения коэффициента затухания поверхностной волны, 8 – блок измерения коэффициентов затухания поля поверхностной электромагнитной волны, 9 – блок пороговой обработки и определения значений эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала, 10 – приемная антенна, 11 – антенна возбуждения электромагнитной волны с вертикальной поляризацией, 12 – генератор СВЧ.

Устройство работает следующим образом. Перед началом проведения измерений в блок пороговой обработки и определения значений эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала 9 вводят толщину исследуемого материала  $b$ .

С помощью генератора СВЧ 12 и антенны возбуждения электромагнитной волны с вертикальной поляризацией 11 вдоль металлической поверхности 3 возбуждают электромагнитную волну с вертикальной поляризацией последовательно, на частотах, возрастающих от  $f_i$  до  $f_N$  с дискретным шагом по частоте  $\Delta f$ . За счет того, что исследуемый материал изготовлен в виде параллелограмма [4,5], электромагнитная волна, дойдя до исследуемого материала, падает под углом  $\theta_1$  к нормали 4 границы раздела «металлическая подложка - исследуемый метаматериал».



**Рисунок 1. Устройство для определения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериалов**

С помощью приемной антенны 10 и блока измерения коэффициентов затухания 8 для каждой частоты производят измерение значений коэффициентов затухания  $\alpha(f_i), \alpha(f_{i+1}), \dots, \alpha(f_N)$  в области 7 над исследуемым покрытием, т.е. со стороны нормали 4, где расположена и падающая электромагнитная волна с вертикальной поляризацией 5.

Измеренные коэффициенты затухания  $\alpha(f_i), \alpha(f_{i+1}), \dots, \alpha(f_N)$  поступают в блок пороговой обработки и определения значений эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала 9. В блоке 9 сравнивают коэффициенты затухания с нулевым значением и если  $\alpha(f_i) > 0$ , то принимают решение о том, что пластинка на частоте  $f_i$  является метаматериалом.

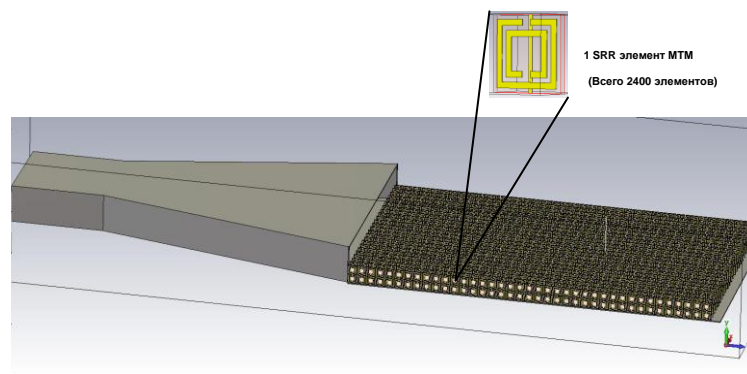
Используя два значения коэффициентов затухания на двух рядом расположенных частотах  $\alpha(f_i)$  и  $\alpha(f_{i+1})$ , на которых пластинка является метаматериалом, при условии, что

$(f_{i+1} - f_i) / f_i \ll 1$ , определяют ее значения эффективных диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{эф}}$  и магнитной проницаемости  $\mu_{\text{эф}}$  решая систему из двух дисперсионных уравнений (1).

Для демонстрации возможностей метода в качестве примера рассмотрим экспериментальные результаты измерения эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей образца метаматериала. В качестве экспериментальных данных использовались коэффициенты ослабления поля ПМЭМВ, получаемые с помощью электродинамической модели распространения ПМЭМВ в метаматериале, реализованной в системе электродинамического моделирования CST Studio suit. Разработанная модель в данной системе электродинамического моделирования позволяет численными методами рассчитать электромагнитное поле ПМЭМВ в метаматериале и, соответственно, его коэффициенты ослабления  $\alpha(f_i)$  [23].

В качестве тестового материала использовался метаматериал на основе SRR-элементов виде узких полосок металла и кольцевых щелевых резонаторов квадратного типа [4,5]. Геометрические параметры метаматериала были подобраны таким образом, что в области частот от 8,9 ГГц до 9,4 ГГц обеспечивались одновременно отрицательные значения эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

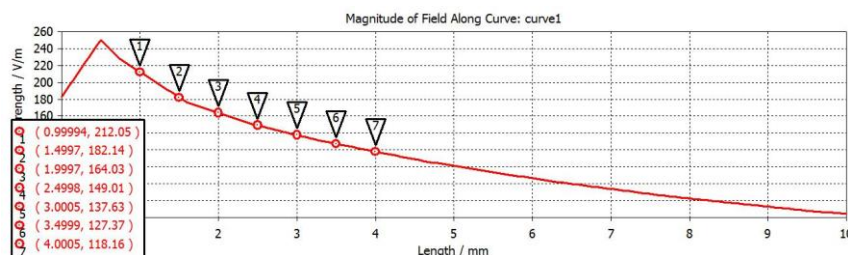
Пластина исследуемого метаматериала состояла из 2400 SRR-элементов. Исследуемая пластина метаматериала показана на рис. 2.



**Рисунок 2. Исследуемая пластина метаматериала**

Проведенное моделирование в системе CST Studio suit показало, что в области частот, где эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости одновременно принимают отрицательные значения, наблюдается возникновение поверхностной электромагнитной волны E-типа.

Это следует из характерного поведения поля – поле экспоненциально затухает перпендикулярно поверхности. Характер поведения напряженности поля поверхностной волны E-типа над метаматериалом показан на рис. 3. Значение коэффициента затухания поля на частоте 9,01 ГГц составляет  $201,7 \text{ м}^{-1}$ .



**Рис. 3 Характер поведения напряженности поля поверхностной волны E-типа над метаматериалом**

Проведено определение эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей по коэффициентам затухания на двух близко расположенных частотах  $f_1 = 9,01$  ГГц и  $f_2 = 9,02$  ГГц. Соответствующие им коэффициенты затухания равны:  $\alpha(f_1) = 201,7$  м<sup>-1</sup> и  $\alpha(f_2) = 194,92$  м<sup>-1</sup>. Значения эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей, полученные путем решения системы (1) имеют отрицательные значения  $\varepsilon_{\text{эф}} = -0,9$  и  $\mu_{\text{эф}} = -2,8$  соответственно

Таким образом, представлен новый способ измерения электрофизических параметров метаматериалов. Проведенные экспериментальные исследования на электродинамической модели показали принципиальную возможность надежной идентификации того, что исследуемый материал является метаматериалом. Также показана возможность одновременного измерения его эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей на основе разработанного способа с приемлемой для практических приложений точностью.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-2009.*

### Библиографический список

1. **Гуляев, Ю.В.** Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения / Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Том. 78. – № 5. – С. 438–457.
2. **Федюнин, П. А.** Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин. – М.: Физматлит, 2013. – 190 с.
3. Fundamental modal properties of surface waves on metamaterial grounded slabs / P. Baccarelli [and etc] // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2005. – vol. 53. – N 4. – pp. 1431–1442.
4. Experimental Study on Several Left-Handed Matamaterials / L. Ran [and etc] // Progress In Electromagnetics Research. – 2005. – Vol. 51. – pp. 249–279.
5. A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain / B.-I. Wu [and etc] // Progress In Electromagnetics Research. – 2005. – vol. 51. – pp. 295–328.

**A.I. Kaz'min, D.A. Ryabov, P. A. Fedyunin**

### MEASUREMENT ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF METAMATERIALS USING SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES

Military Educational and Scientific Center of the Air Force  
«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A new method for measuring the effective values of the dielectric and magnetic permeabilities of metamaterials is presented. The operability of the method was verified by measuring the electrophysical parameters of the metamaterial from SRR elements, using a computer electrodynamic model in the CST Studio suite system.

**Keywords:** metamaterial, effective dielectric and magnetic permeability, measurement, surface electromagnetic wave.

Н.В. Агейчева, Т.Л. Гудина, Ю.А.Светлаков

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАСТИН ИЗ ИОДАТА ЛИТИЯ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается технологический процесс механической (абразивной) обработки пластин из монокристалла иодата лития  $\text{LiIO}_3$  для изготовления пьезопреобразователей линий задержки на объемных акустических волнах. Разработанный технологический процесс обеспечивает получение пластин малой толщины (до 10 мкм) с поверхностями высокой точности формы ( $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,5$ ) и высоким качеством обработки ( $Ra 0,04$ ).

**Ключевые слова:** иодат лития, пьезоэлемент, пьезопреобразователь, линия задержки, шлифование, полирование.

Применение пьезоэлектрических и нелинейно-оптических кристаллов, обладающих высокой эффективностью преобразования и широкой относительной полосой пропускания, позволяет существенно улучшить рабочие характеристики и значительно расширить частотный диапазон различных оптических акустоэлектронных и акустооптических устройств, в частности для задержки и обработки радиосигналов. Подобное применение нашли кристаллы гексагональной модификации иодата лития ( $\alpha\text{-LiIO}_3$ ) [1].

Задачей данной работы являлось получение практических результатов по разработке технологии изготовления пластин из иодата лития для линий задержки на объемных акустических волнах промежуточной частоты. К пластинам предъявлялись следующие технические требования:

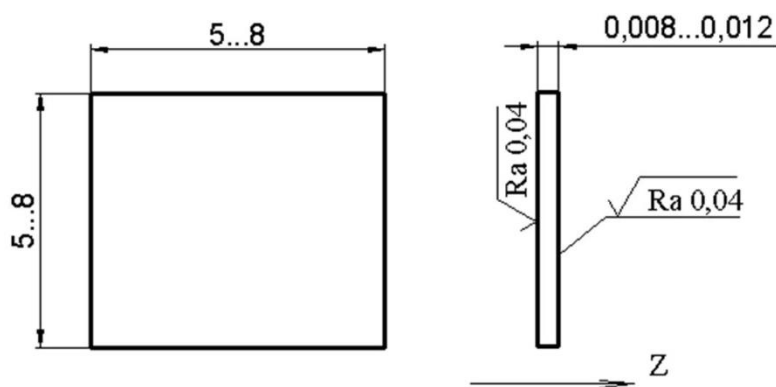
- материал - монокристалл иодата лития ( $\alpha\text{-LiIO}_3$ );
- шероховатость обрабатываемых поверхностей - не хуже  $Ra 0,04$  мкм;
- точность формы поверхностей: допуск на общую ошибку,  $N - 0,5$ ; допуск на местную ошибку,  $\Delta N - 0,5$ .

Дополнительные требования конструкторской документации (КД), обусловленные технологией сборки пьезопреобразователей:

- пластина на операцию сборки должна поступать наклеенной на технологическую подложку;
- размеры и качество обработки пластины должны обеспечивать получение хотя бы одного пьезоэлемента, показанного на рисунке.

Анализируя технические требования, предъявляемые к деталям (пьезоэлементам) из иодата лития, можно отметить, что особенностью их изготовления является получение деталей очень малой толщины (8–12 мкм) с поверхностями высокой точности формы ( $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,5$ ) и высоким качеством обработки ( $Ra 0,04$ ). Это привело к необходимости исследования способов и условий технологического крепления деталей, обеспечивающих необходимую точность их базирования при абразивной обработке; выбору оптимального инструмен-

та, обработке технологических режимов, обеспечивающих необходимую точность и качество обработки поверхностей.



Ось Z - главная оптическая ось

### Пьезоэлемент

Известно, что кристалл иодата лития является хрупким, а также гигроскопичным и водорастворимым материалом [1], что накладывает определенные ограничения на изготовление деталей из него. В связи с особыми свойствами кристалла иодата лития были сформулированы специальные требования, которые необходимо соблюдать в процессе изготовления пьезоэлементов:

- при обработке кристалл и изделия из него не должны соприкасаться с водой и водосодержащими растворами, все работы персоналом необходимо производить в резиновых перчатках или напальчниках [2];

- не допускать хранения кристалла и изделий из него на открытом воздухе: межоперационное хранение кристалла и изделий из него производить в эксикаторах с силикагелем [2]; более длительное хранение (более двух часов) – в запаянных полиэтиленовых пакетах в эксикаторах с силикагелем.

В процессе работы в качестве заготовки использовался монокристалл иодата лития  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub>, с базовым Z-срезом, сориентированным перпендикулярно главной оптической оси кристалла.

В результате работы был разработан технологический маршрут механической обработки пластин из иодата лития для получения пьезоэлементов, который включает в себя следующие основные операции [3]:

1. Резка (резка кристалла на пластины в технологический размер по толщине на станке для резки кристаллов с применением полосовых пил с алмазоносным покрытием).
2. Шлифовальная (предварительное шлифование заготовок с двух сторон поочередно для достижения плоскопараллельности обрабатываемых поверхностей заготовки и создания надежных технологических баз для последующих операций).
3. Шлифовально-полировальная (окончательная обработка одной стороны пластины с обеспечением требуемой шероховатости и точности формы поверхности).
4. Шлифовально-полировальная (окончательная обработка второй стороны с обеспечением требуемых толщины пластины, шероховатости и точности формы обрабатываемой поверхности).

На операции резки кристалл разрезается на пластины в технологический размер по толщине примерно 2,0 мм на станке для резки кристаллов ВО-732В с применением полосовых



пил с алмазонасным покрытием. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при обработке применяется этиленгликоль по ГОСТ 10164-75. Выбор толщины отрезаемых пластин обусловлен необходимостью сведения к минимуму деформации заготовок в процессе обработки, а также гарантированного удаления дефектных (нарушенных в процессе обработки) слоев материала, образующихся в процессе шлифовки и полировки поверхностей.

Кристалл иодата лития наклеивается на плоскопараллельное стекло плоскостью, параллельной главной оптической оси  $Z$  (см.рис. 1) монокристалла, после чего склеенный блок устанавливается на станок так, чтобы ось  $Z$  кристалла была перпендикулярна режущим кромкам полосовых пил.

Операция предварительного шлифования предназначена для достижения плоскопараллельности обрабатываемых поверхностей заготовки и создания надежных технологических баз для последующих операций. Обработка заготовки производится с двух сторон поочередно на шлифовально-полировальном станке ШПН-1 с последовательным применением алмазных порошков АСМ 28/20 и АСМ 14/10. В качестве притира используется латунный шлифовальник. На операции заготовка наклеивается на технологическую подложку очищенным пчелиным воском.

На следующей операции производится окончательная обработка одной поверхности пластины с обеспечением требуемой шероховатости и точности формы. Обработка производится на станке ШПН-1 с последовательным применением алмазных порошков АСМ 10/7, АСМ 7/5 и АСМ 5/3 на стеклянном шлифовальнике и порошков АСМ 3/2, АСМ 1/0, АСМ 0,7/0 на смоляном полировальнике.

На заключительной операции производится окончательная обработка второй стороны до получения необходимой толщины пластины и качества обработанной поверхности.

Обработка производится на станке ШПН-1 с последовательным применением тех же алмазных порошков, что и на предыдущей операции. При полировании в качестве притира вместо смоляного полировальника используется стеклянный шлифовальник, на поверхность которого натянута тонкая ткань (батист). Выбор батиста в качестве материала полировальника обусловлен тем, что исключается «прилипание» пластины к полировальнику, что имеет место при обработке на смоляном полировальнике. Низкая механическая прочность обрабатываемой пластины (при толщине менее 0,1 мм) при обработке на смоляном полировальнике приводит к ее разрушению на заключительных этапах обработки.

Перед операцией заготовка наклеивается очищенным пчелиным воском на технологическую подложку стороной, обработанной на предыдущей операции, при этом обеспечивается толщина слоя пчелиного воска - не более 0,002 мм. В качестве технологической подложки на операциях шлифования и полирования применяется плоскопараллельное стекло, имеющее плоскостность обработанных поверхностей не более  $N=2$ .

В качестве жидкой фазы суспензии алмазных порошков на всех операциях используется этиленгликоль. От абразивной суспензии пластины промываются этиленгликолем и этиловым спиртом, а от пчелиного воска, используемого в качестве наклеечного состава (для крепление заготовок на оснастку), – нефрасом.

Выбор этиленгликоля, представляющего собой двухатомный спирт и обладающего свойствами одноатомных спиртов [4], в качестве жидкой фазы суспензии алмазных порошков на операциях шлифования и полирования, а также в качестве СОЖ на операции резки, обусловлен следующими факторами:

- при обработке кристалл иодата лития не должен соприкасаться с водой и водосодержащими растворами;
- кристалл нерастворим в спиртах [1];

- этиленгликоль обладает оптимальной вязкостью, позволяющей при шлифовании и полировании кристалла создавать несжимаемый слой в зазоре между притираемыми поверхностями, уменьшая глубину врезания зерен в обрабатываемый материал (иодат лития обладает относительно малой твердостью (по Моосу – 4) [2]), что способствует оптимизации процесса полирования, особенно на заключительных стадиях обработки.

Нагрев заготовки и технологической подложки при наклейке до температуры плавления пчелиного воска ( $70\pm 5$ ) °С и охлаждение до комнатной температуры производится в сушильном шкафу с целью равномерного изменения температуры по объему заготовки и технологической подложки. Тем самым исключается воздействие на них термических ударов и, как следствие, появление внутренних механических напряжений в обрабатываемой пластине, приводящих к изменению формы или к разрушению заготовок.

В результате проведенной работы была разработана технологическая инструкция «Механическая обработка пластин из монокристалла иодата лития для получения пьезоэлементов», позволяющая изготавливать пластины с заданными техническими характеристиками [5].

### Выводы

Разработанный технологический процесс позволяет обрабатывать пластины из монокристалла иодата лития в полном соответствии с предъявляемыми техническими требованиями. Результаты работы позволили расширить возможности технологической базы [6] «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» для технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ устройств [7], в частности размерной обработки пластин малой толщины из кристаллических материалов, в том числе для линий задержки на объемных акустических волнах.

### Библиографический список

1. **Авдиенко, К.И.** Иодат лития. Выращивание кристаллов, их свойства и применение / К.И. Авдиенко [и др.] // Новосибирск: Наука. – 1980. - 160 с.
2. **Бубис, И.Я.** Справочник технолога-оптика: Справочник / И.Я. Бубис [и др.]; под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1983. - 414 с.
3. **Светлаков, Ю.А.** Разработка технологий механической обработки деталей из твердых хрупких неметаллических материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. - №1 (90). -С. 46-51.
4. **Павлов, Б.А.** Курс органической химии. / Б.А. Павлов, А.П. Терентьев // М.: Издательство «Химия». - 1965. - 688 с.
5. **Агейчева, Н.В.** Технология изготовления пластин малой толщины из иодата лития для пьезопреобразователей линий задержки / Н.В. Агейчева, Т.Л. Гудина, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. - № 1 (26). -С. 74-77.
6. **Светлаков, Ю.А.** Формирование технологической базы при технологическом обеспечении проектирования и изготовления СВЧ устройств / Ю.А.Светлаков // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. - № 4. - С. 30-36.
7. **Козлов, В.А.** Развитие структуры технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых радиоэлектронных систем / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Проектирование и технология электронных средств. - 2018. - № 3. - С. 23-29.

**N.V. Ageycheva, T.L. Gudina, Yu.A. Svetlakov**

**THE MANUFACTURING TECHNIQUE OF THE PLATES FROM LITHIUM IODATE  
FOR PIEZOELECTRIC ELEMENTS OF CONVERTERS OF DELAY LINES**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

Features of the technological process of manufacturing of the piezoelectric elements of the small thickness from lithium iodate for converters of delay lines at volumetric acoustic waves are considered. The developed technological process provides production of plates of small thickness (to 10 microns) with surfaces of high precision of a form ( $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,5$ ) and high quality of processing ( $Ra 0,04$ ).

**Key words:** lithium iodate, piezoelectric elements, line of delay, grinding, polishing.

Н.В. Агейчева, Т.Л. Гудина, Ю.А.Светлаков

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО И ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ДЛЯ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Рассматриваются технологические процессы механической (абразивной) обработки деталей из кварцевого и оптического стекла, применяемых в конструкциях линий задержки ВЧ сигналов на объемных акустических волнах. Разработанные технологические процессы обеспечивают получение деталей с поверхностями высокой точности формы ( $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,5$ ) и высоким качеством обработки ( $Ra 0,04$ ).

**Ключевые слова:** линия задержки, шлифование, полирование, алмазная резка, звукопровод, поглотитель, стекло кварцевое, стекло оптическое.

В состав линий задержки на объемных акустических волнах для ВЧ блоков входят детали из стекла – поглотители и звукопроводы. В качестве материалов для изготовления этих деталей используются кварцевое стекло КВ ГОСТ 15130-86 и стекло оптическое Ф4 ГОСТ 3514-94. Целью данной работы являлась разработка технологий механической (абразивной) обработки звукопроводов и поглотителей, к которым предъявлялись следующие основные технические требования:

- шероховатость обрабатываемых поверхностей: торцевых – не хуже  $Ra 0,04$  мкм; остальных –  $Ra 0,63$  мкм;
- точность формы торцевых поверхностей: допуск на общую ошибку,  $N = 0,5$ ; допуск на местную ошибку,  $\Delta N = 0,5$ .

Типовые представители обрабатываемых деталей, входящих в конструкцию линий задержки, представлены на рис. 1 (поглотители) и рис. 2 (звукопроводы). Из рисунков видно, что данные детали имеют достаточно сложную конфигурацию, включающую в себя элементы конусных и сферических поверхностей.

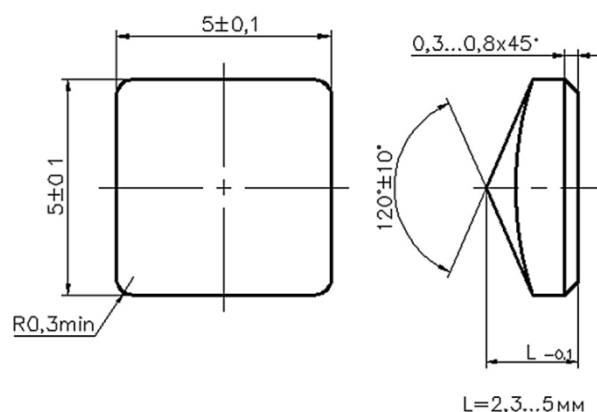
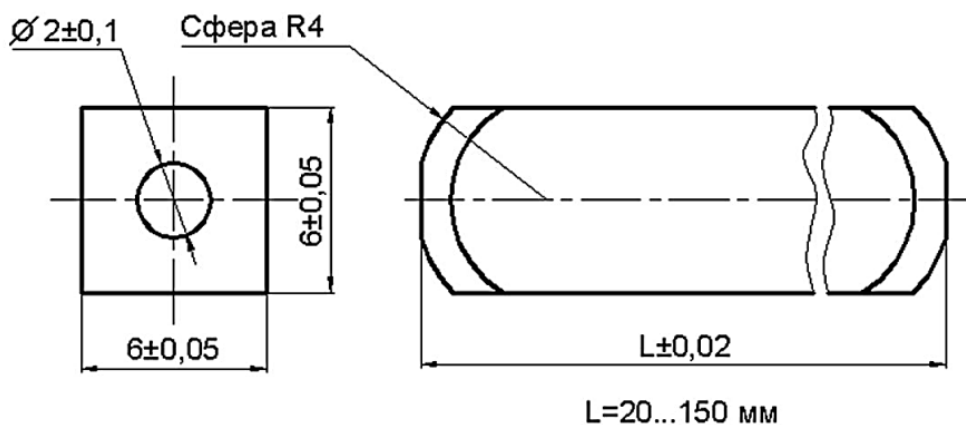


Рисунок 1. Поглотитель



**Рисунок 2.Звукопровод**

Особенностью механической обработки данных деталей является получение поверхностей с высокой точностью размеров, формы и высоким качеством обработки.

В результате проведенных экспериментальных работ были разработаны технологические процессы, которые позволяют изготавливать детали в соответствии с перечисленными требованиями [1]. Маршрут технологического процесса механической обработки поглотителей (см. рис. 1) состоит из следующих основных операций [2]:

1. Резка. Резка заготовки в технологический размер.
2. Шлифовальная. Шлифование боковых поверхностей заготовок с четырех сторон в размер согласно чертежу.
3. Шлифовальная. Шлифование конической поверхности в размер согласно чертежу.
4. Шлифовальная. Предварительное шлифование торцевых поверхностей в технологический размер с припуском под плоское шлифование и полирование.
5. Шлифовально-полировальная. Плоское шлифование и полирование торцевых поверхностей в размер L (см. рис. 1) согласно чертежу.

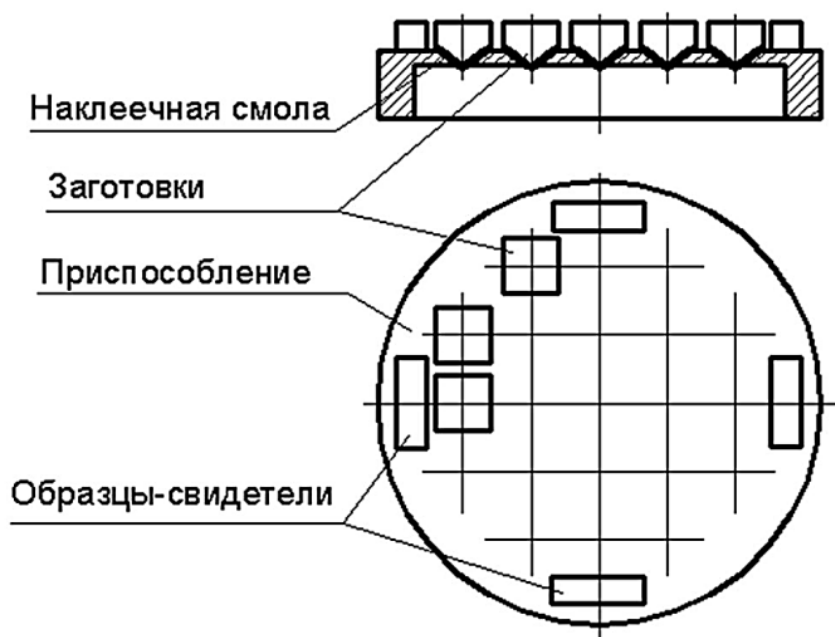
Операция резки заготовок по габаритам в технологические размеры с припуском под последующие операции производится на станке модели 3А-64Д алмазным кругом формы АОК на металлической связке. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) применяется 3 % раствор кальцинированной соды в воде.

Шлифование боковых поверхностей заготовок с четырех сторон поочередно в размер согласно чертежу производится на шлифовально-полировальном станке модели ЗШП-350М свободным абразивом - суспензиями абразивных порошков из белого электрокорунда последовательно с уменьшением зернистости до обеспечения заданных размеров и шероховатости обработанных поверхностей. Обработка заготовок производится в блоке, при этом заготовки наклеиваются на планшайбу наклеичной смолой, изготовленной из пчелиного воска и канифоли. После шлифования двух противоположных граней заготовок третью грань шлифуют, обрабатывая заготовки по одной штуке, без наклейки на планшайбу, постоянно контролируя перпендикулярность к уже обработанным двум параллельным граням. При шлифовке четвертой грани заготовки вновь обрабатываются блоком. В качестве притира на всех операциях шлифования используется латунный шлифовальник.

Шлифование конической поверхности поглотителей в размер согласно чертежу производится на круглошлифовальном станке модели 3А10П алмазным кругом на металлической связке формы 1А1. В качестве СОЖ применяется 3 % раствор кальцинированной соды в воде. Шлифование конуса производится с одновременным поворотом передней и шлифоваль-

ной бабок станка. Для крепления заготовок в передней бабке станка используется специальное приспособление.

Предварительное шлифование торцевых поверхностей, предназначенное для снятия основной части припуска, необходимого для крепления и базирования заготовок на предыдущей операции, производится на шлифовально-полировальном станке модели ЗШП-350М суспензией порошка из белого электрокорунда зернистостью F320. На данной и последующих операциях заготовки крепятся в специальном приспособлении. Схема крепления (наклейки) заготовок на приспособление приведена на рис. 3.



**Рисунок 3. Схема наклейки заготовок поглотителей**

Данное приспособление позволяет обрабатывать группу заготовок с обеспечением точности формы торцевых поверхностей и их перпендикулярности осям деталей.

Шлифование торцевых поверхностей поглотителей в размер с припуском под полировку производится на шлифовально-полировальном станке модели ШПН-1 суспензиями порошков из белого электрокорунда с последовательным (от перехода к переходу) снижением зернистости применяемых порошков. Полирование производится абразивной суспензией оптипола ТУ 328-96. В качестве полировальника используется смоляной полировальник. Контроль линейного размера L (см. рис. 1) производится с помощью микроскопа УИМ-23, контроль шероховатости торцевых полированных поверхностей производится на образцах-свидетелях (см. рисунок 3), обработанных в блоке совместно с поверхностями деталей.

Маршрут технологического процесса механической обработки звукопроводов (см. рис. 2) состоит из следующих основных операций [2]:

1. Резка. Резка заготовок в технологический размер.
2. Шлифовальная. Шлифование боковых поверхностей заготовок с четырех сторон в размер согласно чертежу.
3. Шлифовальная. Предварительное шлифование торцевых поверхностей с двух сторон поочередно в технологический размер с припуском под плоское шлифование и полирование.

4. Шлифовально-полировальная. Плоское шлифование и полирование торцевых поверхностей с двух сторон поочередно в размер L (см. рис. 2) согласно чертежу.

5. Шлифовальная. Шлифование сферических поверхностей в размер согласно чертежу.

Операции резки, шлифования и полирования боковых и торцевых поверхностей в данном технологическом процессе аналогичны операциям рассмотренного ранее технологического процесса обработки поглотителей. Указанные операции производятся на том же оборудовании, с применением тех же приемов обработки, оснастки и инструмента и принципиально ничем не отличаются. Исключение составляет применяемая специальная оснастка для крепления в обрабатываемый блок звукопроводов при шлифовании и полировании торцев. Эта оснастка позволяет обрабатывать группу звукопроводов и обеспечивает точность формы обрабатываемых торцевых поверхностей и их перпендикулярность боковым поверхностям.

Шлифование сферической поверхности звукопроводов производится на шлифовально-полировальном станке ШПН-1 с применением абразивных порошков из белого электрокорунда различных зернистостей. Обработка ведется по одной заготовке с помощью притиров, наклеиваемых на планшайбу станка. Притиры, изготовленные из латуни, имеют форму чашек с различными радиусами рабочей поверхности. Обработка ведется последовательно, начиная с притира с наибольшим радиусом и порошка с наибольшей зернистостью [3]. Для защиты полированной поверхности звукопроводов от повреждений перед обработкой на нее наносится специально разработанная защитная композиция на основе битумного лака, обладающая хорошими адгезионными свойствами, выдерживающая полный цикл обработки на данной операции и легко удаляющаяся ацетоном.

### Выводы

Разработанные технологические процессы позволяют изготавливать детали типа звукопроводы и поглотители из кварцевого и оптического стекла для линий задержки на объемных акустических волнах в полном соответствии с предъявляемыми техническими требованиями. Результаты работы позволили расширить возможности технологической базы [4] «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», для технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ устройств [5], в частности размерной обработки деталей из кварцевого и оптического стекла для линий задержки.

### Библиографический список

1. **Светлаков, Ю.А.** Разработка технологий механической обработки деталей из твердых хрупких неметаллических материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. - №1 (90). - С. 46-51.

2. **Агейчева, Н.В.** Технология механической обработки деталей из кварцевого и оптического стекла для линий задержки/ Н.В. Агейчева, Т.Л. Гудина, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. - № 1 (26). -С. 78-81.

3. **Бубис, И.Я.** Справочник технолога-оптика: Справочник/ И.Я. Бубис [и др.]; под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1983. - 414 с.

4. **Светлаков, Ю.А.** Формирование технологической базы при технологическом обеспечении проектирования и изготовления СВЧ устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. - № 4. - С. 30-36.

5. **Козлов, В.А.** Развитие структуры технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых радиоэлектронных систем / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Проектирование и технология электронных средств. - 2018. - № 3. - С. 23-29.

**N.V. Ageycheva, T.L. Gudina, Yu.A. Svetlakov**

**TECHNOLOGY OF PROCESSING OF THE PARTS FROM QUARTZ  
AND OPTICAL GLASS FOR DELAY LINES**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

Features of the technology of mechanical (abrasive) processes of manufacturing of the acoustic ducts and the absorbers from quartz or optical glass for delay lines at volumetric acoustic waves are considered. The developed technological process provides production of parts with surfaces of high precision of a form ( $N=0,5$ ;  $\Delta N=0,5$ ) and high quality of processing ( $Ra 0,04$ ).

**Keywords:** quartz glass, optical glass, line of delay, grinding, polishing, volumetric acoustic waves.



Л.И. Бакина, Л.А. Хасянова, В.А. Шипулина, В.Л. Зефиров

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛАСТИЧНОГО ТЕРМОСТОЙКОГО КЛЕЯ-КОМПАУНДА

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

В статье представлены результаты работы по исследованию эластичного термостойкого клея-компаунда для крепления радиопрозрачных вставок к корпусам антенн. Проведена оценка технологических свойств и прочностных показателей клеевых соединений, а также исследована стойкость к воздействию климатических испытаний и повышенной температуры.

**Ключевые слова:** склеивание, крепление элементов изделий, эластичный клей, термостойкий клей, термоудар, КЛТР, антенно-фидерные системы.

Для защиты антенно-фидерных систем бортовой сверхвысокочастотной (СВЧ) аппаратуры от воздействия высоких температур и других эксплуатационных факторов применяются радиопрозрачные вставки (РПВ) из специальных композиционных материалов. Наиболее часто крепление РПВ в изделия производят с помощью термостойких клеевых композиций. Выбор таких клеев представляется непростой задачей. Достаточно часто наряду с термостойкостью клей должен обладать рядом других специальных свойств, а именно способностью отверждаться при невысоких температурах и давлениях, не выделять в процессе отверждения летучих продуктов, иметь высокие физико-технические характеристики не только в исходном состоянии, но и сохранять их не ниже требуемых после проведения ряда испытаний, а также быть эластичным (этим свойством крайне редко обладают термостойкие клеевые композиции) и пригодным для соединения материалов с сильно отличающимися значениями КЛТР. Благодаря эластичности термостойкие клеевые композиции должны выдерживать воздействие вибрационных, ударных нагрузок, термоударов, обеспечивая тем самым работоспособность изделия [1, 2].

Целью данной работы являлся подбор и исследование термостойкого эластичного быстротверждаемого клея-компаунда, отвечающего следующим требованиям:

- теплостойкость клея не ниже 500 °С (кратковременно до 10 мин);
- предел прочности при разрыве ( $f_p$ ) не менее 2 МПа;
- относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon$  %) не менее 5 %;
- стойкость к воздействию термоциклов (от минус 60 до 70) °С с выдержкой при каждой температуре в течение 1 часа и климатических факторов, имитирующих хранение длительностью до 20 лет.

На основании проработки литературных источников, действующих ТУ и консультаций с разработчиками термостойких клеев, для решения поставленной задачи был выбран термостойкий клей марки ТКС-500 (ООО НПК «СТЭП» г. С-Петербург) [3] на основе эпоксидной смолы, модифицированной каучуком и кремнийорганическими добавками. Он характеризуется высокой прочностью и наличием эластичности, предназначен для склеивания металлических и неметаллических материалов в различных сочетаниях.

Технологические свойства термостойкого клея ТКС-500 оценивались в ходе отработки технологии его приготовления. По результатам проведенных экспериментов было установлено:

- клей готовится из трех компонентов:

а) компонент 1 – смола ТКС-500,

б) компонент 2 – отвердитель,

в) компонент 3 – наполнитель;

- клей обладает хорошей технологической вязкостью равной 7 по методу круга и смачивающей способностью, что обеспечивает удобное нанесение на склеиваемые поверхности;

- клей имеет плотность 1,2 г/см<sup>3</sup>;

- жизнеспособность клея при точном соотношении компонентов составляет не менее 1 ч;

- клей не требует открытой выдержки после его нанесения на поверхность;

- клей имеет два режима отверждения:

- «холодный» режим отверждения – 72 ч. при температуре от плюс 15 до плюс 35 °С;

- «горячий» режим отверждения – 5-6 ч. при температуре от плюс 15 °С до плюс 35 °С, затем 6-7 ч. при температуре от плюс 60 °С до плюс 70 °С.

В ходе выполнения работы были проведены исследования прочностных показателей клея ТКС-500, а именно:

- предел прочности при отрыве ( $\sigma_{отр}$ ) для пары материалов Д16А+Д16А с одинаковым значением КЛТР и для пары материалов с различными значениями КЛТР Д16А+Титан (ВТ1-0);

- предел прочности при сдвиге ( $\tau_{сдв}$ ) для пары материалов Д16А+Д16А, Ст3+Ст3.

Физические характеристики клея были исследованы:

- в исходном состоянии;

- после воздействия 10 термоциклов (минус 60 - плюс 70) °С по ГОСТ 14760 и по ГОСТ 14759;

- после воздействия климатических испытаний, имитирующих 20-ти летнее хранение;

- воздействия температуры 500 °С в течение 10 минут.

Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1**

**Прочностные показатели ( $\sigma_{отр}$ ) термостойкого клея ТКС-500 до и после комплекса испытаний для пары материалов Д16А+Д16А и Д16А+ВТ1-0**

Показатели	№образца	Показатели статистической обработки	Измеренные значения показателей			
			Исходные значения	После 10-ти термоциклов -60+70°С	После климатических испытаний	После воздействия 500 °С в течение 10 минут
$\sigma_{отр}$ Д16А+Д16А	1		22,9	24,6	29,2	6,9
	2		26,3	24,4	26,6	7,2
	3		22,4	17,5	27,8	7,8
	4		27,1	24,2	28,0	5,6
	5		25,9	25,5	27,3	7,5
	6		24,0	22,6	26,0	6,7
		ср	24,8	23,1	27,5	7,0
$\sigma_{отр}$ Д16А+ВТ1-0	1		26,0	29,0	25,6	1,3
	2		26,3	25,8	26,9	1,6
	3		29,0	24,2	24,1	1,1
	4		28,7	28,4	25,2	2,0
	5		24,9	22,9	24,8	1,2
	6		30,7	25,2	21,5	1,1
		ср	27,6	25,9	24,7	1,4

где: ср – среднее арифметическое значение.

**Прочность при сдвиге ( $\tau_{сдв}$ ) термостойкого клея ТКС-500 до и после комплекса испытаний для пары материалов Д16А+Д16А и Ст3+Ст3**

Показатели	№ образца	Показатели статистической обработки	Измеренные значения показателей			
			Исходные значения	После воздействия 10-ти термоциклов 60+70°C	После климатических испытаний	После воздействия 500 °С в течение 10 минут
$\tau_{сдв}$ Д16А+Д16А	1		15,1	11,4	19,7	1,1
	2		15,4	12,1	15,7	1,0
	3		15,6	12,2	20,2	1,1
	4		17,8	12,7	17,6	1,2
	5		14,9	12,5	16,6	0,8
	6		14,2	14,0	16,5	1,1
		ср		15,5	15,2	17,7
$\tau_{сдв}$ Ст3-Ст3	1		18,4	15,2	18,1	9,7
	2		17,3	16,2	17,6	14,0
	3		17,7	15,7	16,6	11,8
	4		15,7	17,7	18,3	6,8
	5		17,1	16,8	17,0	4,4
	6		17,0	16,9	17,1	10,2
		ср		17,2	16,4	17,4

где: ср – среднее арифметическое значение.

Как следует из полученных результатов (табл. 1, 2), значения показателей прочности ( $\sigma_{отр}$ ), ( $\tau_{сдв}$ ) после воздействия знакопеременных температур (минус 60 -плюс 70) °С, а также после климатических испытаний, изменяются незначительно по сравнению с исходными значениями и составляют:

- ( $\sigma_{отр}$ ) Д16А+Д16А (исх. зн. 24,8 МПа – после т/ц 23,1 МПа – после клим. исп. 27,5 МПа);
- ( $\sigma_{отр}$ ) Д16А+ВТ1-0 (исх. зн. 27,6 МПа – после т/ц 25,9 МПа – после клим. исп. 24,7 МПа);
- ( $\tau_{сдв}$ ) Д16А+Д16А (исх. зн. 15,5 МПа – после т/ц 15,2 МПа – после клим. исп. 17,7 МПа);
- ( $\tau_{сдв}$ ) Ст3-Ст3 (исх. зн. 17,2 МПа – после т/ц 16,4 МПа – после клим. исп. 17,4 МПа).

Стойкость к воздействию термоциклов клея ТКС-500 подтверждается и коэффициентом сохранения свойств (К), вычисляемого с точностью 0,1 по формуле:  $K=A_1/A$ , где  $A_1$ – значение показателя после испытаний;  $A$  – значения показателя в исходном состоянии.

В данном случае коэффициент К близок к 1, как для материалов с одинаковыми значениями КЛТР Д16А+Д16А, так и для материалов с разными значениями КЛТР Д16А+ВТ1-0, что является косвенным подтверждением эластичности клея ТКС-500.

Стоит отметить, что наиболее жестким видом испытаний является циклическое воздействие температур, особенно опасен перепад в сторону низких температур, поскольку жесткость клея и перенапряжения в клеевом слое возрастают, тогда как при переходе к повышенным температурам напряжения снижаются. Время переноса из камеры тепла в камеру холода мало и составляет не более 3 мин. Чем меньше время перепада температур при термоциклировании, тем в меньшей степени успевают отрелаксировать напряжения, возникающие в клее-

вом соединении. По мере увеличения числа циклов утомляемость клея возрастает. Все это может вызвать разрушение клеевого соединения.

Однако, в нашем случае данное явление не наблюдается, значения показателей  $\sigma_{отр}$  и  $\tau_{сдв}$  практически не изменились для всех видов клеевых соединений с одинаковыми значениями КЛТР и с разными значениями КЛТР, что позволяет сделать вывод о высокой степени адгезии клея ТКС-500 к исследованным парам материалов и о стабильности показателей  $\sigma_{отр}$  и  $\tau_{сдв}$  в ходе проведения климатических испытаний.

Воздействие температуры 500 °С изменяет величины показателей  $\sigma_{отр}$  и  $\tau_{сдв}$ . (наблюдается их снижение). Причиной снижения значений  $\sigma_{отр}$  и  $\tau_{сдв}$  являются структурные изменения, происходящие в клеевой композиции под действием высокой температуры.

Также были проведены исследования условной прочности при растяжении ( $f_p$ ) и относительного удлинения при разрыве ( $\epsilon$ , %).

Эти показатели оценивались на образцах в виде «лопаток» по ГОСТ 11262. Метод определения  $f_p$  и  $\epsilon$ ,% заключается в растяжении образца с постоянной скоростью до разрыва с последующим измерением усилия и удлинения образца в момент разрыва.

Оценка данных показателей проводилась на четырех стадиях: в исходном состоянии, после воздействия 10 термоциклов (минус 60 плюс 70) °С, после проведения климатических испытаний, имитирующих хранение в течение 20 лет, а также после воздействия температуры 500 °С в течение 10 минут. Полученные результаты представлены в табл. 3.

**Таблица 3**

**Условная прочность при растяжении ( $f_p$ ), относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon$ ) клея ТКС-500 до и после комплекса испытаний**

Показатели	№ образца	Показатели статистической обработки	Измеренные значения показателей			
			Исходные значения	После 10-ти термоциклов	После климатических испытаний	После воздействия 500°С - 10 мин
$f_p$ МПа	1		14,6	14,7	15,9	16,8
	2		14,2	14,0	17,5	17,3
	3		15,0	14,0	18,9	18,9
	4		14,5	13,9	19,5	19,6
	5		14,2	14,3	16,5	16,2
	6		14,6	14,1	18,4	18,2
			16,2	14,0	17,3	18,5
			ср	14,8	14,1	17,7
$\epsilon$ %	1		7	6	12	9
	2		6	6	10	7,5
	3		5	7	7	5,5
	4		8	6	8	11,5
	5		6	6	4	6
			6	6	6	8
	6		6	6	8	8
			6	7	6	8,5
	ср	6%	6%	8%	8%	

где: ср – среднее арифметическое значение.

Представленные в табл. 3 результаты по термостойкому клею ТКС-500 подтверждают стабильность показателей условной прочности при растяжении ( $f_p$ ) и относительного удлинения в момент разрыва ( $\epsilon$  %) в ходе всего комплекса испытаний, что свидетельствует о высокой и стабильной эластичности клея, то есть способности отвержденного клеевого слоя испытывать значительные упругие деформации:

$(f_{p \text{ исх}}) \quad 14,8 \text{ МПа} \rightarrow (f_{p \text{ после т/ц}}) \quad 14,1 \text{ МПа} \rightarrow (f_{p \text{ после кл.исп.}}) \quad 17,7 \text{ МПа} \rightarrow$   
 $(f_{p \text{ после } 500^\circ\text{C}}) \quad 17,9 \text{ МПа}.$   
 $(\epsilon \% \text{ исх}) \quad 6 \% \rightarrow (\epsilon \% \text{ после т/ц}) \quad 6 \% \rightarrow (\epsilon \% \text{ после кл.исп.}) \quad 8 \% \rightarrow (\epsilon \% \text{ после } 500^\circ\text{C}) \quad 8 \%.$

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод не только о стойкости клеевых соединений на клею ТКС-500 к воздействию знакопеременных температур, но и его достаточной эластичности, обеспечивающей релаксацию клеевого шва в ходе испытаний и сохраняемость клеевых соединений материалов с большой разницей КЛТР.

Проведенный комплекс испытаний и полученные результаты подтверждают универсальность термостойкого клея ТКС-500, а именно, способность склеивать широкий круг материалов и сохранять функциональные свойства в заданных границах в пределах определенного времени.

### Выводы

На основе анализа литературных источников для решения поставленной задачи выбран термостойкий клей с повышенной эластичностью марки ТКС-500.

Исследованы технологические и физико-механические свойства клея ТКС-500.

Определены режимы отверждения клея ТКС-500:

- «холодный» режим отверждения: 72 часа при температуре 15-35 °С;

- «горячий» режим отверждения: 2-3 часа при температуре 15-35 °С, затем 6-7 часов при температуре 60-70 °С.

Проведена оценка физико-технических характеристик клея до и после комплекса испытаний (склеиваемые материалы Д16А+Д16А, Д16А+ВТ1-0, Ст3+Ст3).

Установлено полное соответствие характеристик клея ТКС-500 всем предъявляемым требованиям. Комплекс проведенных исследований убедительно указывает на достаточность эластичности клея ТКС-500 для склеивания материалов с большой разницей КЛТР и стабильность свойств клеевых соединений в условиях воздействия климатических и температурных факторов.

### Библиографический список

1. **Малышева, Г.В.** Склеивание в машиностроении / Г.В. Малышева. - М.: Наука и технологии, 2005.
2. **Петрова, А.П.** Термостойкие клеи / А.П. Петрова. - М: Химия, 1992.
3. Клей марки ТКС-500. Технические условия ТУ АДИ 495-2000.

**L.I. Bakina, V.L. Zepirov, L.A. Khasyanova, V.A. Shipulina**

## **RESEARCH OF ELASTIC HIGH-TEMPERATURE ADHESIVE COMPOUND**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

This article comprises research outcomes for elastic high-temperature adhesive compound used for attachment of radio-transparent inserts to antenna encasements, including data on evaluation of technological properties and strength values of adhesive bondings with findings on heat and climate tests exposure resistance.

**Keywords:** adherence, item parts attachment, elastic adhesive, high-temperature adhesive, thermal shock, CLTE, antenna feeder system.

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР СВЧ ДИАПАЗОНА  
С МАГНИТНОЙ СВЯЗЬЮ РЕЗОНАТОРОВ**<sup>1</sup>АО «НПП «Салют-27», <sup>1</sup>НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Рассмотрены способы построения дифференциальных полосно-пропускающих фильтров (ДППФ) полосковой конструкции на основе разомкнутых петлевых резонаторов. Такие фильтры, включаемые на входе приемного тракта, при балансировке позволяют подавлять синфазные помехи. Показано, что распространенные на практике конструкции ДППФ с электрической связью резонаторов не обеспечивают необходимые характеристики подавления. Для их улучшения требуется применение сосредоточенных или распределенных элементов настройки, что усложняет конструкцию фильтра и его регулировку. Предложена конструкция ДППФ со связью резонаторов по магнитному полю, обеспечивающая высокое подавление синфазного сигнала без дополнительных элементов настройки. Вследствие простоты топологии резонаторов, они легко каскадируются для получения фильтров высокого порядка.

**Ключевые слова:** дифференциальный фильтр, подавление синфазного сигнала, электрическая связь резонаторов, магнитная связь резонаторов.

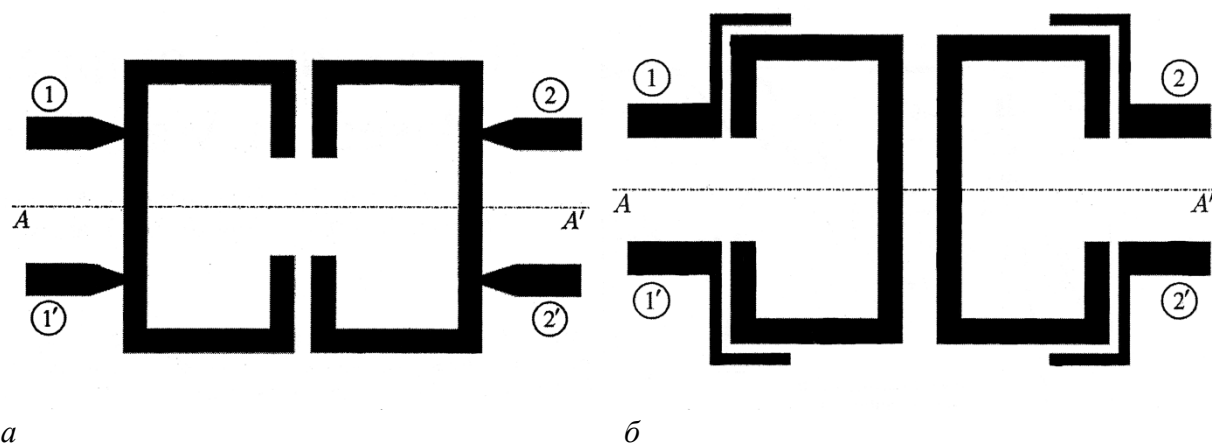
Использование балансных дифференциальных схем стало популярным как для цифровой электроники, так и для аналоговых СВЧ схем [1] из-за их невосприимчивости к наведенным шумам и электромагнитным помехам. Эта тенденция подтолкнула к созданию дифференциальных вариантов пассивных СВЧ устройств. Примеры таких разработок: делители и сумматоры мощности [2], диплексеры [3], эквалайзеры [4]. Также много внимания уделяется фильтрам - синфазным полосно-заграждающим (СПЗФ) и дифференциальным полосно-пропускающим. ДППФ, описанный в работе [5], эффективно подавляет синфазный сигнал в широкой полосе частот, тогда как вносимые потери для дифференциального сигнала вследствие хорошего согласования сохраняются низкими в требуемом диапазоне частот.

К настоящему времени опубликовано много работ, касающихся ДППФ. Благодаря этому для разработчиков доступен широкий спектр описаний реализаций таких фильтров: узкополосных и широкополосных, одно- и двухдиапазонных. Некоторые из примеров: узкополосный фильтр на замкнутых петлевых резонаторах [6], широкополосный фильтр на разветвляющихся связанных линиях [7, 8], двухдиапазонный фильтр на асимметричных связанных линиях [9].

Большинство из этих фильтров имеют в конструкции плоскость симметрии, которая является «электрической» или «магнитной» стенкой в зависимости от способа возбуждения – противофазного или синфазного. Поскольку ДППФ ведет себя для противофазного сигнала как обычный ППФ, дифференциальный фильтр может быть получен из одностороннего аналога путем зеркального отражения его топологии относительно плоскости симметрии. Для синфазного сигнала полученная таким образом конструкция должна иметь в плоскости симметрии «магнитную стенку», чтобы происходило подавление синфазного сигнала. В реальных условиях геометрическая симметрия не всегда означает симметрию электрическую. Поэтому на практике для улучшения последней в конструкцию ДППФ приходится добавлять

сосредоточенные или распределенные элементы, которые позволяют обеспечить требуемое подавление на выходе фильтра синфазного сигнала, не внося существенных изменений в уровень выходного противофазного сигнала.

ДППФ на полосковых линиях со связанными полуволновыми резонаторами – это сравнительно простые конструкции, которые при достаточной добротности резонаторов, тем не менее, позволяют получить узкую полосу пропускания для дифференциального сигнала. Схема с преимущественно электрической связью резонаторов, рис. 1, *a*, находит широкое применение на практике. В этой конструкции плоскость, проходящая через линию  $AA'$ , является плоскостью нулевого потенциала, то есть «электрической стенкой».



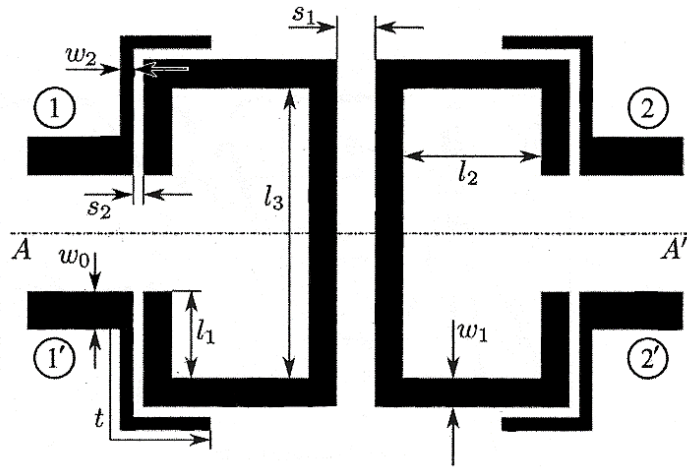
**Рисунок 1. ДППФ на полуволновых резонаторах с емкостной (*a*) и магнитной (*б*) связью резонаторов (1-1' и 2-2' – входные и выходные полосковые линии)**

Однако реализация ДППФ второго порядка на основе этой топологии, рис. 1, *a*, не дает хорошего подавления синфазного сигнала. Как упоминалось выше, этот недостаток можно преодолеть путем подключения элементов настройки к проводникам резонаторов в точках их пересечения с линией  $AA'$ . Эти элементы незначительно влияют на коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания в дифференциальном режиме, но увеличивают подавление выходного сигнала в этой полосе в синфазном режиме возбуждения. Такой подход, часто используемый на практике, существенно усложняет конструкцию фильтра и его регулировку.

Конструкция ДППФ, рассматриваемая в работе, с преимущественно магнитной связью резонаторов, рис. 1, *б*. Нетрудно видеть, что она получается из первой, рис. 1, *a*, поворотом каждого из резонаторов на  $180^\circ$  относительно вертикальной оси. Плоскость симметрии  $AA'$  в конструкции на рис. 1, *б* является «магнитной стенкой».

Для заданного уровня связи резонаторов, определяемого требуемой шириной полосы пропускания, магнитная связь позволяет увеличить зазор между резонаторами. Этого зазора достаточно для эффективного взаимодействия резонаторов в дифференциальном режиме. Следует ожидать, что уровень электрической связи при этом окажется значительно ниже, чем в конструкции на рис. 1, *a*, что позволит ослабить передачу синфазного сигнала. С целью проверки высказанного предположения было проведено математическое моделирование конструкции ДППФ, рис. 1, *б*, в пакете CST Studio и экспериментальное исследование изготовленного образца.





**Рисунок 2. Топология ДППФ со связью резонаторов по магнитному полю с обозначением геометрических размеров всех элементов**

Проектирование дифференциального фильтра и расчет его АЧХ для дифференциального сигнала могут быть выполнены по методике, описанной в [10] для обычного фильтра со связанными резонаторами, при условии, что топология ДППФ получается из топологии обычного фильтра путем зеркального отражения последней относительно плоскости AA', рис. 2.

В общем случае (для многорезонаторного фильтра) значения коэффициентов связи между резонаторами  $M_{i,i+1}$  и нагруженной добротности резонаторов  $Q_{li}$  ("l" - load), требуемые для получения заданной полосы пропускания  $\Delta f$ , определяются из следующих выражений:

$$M_{i,i+1} = \frac{\Delta f}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}; \quad Q_{l1} = \frac{g_0 g_1}{\Delta f}; \quad Q_{li+1} = \frac{g_i g_{i+1}}{\Delta f}. \quad (1)$$

где  $i=1, 2, \dots, n-1$  ( $n$  - порядок фильтра);  $g_0, g_1, g_2, \dots, g_n$  - значения элементов ФНЧ-прототипа для фильтра того вида, который должен быть реализован (Чебышева, Баттерворта, Кауэра и т.д.). Центральная частота полосы пропускания фильтра для дифференциального сигнала  $f_0^d$  ("d" - differential) определяется длиной полоскового проводника резонатора, которая должна быть близка к половине длины волны в соответствующей полосковой линии.

Для определенности рассмотрим двухрезонаторный ( $n=2$ ) фильтр Баттерворта с центральной частотой  $f_0^d=2,45$  ГГц и относительной полосой пропускания  $\Delta f/f_0^d=10\%$ . По приведенным выше формулам находим  $M_{12}=0,071$ ,  $Q_{l1}=Q_{l2}=Q_l=14$ . Для выбранной подложки ( $\epsilon_r=3,0$ ,  $h=1,016$  мм) находим следующие размеры резонаторов, а также ширину проводников входных и выходных линий, соответствующую волновому сопротивлению 50 Ом:  $l_1=4$  мм,  $l_2=4,9$  мм,  $l_3=16,9$  мм при ширине проводников  $w_1=0,8$  мм,  $w_0=2,53$  мм.

Величина нагруженной добротности резонаторов главным образом определяется степенью связи резонаторов с входными (1 и 1') и выходными (2 и 2') полосковыми линиями. Основное отличие конструкции рис. 1, б от конструкции рис. 1, а состоит в том, что связь резонаторов с входными и выходными полосковыми линиями должна иметь емкостной характер. Для усиления связи потребовалось ввести дополнительные полосковые линии с шириной проводника  $w_2$  и длиной  $t$ , рис. 2. Емкостное возбуждение вместе с магнитной связью резонаторов потребовало изменить их размеры для обеспечения заданной резонансной частоты:  $w_1=0,8$  мм,  $w_2=0,3$  мм  $t=9$  мм,  $s_1=1,6$  мм,  $s_2=0,1$  мм,  $l_1=4$  мм,  $l_2=4,9$  мм,  $l_3=16,9$  мм.

Величина связи с внешними цепями (а, следовательно, и значение  $Q_l$ ) зависит от ширины зазора  $s_2$  между подводящей линией и резонатором. Если ширину проводника  $w_2$  этой линии можно выбирать в широких пределах (было выбрано  $w_2=0,3$  мм), то выбор размеров  $t$  и  $s_2$

оказывает значительное влияние на характеристики фильтра. Так, отрезок  $t$  должен быть достаточно коротким, чтобы не было непосредственного прохождения сигнала со входа на выход фильтра, минуя резонаторы. С другой стороны, при малом  $t$  требуется узкий зазор  $s_2$ , но при этом он должен быть достаточно широким, чтобы при изготовлении фильтра не было опасности замыкания зазора вследствие технологических погрешностей.

По методике, описанной в [10], с помощью полноволнового симулятора CST Studio была рассчитана зависимость  $Q_l(t, s_2)$ , а также зависимость коэффициента связи между резонаторами  $M_{12}$  от ширины зазора  $s_1$ . На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости величины нагруженной добротности  $Q_l$  резонатора от параметров  $t$  и  $s_2$ . Как видно из рисунка, значения  $t$  и  $s_2$ , обеспечивающие необходимую величину  $Q_l=14$  и отвечающие указанным выше требованиям, соответственно, равны 9 мм и 0,1 мм. При этих значениях  $t$  и  $s_2$  была рассчитана зависимость коэффициента связи  $M_{12}$  от ширины зазора  $s_1$  между резонаторами, которая показана на рис. 4. Из этого рисунка определяется необходимая величина  $s_1=1,6$  мм, обеспечивающая требуемое значение  $M_{12}=0,071$ .

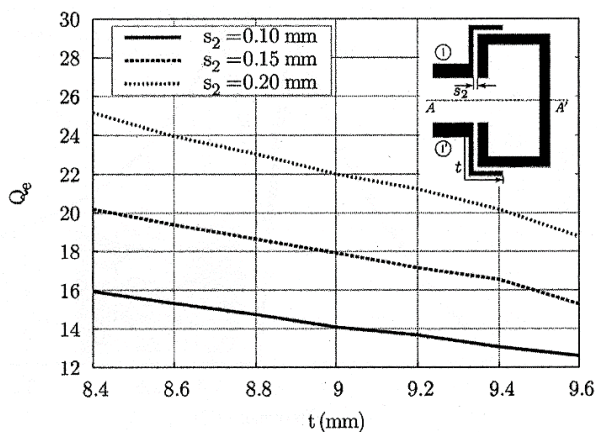


Рисунок 3. Результаты расчета зависимости величины нагруженной добротности  $Q_l$  резонатора от параметров  $t$  и  $s_2$

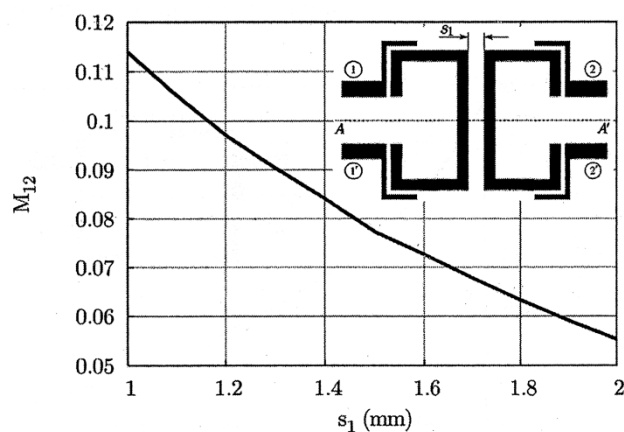
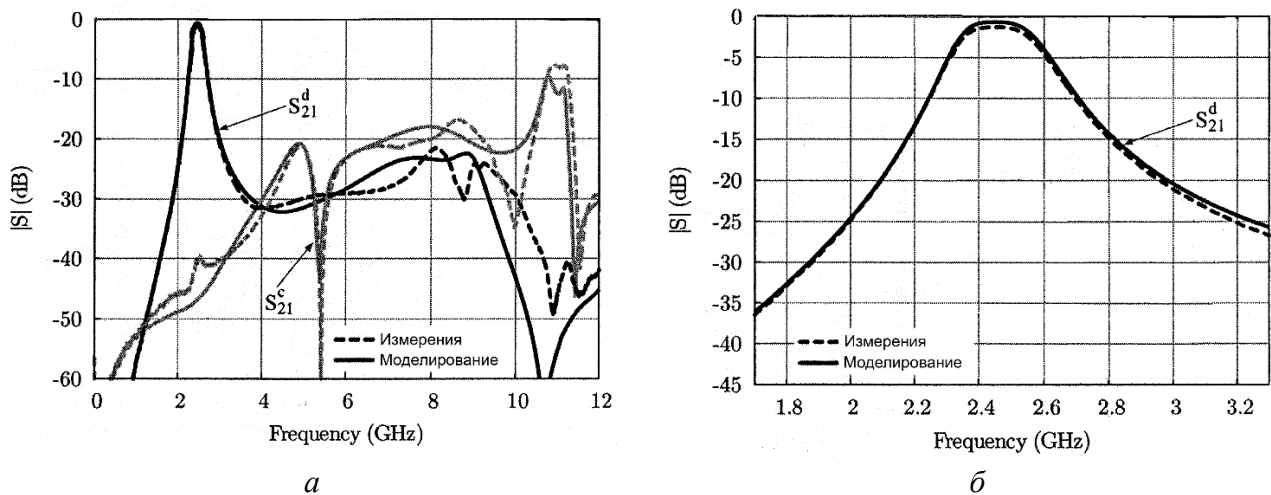


Рисунок 4. Зависимость коэффициента связи  $M_{12}$  от ширины зазора  $s_1$  между резонаторами

Спроектированный фильтр был изготовлен, измерены его характеристики. Результаты измерения коэффициентов передачи фильтра в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц при противофазном  $|S^d_{12}|$  (“d”-differential) и синфазном  $|S^c_{12}|$  (“c”-common) способах возбуждения приведены на рис. 5, а и 5, б. При измерении  $S^d_{12}$  входы и выходы фильтра подключались к 4-портовому векторному анализатору цепей, порты которого были попарно включены и откалиброваны со сдвигом фаз  $180^\circ$  во всем диапазоне частот. При измерении  $S^c_{12}$  настройка портов анализатора производилась без сдвига фаз. На рис. 5, а и 5, б также приведены графики частотных зависимостей, полученные с помощью математического моделирования. Последние находятся в хорошем соответствии с данными эксперимента вплоть до частот  $\sim 6$  ГГц. Это свидетельствует об адекватности математической модели фильтра, построенной в CST Studio. Наилучшее соответствие расчета и эксперимента наблюдается для величины  $|S^d_{12}|$  в окрестности центральной частоты полосы пропускания фильтра  $f_0^d=2,45$  ГГц (рис. 5, б).

Нетрудно видеть, что в данной конструкции подавление синфазного сигнала весьма значительно: измеренное значение на центральной частоте фильтра составило 40 дБ. Потери в полосе пропускания на дифференциальном сигнале достаточно малы (1,28 дБ).



**Рисунок 5. Значение коэффициентов передачи ДППФ с магнитной связью резонаторов для синфазного «с» и дифференциального «d» сигналов в широкой полосе частот (а) и в окрестности резонансной частоты (б)**

### Заключение

Проведенные исследования (теоретические и экспериментальные) продемонстрировали достоинства конструкции ДППФ с магнитной связью резонаторов по сравнению с традиционными фильтрами с электрической связью. Магнитная связь обеспечивает достаточно высокий уровень подавления синфазной помехи как в полосе пропускания дифференциального сигнала, так и за ее пределами, без значительного влияния на потери фильтра в полосе пропускания дифференциального сигнала. Улучшение характеристики подавления синфазной помехи достигается с помощью простой конструкции резонаторов без дополнительных подстроечных элементов. Это позволяет отказаться от трудоемкой процедуры регулировки фильтра (или значительно ее упростить).

Рассмотренная в настоящей работе конструкция позволяет строить многозвенные ДППФ ( $n > 2$ ) при чередовании электрической и магнитной связи между контурами. При этом, естественно, повышается уровень подавления дифференциального сигнала за пределами полосы пропускания и в то же время достигается необходимое подавление синфазной помехи в широком диапазоне частот.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### Библиографический список

1. **Eisenstandt, W. R.** Microwave Differential Circuit Design Using Mixed-Mode S-Parameters / W. R. Eisenstandt, B. Stengel, B. M. Thompson. - Boston, USA: Artech House, 2006. – 247 p.
2. **Xia, B.** A new balanced-to-balanced power divider/combiner / B. Xia, L.-S. Wu, J.-F. Mao // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2012, vol. 60, no. 9 – Pp. 2791-2798.
3. **Zhou, Y.** Compact balanced-to-balanced microstrip diplexer with high isolation and common-mode suppression / Y. Zhou, H.-W. Deng, Y. Zhao // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – 2014, vol. 24, no. 3. – Pp.143-145.

4. **Hsiao, C.-Y.** A novel dual-function circuit combining high-speed differential equalizer and common-mode filter with an additional zero / C.-Y. Hsiao, T.-L. Wu // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* – 2014, vol. 24, no. 9. – Pp. 617-619.
5. **Weng, T.-W.** Synthesis model and design of a common-mode bandstop filter (CM-BSF) with an all-pass characteristic for high-speed differential signals / T.-W. Weng, Tsai, C.-H. Chen, D.-H. Han, T.-L. Wu // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* – 2014, vol. 62, no. 8. – Pp. 1647-1656.
6. **Olvera-Cervantes, J.-L.** Microstrip balanced bandpass filter with compact size, extended-stopband and common-mode noise suppression / J.-L. Olvera-Cervantes, A. Corona-Chavez // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* – 2013, vol.23, no. 10. – Pp. 530-532.
7. **Wu, X.-H.** Differential wideband bandpass filter with high-selectivity and common-mode suppression / X.-H. Wu, Q.-X. Chu, L.-L. Qiu // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* – 2013, vol. 23, no. 12. – Pp. 644-646.
8. **Li, L.** Differential wideband bandpass filters with enhanced common-mode suppression using internal coupling technique / L. Li, J. Bao, J.-J. Du, Y.-M. Wang // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* – 2014, vol. 24, no. 5. – Pp. 300-302.
9. **Cho, Y.-H.** Design of balanced dual-band bandpass filters using asymmetrical coupled lines / Y.-H. Cho, S.-W. Yun // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* – 2013, vol. 61, no. 8. – Pp. 2814-2820.
10. **Hong, J.-S.** *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2nd ed. / J.-S. Hong. – New York, USA: Wiley, 2011. – 655 p.

**S.A. Babunko, Yu.G. Belov**

### **MICROWAVE DIFFERENTIAL FILTER WITH THE MAGNETIC COUPLING OF RESONATORS**

**Purpose:** The construction of microstrip design differential band-pass filters based on open loop resonators with increased common-mode noise suppression.

**Design/methodology/approach:** Common designs of differential filters with electric coupling of resonators do not provide the necessary suppression characteristics. To improve them, need to use concentrated or distributed tuning elements, which complicates the filter design and adjustment. A design of differential filters with magnetic field coupling of resonators is proposed, which provides high common-mode signal suppression without additional tuning elements.

**Findings:** The magnetic coupling of the resonators provides a sufficiently high level of common-mode interference suppression both in the differential signal bandwidth and beyond, without significantly affecting filter losses in the differential signal bandwidth. Improving the common-mode noise suppression characteristic is achieved by using a simple resonator design without additional tuning elements.

**Research limitations/implications:** If need to increase the order of the filter, the coupling of the resonators must be alternated: electric - magnetic. When using magnetic coupling of resonators, the loss of bandwidth is slightly increases.

**Originality/value:** The proposed approach to the design of differential filters allows for significant suppression of common-mode interference without complicating the filter topology.

**Key words:** differential filter, common-mode signal suppression, electric coupling of resonators, magnetic coupling of resonators.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУПОРНЫХ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ ИЗ УГЛЕКОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПАКЕТЕ ANSYS HFSS

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород

Приведены результаты вычислительных исследований электромагнитных характеристик рупорного антенного устройства из углекомпозиционного материала, выполненные с использованием программного пакета ANSYS HFSS. Изучены зависимости коэффициента стоячей волны и диаграммы направленности от геометрической конфигурации антенного устройства в сантиметровом диапазоне полосы 5 ГГц.

**Ключевые слова:** рупорная антенна, компьютерное моделирование, углекомпозит.

В настоящее время при проектировании и производстве современных высокотехнологичных радиоэлектронных устройств все большую популярность набирают материалы на основе углерода – углекомпозиции. Данные материалы обладают высокой температурной стабильностью, повышенной прочностью, относительно низким удельным весом и широким диапазоном значений проводимости и представляются перспективными для создания широкого класса антенно-фидерных устройств и систем.

Для исследования работоспособности предлагаемых технических решений в настоящее время одним из наиболее популярных способов исследования является компьютерное моделирование их электромагнитных полей в программной системе ANSYS HFSS, позволяющей дать оценку работоспособности устройств и определить их оптимальные параметры еще на этапе проектирования.

Далее в статье рассматривается следующая задача: путем численного моделирования оценить работоспособность углекомпозиционных антенных устройств на примере рупорной антенны для сантиметрового диапазона полосы 5 ГГц, построенных для беспроводных сетей [Wi-Fi](#) на базе стандарта IEEE [802.11a](#), и сравнить полученные результаты с данными исследования электромагнитных характеристик экспериментального образца [1, 2], состоящего из последовательно соединенных углекомпозиционных рупорной части и круглого волновода радиусом  $a = 0,021$  м.

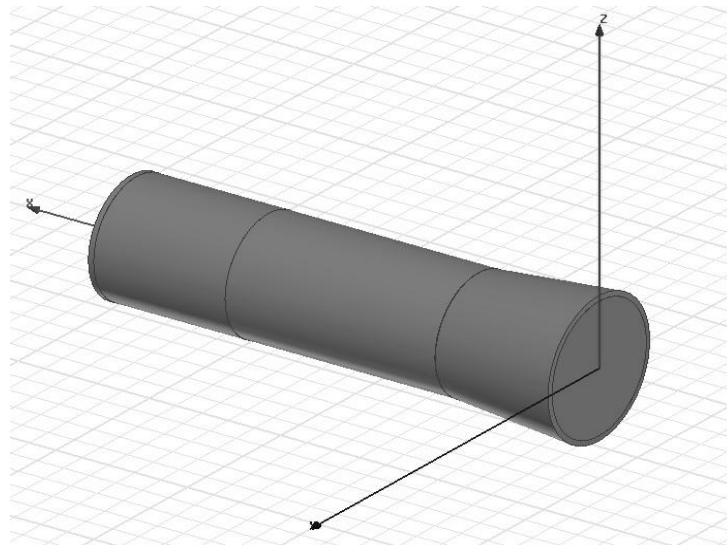
В качестве материала стенок волновода и рупора был выбран производимый фирмой Zoltek [3] углекомпозит Panex 35 с проводимостью  $155 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Для численного исследования электромагнитных характеристик углекомпозиционной рупорной антенны в программном пакете ANSYS HFSS [4]<sup>1</sup> была построена 3D-модель, визуальный образ которой представлен на рис. 1.

Основной рабочей волной в круглых волноводах является волна  $H_{11}$ . Расчетным путем по формулам определения наибольшей критической длины волны  $\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,41a$  и минимально возможной рабочей частоты  $F_{кр}^{H_{11}} = c / \lambda_{кр}^{H_{11}}$  ( $c$  – скорость света) получены значения 0,0716 м

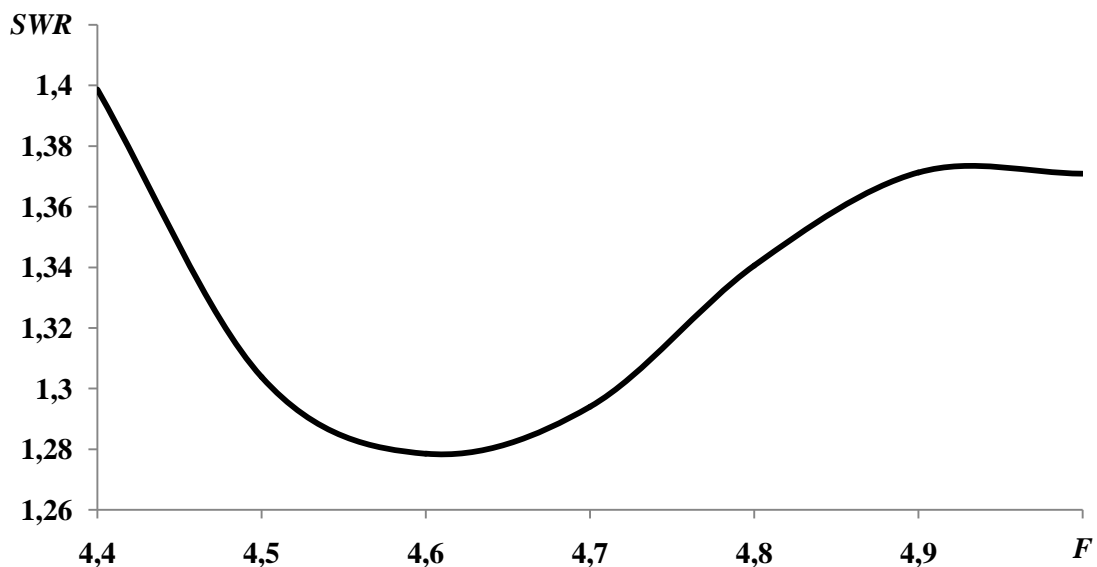
<sup>1</sup> Расчеты выполнялись с использованием лицензионной версии программной системы на кафедре «Физика и техника оптической связи» [Образовательно-научного института ядерной энергетики и технической физики им. академика Ф.М. Митенкова](#) НГТУ им. Р.Е. Алексева.

и 4,18 ГГц, и таким образом подтверждена возможность распространения волны  $H_{11}$  в круглом волноводе вышеуказанного радиуса.



**Рисунок 1. Внешний вид моделируемого антенного устройства**

По данной 3D-модели были получены характеристики коэффициента стоячей волны  $SWR$  (рис. 2) и диаграммы направленности (рис. 3) антенны на частоте  $F = 5$  ГГц.



**Рисунок 2. Характеристика коэффициента стоячей волны**

Как видно из приводимого графика значения коэффициента стоячей волны в области рабочей зоны не превышают величины 1,4. При этом диаграмма направленности (рис. 3) демонстрирует направленный характер антенны с максимальной энергией излучения  $E$  при значении азимута  $\varphi = 90^\circ$ , а её ширина составляет величину порядка  $60^\circ$ .

Для изучения зависимости электромагнитных характеристик от геометрических параметров углекомпозитной рупорной антенны с целью их возможной оптимизации выполнено численное моделирование различных конфигураций антенных устройств.

Полученные при этом результаты расчета коэффициента стоячей волны и диаграммы направленности представлены на рис. 4 и 5: сплошной линией обозначена характеристика антенны, с размерами, соответствующими размерам исследуемого модельного образца; штриховой линией обозначена характеристика антенны, с уменьшенным на 5 мм диаметром волноводной и рупорной частей; штрихпунктирной линией обозначена характеристика антенны, с увеличенной на 5 мм волноводной и рупорной частью в диаметре; характеристики антенны с увеличенным на 10 мм и 20 мм диаметром обозначены линиями с длинным штрихом и точечной линией соответственно.

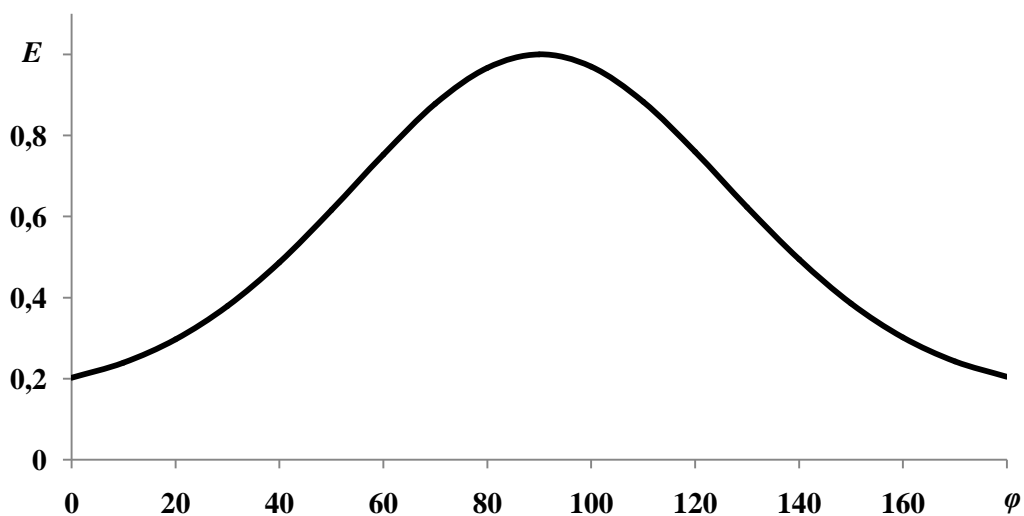


Рисунок 3. Характеристика диаграммы направленности

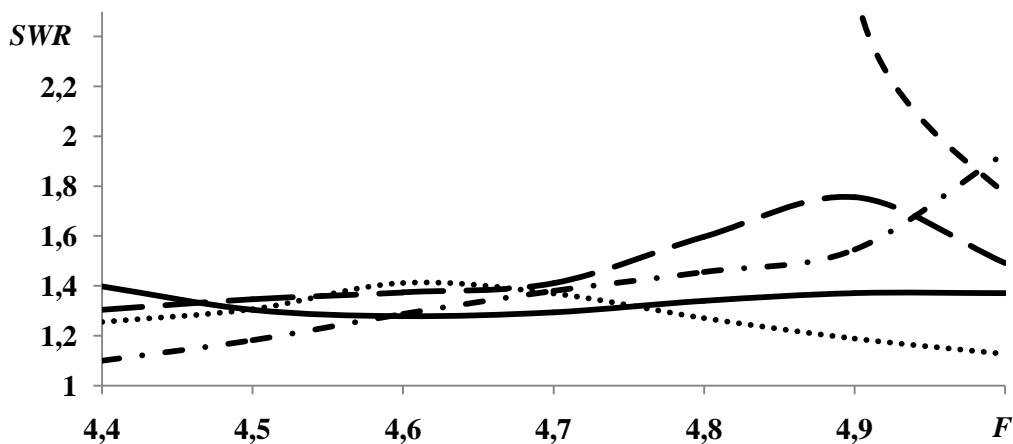
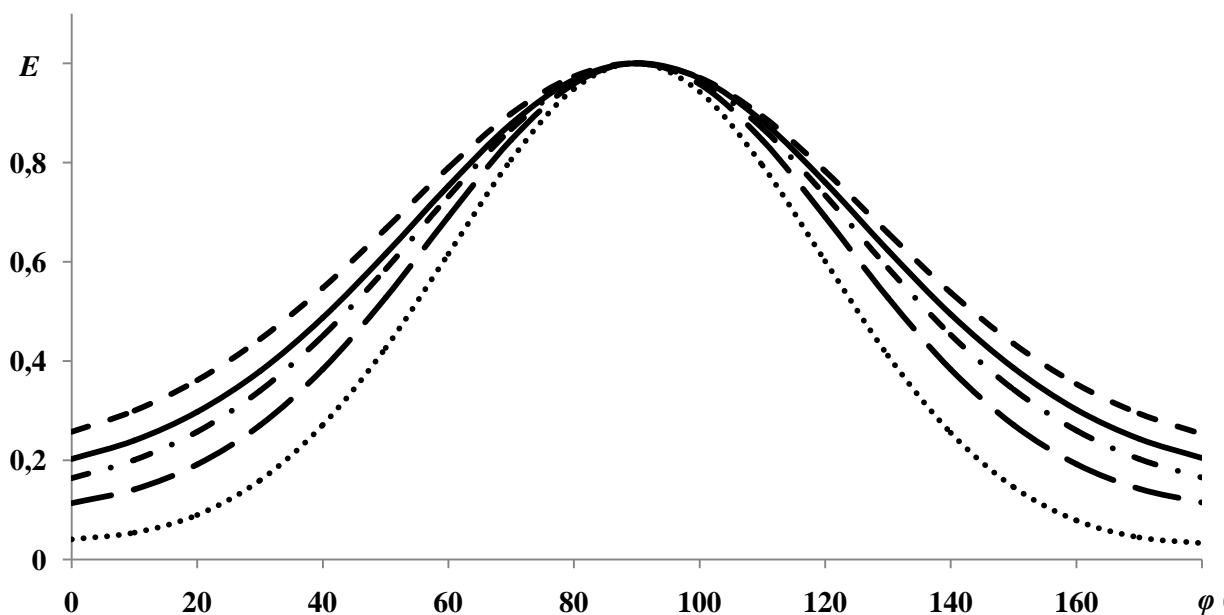


Рисунок 4. Характеристики коэффициента стоячей волны для различных конфигураций рупорного антенного устройства



Графики на рис. 4 демонстрируют динамику минимальной рабочей частоты рупорной антенны в зависимости от её конфигурации: при уменьшении радиуса рупорной антенны наблюдается смещение рабочего диапазона в область более высоких частот, за рамки исследуемой полосы и расширение диаграммы направленности (рис. 5); при увеличении диаметра рупорной антенны наблюдается усиление неравномерности характеристики коэффициента стоячей волны и сужение ширины диаграммы направленности.

Из полученных результатов моделирования следует, что геометрические параметры экспериментального рупорного антенного устройства из углекомпозитных материалов являются оптимальными для частотного диапазона 5 ГГц.



**Рисунок 5. Характеристики диаграмм направленности различных конфигурации рупорного антенного устройства**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-20038.*

### **Библиографический список**

1. Electrodynamic Characteristics of Horn Microwave Antennas Made of Graphene-Containing Carbon-Composite Materials / N.A. Dugin, T.M. Zaboronkova, E.N Myasnikov, G.R. Belyaev // *Technical Physics*. – 2018. – Vol. 63, No. 2. – pp. 268-273.
2. Electrodynamic Characteristics of Dipole Antennas Made of Graphene-Containing Carbon Fiber Composite Materials / N.A. Dugin, T.M. Zaboronkova, E.N Myasnikov [et. al.] // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2018. – Vol. 63, No. 8. – pp. 864-867.
3. Характеристики углекомпозитного материала Panex 35 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://zoltek.com/products/px35/> (дата обращения: 20.01.2020).
4. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б.[и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. Изд. 3-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2007. – 744с.



5. **Курушин, А. А.** Моделирование антенн и СВЧ структур с помощью HFSS / Курушин А. А., Банков С. Е. – Солон-пресс. 2018. – 280с.

**Y.S. Fedosenko, G.R. Belyaev**

**THE CARBON COMPOSITE MATERIAL HORN ANTENNA DEVICE ELECTRO-  
MAGNETIC CHARACTERISTICS INVESTIGATION BY MODELING IN ANSYS HFSS  
SOFTWARE PACKAGE**

Volga state university of water transport  
Nizhny Novgorod

The results of carbon composite material horn antenna device electromagnetic characteristics investigation by computer simulation in ANSYS HFSS software were shown. Relationships between standing wave ratio and radiation pattern on the antenna geometry parameters in centimeter frequency band of 5 GHz were investigated.

**Key words:** horn antenna, computer simulation, carbon composite material.

<sup>1</sup>В.В. Бирюков, <sup>1,2</sup>З.С. Бирюков, <sup>1,2</sup>В.Л. Вакс, <sup>1</sup>В.А. Малахов, <sup>1,2</sup>А.Н. Панин,  
<sup>1,2</sup>С.И. Приползин, <sup>1</sup>А.С. Раевский, <sup>1</sup>В.В. Щербаков

## РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА НА ЧАСТОТЕ 220 ГГц

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур - филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

В докладе представлены результаты расчета и измерения основных характеристик антенны Кассегрена, предназначенной для использования в высокоскоростной беспроводной системе связи на частоте 220 ГГц. Расчет электрических параметров антенны проводился с помощью пакета программ численного моделирования как единый проект, а для уменьшения времени расчета использовался трехэтапный метод. Результаты расчета согласуются с результатами измерений параметров антенны Кассегрена в СВЧ диапазоне на частоте 220 ГГц. По результатам проведенных исследований предложена методика расчета параметров антенны Кассегрена, позволяющая экономить время расчета и вычислительные ресурсы компьютера.

**Ключевые слова:** антенна Кассегрена, CSTMicrowaveStudio, метод лабораторных измерений, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

### Введение

Антенна Кассегрена находит широкое применение в системах беспроводной связи. Она позволяет реализовать необходимые электрические параметры. Основные геометрические параметры антенны приведены на рис.1. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения, и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой продольный размер, технология ее изготовления хорошо отработана [1]. Облучатель обычно размещают у вершины основного зеркала. Это укорачивает длину питающего фидера, это приводит к уменьшению массы антенны, уменьшению потерь в фидере и снижению шумовой температуры.

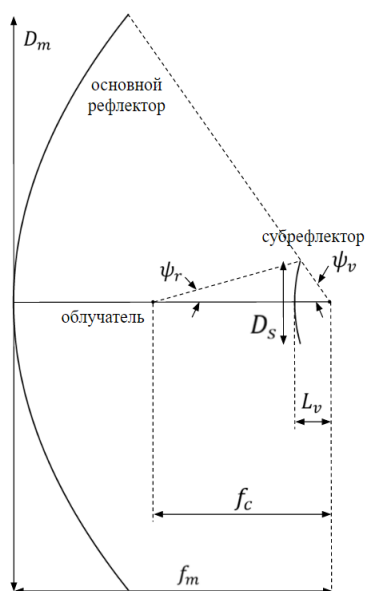
### Расчет антенны Кассегрена

Расчет при заданных требованиях начинают с определения параметров основного зеркала, затем субрефлектора совместно с облучателем. В качестве облучателей антенны Кассегрена обычно используются рупорные антенны и их модификации, так как они наиболее просты конструктивно, хорошо согласуются с питающим трактом, позволяют осуществить работу на двух линейных поляризациях, имеют фазовый центр, обладают широким рабочим диапазоном частот. Наибольшее применение получили пирамидальные и конические рупоры, причем коэффициент усиления рупорного облучателя выбирают так, чтобы обеспечить одинаковое затенение на основном зеркале субрефлектором и раскрытом облучателе. В этом случае антенна будет оптимизирована по коэффициенту использования поверхности (КИП).

Для расчета геометрических параметров антенны на начальном этапе проектирования используем метод геометрической оптики [2].

При заданном коэффициенте усиления (КУ) антенны  $G$  диаметр большого зеркала находится по формуле  $D_m = (\lambda/\pi)G\nu$ , где КИП антенны равен  $\nu = 0,5 \dots 0,7$ . Из соотношения  $f_m = (0,35 \dots 0,5)D_m$  выбираем фокусное расстояние большого зеркала. Используя формулу  $D_s \approx (2\alpha\lambda f_m)^{1/2}$ , рассчитаем диаметр вспомогательного зеркала  $D_s$ , где  $\alpha = 1,1 \dots 1,3$  – коэффициент, учитывающий амплитудное распределение поля в раскрытии облучателя. Площадь раскрытия облучателя у оптимизированной антенны Кассегрена будет равна  $(\pi D_s^2)/4$ . По формуле  $e = (4f_m + D_m)/(4f_m - D_m)$  найдем эксцентриситет гиперболы  $e$ . Половина угла раскрытия большого зеркала  $\psi_v$  и половина угла раскрытия вспомогательного зеркала  $\psi_r$  рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \tan(\psi_v / 2) &= D_m / (4f_m), \\ \tan(\psi_v / 2) / \tan(\psi_r / 2) &= 2f_c / D_s, \\ 1 - \frac{\sin((\psi_v - \psi_r) / 2)}{\sin((\psi_v + \psi_r) / 2)} &= 2L_v / f_c, \\ (f_c - L_v) &= L_v(e + 1)/(e - 1). \end{aligned}$$



**Рисунок 1. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена**

Дальнейший расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводим с использованием программы CST Microwave Studio [3] которая предназначена для трехмерного электродинамического моделирования СВЧ-устройств.

Время расчета электрических параметров антенны Кассегрена на компьютере с параметрами: 2 процессора Intel Xeon E5-2690 v2 3.0 GHz, оперативная память 256 Gb DDR3 1666 MHz, интегрированная видеокарта Intel HD Graphics, операционная система Windows 7 Pro занимает порядка 4-5 часов. Для экономии времени и вычислительных ресурсов, расчеты проводились в несколько этапов.

На первом этапе моделировался рупорный облучатель, являющийся источником первичного электромагнитного излучения. Вычисляется ДН рупора в дальней зоне и его фазовый центр.

Далее создается новый проект для расчета вспомогательного зеркала. На втором этапе, используя результаты вычислений облучателя, определяются токи на поверхности субрефлектора, через которые находится излучение, отраженное от субрефлектора. В проект импортируется ДН рупора в дальней зоне и помещается в фокус гиперболического зеркала с

учетом найденного фазового центра рупора. Вычисляется фазовый центр системы и ее ДН в дальней зоне.

В третьем проекте рассчитывается основное зеркало. В проект импортируется ДН в дальней зоне предыдущего проекта и помещается в фокус параболического зеркала. На третьем этапе вычислялись токи на поверхности основного рефлектора, через которые определялось поле антенны Кассегрена в дальней зоне.

Суммарный расчет всех трех проектов занимает порядка 30 минут, что существенно быстрее расчета всей антенны Кассегрена как единого проекта. Данная поэтапность позволяет существенно сократить время расчета, но не учитывает взаимного влияния зеркал. Для сравнения результатов расчета выполненных трехэтапным и одноэтапным методом был произведен расчет антенны Кассегрена без разбивки на этапы - как один проект.

Расчеты показывают, что при фокусном расстоянии  $f_m$  основного зеркала существенно большим длины волны  $\lambda$  результаты расчета, выполненные трехэтапным и одноэтапным методом различаются не более чем на 3%. В противном случае различие вырастает до 12%.

Предложенная методика дает возможность учесть неточности при изготовлении и настройке антенны такие, как несовпадение геометрических осей симметрии рупора, субрефлектора и основного зеркала, смещение элементов антенны в фокальной плоскости и вдоль оси симметрии антенны. Методика позволяет проследить изменение характеристик антенны при изменении частоты.

В качестве примера на рис.2 приведена рассчитанная зависимость КУ антенны Кассегрена на частоте 220 ГГц от смещения фазового центра рупора в фокальной плоскости. Видно, что максимальное допустимое смещение центра рупора – не более длины волны. Дальнейшее смещение приводит к резкому уменьшению КУ.

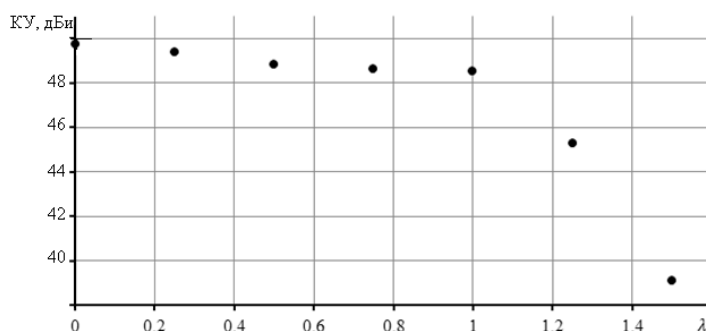


Рисунок 2. Зависимость КУ от смещения фазового центра рупора в фокальной плоскости

На рис.3 приведена рассчитанная зависимость КУ антенны от фокального параметра  $A_{par}=1/(4f_m)$ .

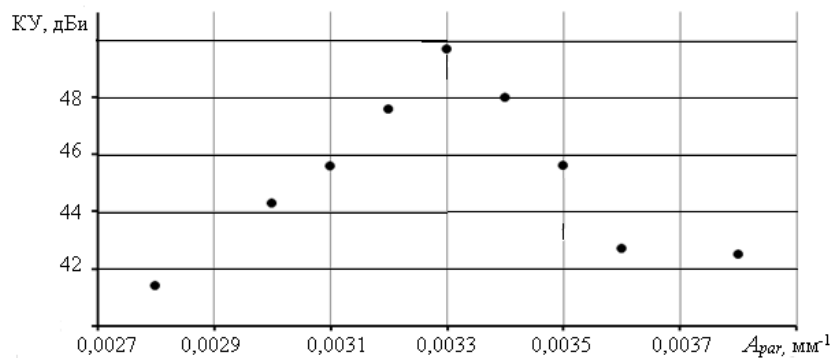


Рисунок 3. Зависимость КУ от фокального параметра  $A_{par}$

Из рисунка видно, что коэффициент усиления антенной системы чувствителен к фокальному параметру основного зеркала. Поэтому должна быть высокая точность при изготовлении зеркал.

Результаты теоретических исследований были использованы при проектировании антенны Кассегрена, предназначенной для применения в высокоскоростной беспроводной системе связи, работающей на центральной частоте 220 ГГц, имеющей диаметр основного и вспомогательного зеркал 200мм и 16мм, соответственно. В качестве облучателя для антенной системы использовался пирамидальный рупор, питаемый прямоугольным волноводом сечением 1,092x0,546мм. Расчет рупора проводился в частотной области с использованием программы CSTMicrowaveStudio на средней частоте 220 ГГц. Геометрические размеры этого облучателя подбирались исходя из условия оптимальности. Питающий фидер длиной 30мм. Длина пирамидального рупора 20мм при раскрытии размерами 12мм на 6мм.

Результаты расчета диаграммы направленности в  $E$ - и  $H$ -плоскостях исследуемой антенны Кассегрена выполненные предложенной методикой на частоте 220 ГГц приведены на рис.4.

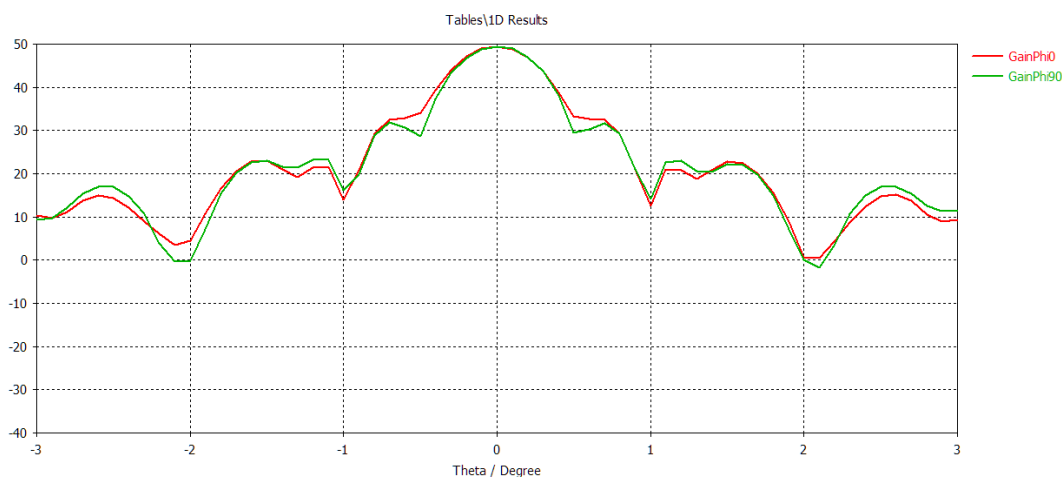


Рис.4. Диаграмма направленности антенны Кассегрена на частоте 220 ГГц

### Измерение диаграммы направленности антенны

Экспериментальное исследование антенны Кассегрена проводилось по стандартной методике измерения в дальней зоне. На рис.5 представлена упрощенная структурная схема измерительной установки [4]. Исследуемая антенна 3 (работающая в режиме приема) расположена на опорно-поворотном устройстве 4. На некотором расстоянии  $r$  в дальней зоне этой антенны расположена вспомогательная передающая антенна 2, возбуждаемая генератором 1. Приемное устройство 5 имеет индикатор мощности 6, поступающей на вход приемного устройства. Зависимость показаний этого индикатора  $p$  от угла поворота  $\theta$  антенны 3 при некотором фиксированном угле поворота  $\varphi_1$  является сечением диаграммы направленности антенны по мощности  $p(\theta, \varphi_1)$  в плоскости  $\varphi_1 = \varphi_J = \text{const}$ . Выбирая различные значения угла  $\varphi_J = \varphi_1, \varphi_2, \dots$ , можно измерить ДН в различных сечениях.

При проведении измерений важно обеспечить отсутствие отражений от пола, потолка, стен (см. штриховую линию на рис.5) и других окружающих предметов в измерительной лаборатории. Для ослабления влияния отраженных сигналов на отражающие поверхности укладывают щиты с поглощающим электромагнитное поле покрытием.

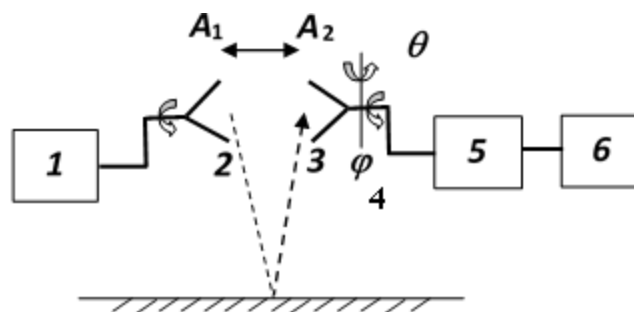


Рисунок 5. Схема метода полигонных измерений

Расстояние  $r$  между антеннами определяется выражением

$$r \geq \frac{2L_2^2}{\lambda},$$

где  $L_2$  – максимальный размер апертуры антенны Кассегрена.

В качестве вспомогательной антенны использовалась рупорно-линзовая антенна с коэффициентом усиления 26дБи. Шаг измерения ДН составлял 5 угловых минут. Настройка антенны на максимальное значение КУ проводилась путем регулировки субрефлектора по трем координатам. Результаты экспериментального исследования исследуемой антенны приведены на рис.6.

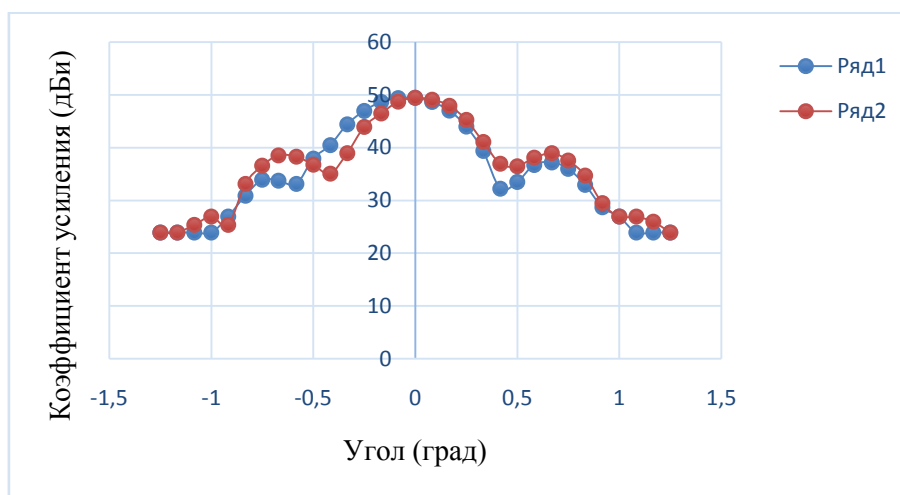


Рисунок 6. Измеренная диаграмма направленности антенны Кассегрена на частоте 220 ГГц. Ряд1 – плоскость Е. Ряд2 – плоскость Н

Коэффициент усиления антенны измерялся в лабораторных условиях с использованием формулы Фрииса [4]:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2,$$

связывающей мощность в приемной антенне  $P_{\text{пр}}$  и мощность, подводимую к передающей антенне  $P_{\text{пер}}$  при известных коэффициентах усиления  $G_{\text{пр}}$  и  $G_{\text{пер}}$  обеих антенн и расстоянии между ними  $R$ . В нашем случае на частоте 220 ГГц при коэффициенте усиления вспомогательной антенны  $G_{\text{пр}} = 26$  дБи расчеты дают коэффициент усиления исследуемой антенны Кассегрена  $G_{\text{пер}} = 49,4$  дБи. Пределы допустимой погрешности измерения коэффициента усиления антенны составляет  $\pm 3,5$  дБ [5].

Сравнение результатов расчета и измерений параметров антенны позволяет сделать вывод о возможности использования предложенной упрощенной процедуры расчета антенны Кассегрена.

### Заключение

В докладе приведены результаты расчета и измерения характеристик антенны Кассегрена на частоте 220 ГГц с помощью программного пакета CST Microwave Studio. Создана модель, позволяющая быстро и эффективно проводить расчеты основных характеристик антенны Кассегрена с учетом технических неточностей при изготовлении и настройке антенны. При использовании трехэтапной методики расчета можно существенно сократить время расчета, однако в этом случае модель не учитывает взаимного влияния зеркал антенны. Одноэтапная методика расчета уточняет результаты на заключительном шаге расчета. Результаты расчетов подтверждены экспериментально.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ №17-19-01628, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-20095.*

### Библиографический список

1. **Xu, X.** Terahertz Cassegrain Reflector Antenna / X. Xu, X. Zhang, Z. Zhou // Antennas & Propagation (ISAP), 2013 Proceedings of the International Symp. P. 969–971, 2013.
2. **Бахрах, Л.Д.** Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета. – Наука, 1981. – 304 с.
3. CST – Computer Simulation Technology. <https://www.cst.com>
4. Методы измерений характеристик антенн СВЧ/ Под ред. Н.М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
5. Методика измерений параметров антенн. ГВАТ.410171.003Д60

**<sup>1</sup>V.V. Biryukov, <sup>1</sup>Z.S. Biryukov, <sup>1,2</sup>V.L. Vaks, <sup>1</sup>V.A. Malakhov, <sup>1,2</sup>A.N. Panin, <sup>1,2</sup>S.I. Pripolzin, <sup>1</sup>A.S. Raevsky, <sup>1</sup>V.V. Scherbakov**

### CALCULATION AND MEASUREMENT OF CASSEGRENE ANTENNA PATTERN AT 220 GHz FREQUENCY

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

<sup>2</sup>Institute of Microstructures Physics - Branch of FSBSS "Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences"

**Summary:** The article presents the results of calculation and measurement of main characteristics of Cassegrain antenna intended for use in high-speed wireless communication system at 220 GHz. The calculation of electrical parameters of the antenna was carried out with the help of a package of numerical modeling programs as a single project, and a three-stage method was used to reduce the calculation time. The calculation results are consistent with the measurement results of Cassegrain antenna parameters in the microwave range at 220 GHz. Based on the results of the carried out studies, the method of calculation of Cassegrain antenna parameters is proposed, which allows saving calculation time and computing resources of the computer.

**Key words:** Cassegrain antenna, Ansoft HFSS, method of laboratory measurements, directional pattern, strengthening coefficient.

В.В. Бирюков, С.Г. Лобин

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ ЭКРАНИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

В данной работе приводится описание некоторых моделей и методов, применяемых при описании шероховатых поверхностей. Представлены результаты моделирования волноводов с шероховатыми внутренними поверхностями на основании описанных моделей в системах автоматизированного проектирования.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, прямоугольный волновод, коэффициент затухания.

### Введение

Известно, что на характеристики направляющих структур существенное влияние оказывает качество обработки экранирующих поверхностей. При этом по мере повышения частоты требования к качеству обработки этих поверхностей возрастают и становятся соизмеримыми с технологическими возможностями. В связи с этим постоянно растёт интерес к изучению влияния шероховатости поверхности на распространение волн в экранированных структурах с учетом конечной проводимости металла [1-4].

### Способы описания шероховатых поверхностей проводников

Как правило, описание моделей шероховатых поверхностей проводников производят, представляя профили шероховатостей в виде простых геометрических фигур. В некоторых моделях для упрощения анализа эти фигуры располагают периодически. Оценка потерь из-за шероховатостей часто сводится к вычислению поправочных коэффициентов [5].

**Модель Хаммерстеда и Джонсона.** Первой моделью для учета потерь, вызванных шероховатостью поверхности, стала модель Моргана, представляющая собой периодическую структуру типа зуба пилы [6]. Главное предположение в этой модели заключалось в том, что ток течет по краю шероховатой поверхности, что приводит к увеличению пути, проходимого током, а значит и к дополнительным потерям мощности. Морган, используя метод конечных разностей при решении задачи для своей структуры, вывел отношение потерь мощности, рассеянной в проводнике с шероховатостью ( $\alpha_{шер}$ ), к мощности, рассеянной в проводнике с гладкой поверхностью ( $\alpha_{глад}$ ). Позже Хаммерстед и Джонсон получили эмпирическое выражение, основанное на результатах Моргана, используя только один параметр неровности — ее среднеквадратичную высоту ( $h_{cp}$ ) [7]:

$$K = \frac{\alpha_{шер}}{\alpha_{глад}} = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctan \left( 1.4 \left( \frac{h_{cp}}{\delta} \right)^2 \right),$$

где  $\delta$  — толщина скин-слоя.



Однако полученное выражение насыщается, когда значения коэффициента  $K$  достигают 2. На практике же влияние шероховатости может быть больше чем в два раза.

**Модель полусфер.** Эта модель, предложенная Холлом, предполагает моделирование шероховатой поверхности проводника в виде полусфер, выступающих из плоскости проводника [8]. Задача рассеяния плоской волны от полусферического выступа на плоскости решается методом зеркальных отображений. В итоге поправочный коэффициент задается в следующем виде:

$$K = \frac{\left| \operatorname{Re} \eta \left\{ \frac{3\pi}{4\kappa^2} (\alpha_1 + \beta_1) \right\} \right| + \frac{\mu_0 \omega \delta}{4} \left\{ d_{\text{пик}}^2 - \pi \left( \frac{b_{\text{основ}}}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2}$$

где  $d_{\text{пик}}$  - расстояние между пиками шероховатостей,  $b_{\text{основ}}$  - длина основания неровности,  $\kappa$  - волновой вектор,  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  - коэффициенты рассеяния первого порядка (они зависят от еще одного геометрического параметра — высоты неровности),  $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'}}$ .

Таким образом, этот метод основан на трех входных параметрах и требует трех статистических измерений.

**Модель снежного кома.** Еще одна модель была предложена Хурэем. Она предполагает моделирование шероховатой поверхности в виде пирамидального набора сферических частиц (снежных комков) на поверхности проводника [9,10]. Задача рассеяния и поглощения решается аналогично модели полусфер, но для каждой сферы отдельно. Обязательными параметрами являются диаметры сфер и их количество  $N$ , приходящееся на площадку. Используя принцип суперпозиции можно получить результирующие потери в подобной структуре.

Поправочный коэффициент шероховатости записывается как:

$$K = \frac{\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2 + \sum_{n=1}^N \left| \operatorname{Re} \eta \left\{ \frac{3\pi}{4\kappa^2} (\alpha_1 + \beta_1) \right\} \right|}{\frac{\mu_0 \omega \delta}{4} d_{\text{пик}}^2}$$

Сложность этого метода связана с тем, что поверхностные структуры, напоминающие это изображение если и можно наблюдать, то только на электроосажденных медных фольгах. Кроме того, основные параметры модели - диаметр сфер внутри пирамидок и их количество на площадке - невозможно наблюдать при измерении.

**Метод малых возмущений.** Цанг с соавторами осуществил более сложный анализ проблемы шероховатости поверхности [11,12]. В их работе были проанализированы двумерные случайные шероховатые поверхности на основе метода малых возмущений второго порядка и численного метода моментов. Затем был выполнен расчет коэффициента поглощения мощности для шероховатости поверхности с помощью гауссовой и экспоненциальной корреляционных функций. Расчеты и анализ показали, что коэффициент, описывающий потери, зависит от трех параметров: среднеквадратичной высоты, длины корреляции и корреляционной функции. После чего этот подход был распространен на анализ шероховатости трехмерной поверхности, где высота поверхности изменяется в обоих горизонтальных направлениях. В этой работе авторы вывели формулу для поправочного коэффициента:

$$K = 1 + \frac{2h^2}{\delta^2} - \frac{4}{\delta} \int_0^\infty \int_0^\infty W(k_x, k_y) \operatorname{Re} \left( \sqrt{\frac{2i}{\delta^2} - k_x^2 - k_y^2} \right) dk_x dk_y,$$

где  $W(k_x, k_y)$  - функция спектральной плотности мощности.

**Градиентная модель.** Данная модель шероховатости [13] не предполагает наличия резкой границы между диэлектриком и проводником, шероховатость моделируется как непрерывный переход проводимости от практически нуля в диэлектрике, до объемной проводимости металла. Предполагая, что профиль шероховатости для большинства поверхностей имеет нормальное распределение, градиент проводимости выражается, используя один метрологический параметр шероховатости — среднеквадратичную высоту  $h_{cp}$ .

$$\sigma(x) = \sigma_{мет} \int_{-\infty}^x PDF du = \sigma_{мет} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-u^2}{2h_{cp}^2}\right) du,$$

Выражение для скин-эффекта на шероховатой поверхности выводят из уравнений Максвелла для гармонических полей, при проводимости, зависящей от местоположения  $\sigma(x)$ . Предполагая проводник немагнитным с поверхностью в плоскости  $yz$ , можно прийти к дифференциальному уравнению только в одном измерении ( $B_y$ ):

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + j\omega\mu_0\sigma B_y - \frac{\partial}{\partial x} \ln \sigma \cdot \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0.$$

Здесь третье слагаемое получается из-за проводимости, зависящей от местоположения  $\sigma(x)$ . Без третьего слагаемого  $\sigma$  будет просто постоянной величиной и в итоге приходим к уравнению Гельмгольца, описывающее классический скин-эффект на идеально гладких поверхностях.

### Применение моделей шероховатых поверхностей в САПР

В данном разделе показаны результаты моделирования волноводов с шероховатыми экранящими поверхностями в системе автоматизированного проектирования CST MicrowaveStudio. Были выполнены моделирования с применением двух вышеописанных моделей: модели Хаммерстеда и Джонсона и Градиентной модели.

Применение модели Хаммерстеда и Джонсона заключается в выдаче поправочного коэффициента, который умножается на коэффициент ослабления гладкого проводника.

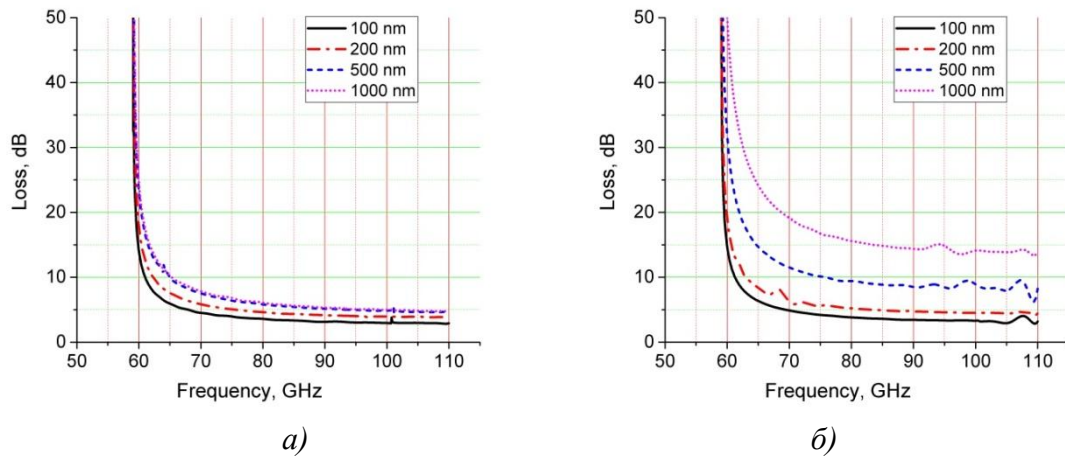
Для применимости градиентной модели в САПР используют выражение для частотно-зависимого поверхностного импеданса, который может быть импортирован в табличной форме и применен в качестве граничных условий удельного поверхностного сопротивления для конкретных поверхностей. Понятно, что для шероховатой поверхности действительная и мнимая части импеданса не будут равны (из-за разной реакции  $B_y$  и  $J_z$  на глубину  $x$ . Поверхностное сопротивление шероховатой поверхности может быть определено как:

$$Z_{шер} = -j\omega \frac{\int B_y dx}{\int_{\sigma>0} J_x dx}$$

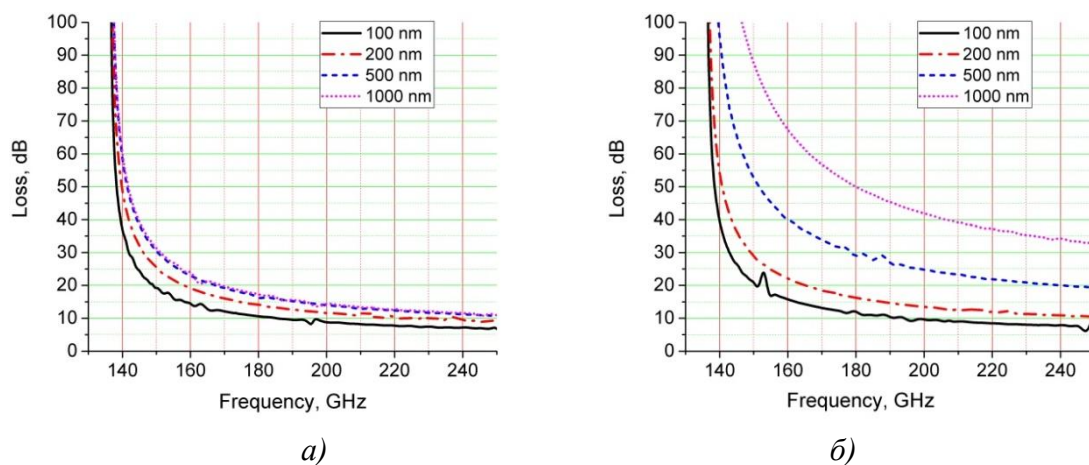
В статье [14] показывается соответствие результатов полученных при моделировании прямоугольного волновода с применением градиентной модели и результатов, полученных в ходе эксперимента.

Данными методами было проведено моделирование двух волноводов, поперечные размеры которых составили 1,27\*2,54мм и 0,55\*1,1мм. Среднеквадратичная высота шероховатостей (которая для обоих методов является входным параметром) принималась равной 100нм, 200нм, 500нм и 1мкм. Как и следует из теории модель Хаммерстеда и Джонсона при увели-

чении шероховатости начинает входить в насыщение, в описываемых примерах это происходит при  $R_{cp} > 200\text{ нм}$  (рис. 1(а) и 2(а)). При шероховатостях 100 и 200 нм обе модели показывают одинаковые значения погонных потерь. Также из рис. 1(б) и 2(б) видно, что при шероховатостях 1 мкм погонные потери в рассматриваемых волноводах начинают исчисляться десятками децибел и их вклад в потери распространяющихся волн будет уже очень существенным.



**Рисунок 1. Результаты моделирования погонных потерь в шероховатом прямоугольном волноводе 1,27\*2,54мм, полученные при помощи модели Хаммерстеда и Джонсона (а) и градиентной модели (б)**



**Рисунок 2. Результаты моделирования погонных потерь в шероховатом прямоугольном волноводе 0,55\*1,1мм, полученные при помощи модели Хаммерстеда и Джонсона (а) и градиентной модели (б)**

### Заключение

Таким образом, вопросами описания шероховатости экранирующих поверхностей занимаются достаточно давно, применяя разнообразные подходы. Причем в последние десять лет эта тема стала обсуждаться активнее, о чем свидетельствует возросшее количество публикаций в этот период. Некоторые из описанных моделей применимы в современных системах автоматизированного проектирования микроволновых структур и, как показывают результа-

ты этого моделирования, шероховатости вносят ощутимый, а иногда и основополагающий вклад в потери в экранированном волноводе. Поэтому вопрос описания влияния шероховатой поверхности на распространение волн в экранированных структурах и на сегодняшний день является актуальным и достаточно важным.

### Библиографический список

1. **Бирюков, В.В.** Круглый экранированный волновод с шероховатой внутренней поверхностью / В.В. Бирюков, В.А. Грачев, С.Г. Лобин // *Антенны*, 2018, №10, с. 54-59.
2. R. Ding, L. Tsang, and H. Braunsch, "Random rough surface effects in waveguides using mode matching technique and the method of moments," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, accepted, May 2011.
3. R. Wang, W. Cui, «A Rapid Estimation of the Conductor Loss in the Rectangular Waveguide With Rough Surface», *IEEE* (2011)
4. V. Biryukov, V. Grachev, E. Karakozova, S. Lobin, V. Shcherbakov, "Estimation of losses per unit length in a rectangular waveguide with rough screening surfaces based on the concept of partial waves", *ITM Web Conf.*, Vol. 30, 29th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2019), 2019.
5. O. Kashurkin, "Measurements and simulation of conductor-related loss of PCB transmission lines", *Missouri University of Science and Technology*, 2016.
6. S. P. Morgan, "Effect of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies", *Journal of Applied Physics*, vol. 20, no. 4, pp. 352-362, Apr 1949.
7. E. Hammerstad and O. Jensen, "Accurate models for microstrip computer-aided design," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Washington, DC, USA, May 1980, pp. 407-409.
8. S. Hall, S. Pytel, P. Huray, D. Hua, A. Moonshiram, G. Brist, and E. Sijercic, "Multigigahertz causal transmission line modeling methodology using a 3-D hemispherical surface roughness approach," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 12, pp. 2614-2624, Dec 2007.
9. P. G. Huray, O. Oluwafemi, J. Loyer, E. Bogatin, and X. Ye, "Impact of copper surface texture on loss: A model that works," *DesignCon 2010 Proceedings*, 2010.
10. P. G. Huray et al., "Fundamentals of a 3-D 'snowball' model for surface roughness power losses," in *Proc. IEEE Workshop Signal Propag. Interconnects*, Genova, Italy, May 2007, pp. 121-124.
11. L. Tsang, X. Gu, and H. Braunsch, "Effects of random rough surface on absorption by conductors at microwave frequencies," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 16, no. 4, pp. 221-223, April 2006.
12. X. Gu, L. Tsang, H. Braunsch, and P. Xu, "Modeling absorption of rough interface between dielectric and conductive medium," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 49, pp. 7-13, Jan. 2007.
13. G. Gold and K. Helmreich, "Surface impedance concept for modeling conductor roughness," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Phoenix, AZ, USA, May 2015, pp. 1-4.
14. G. Gold and K. Helmreich, K. Lomakin, "analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.66, 2018, pp 2649 - 2662.

**V. Biryukov, S.G. Lobin**

**MODELS AND METHODS OF DESCRIPTION OF ROUGHNESS  
SCREEN SURFACES**

**Abstract:** This paper describes some of the models and methods used to describe rough surfaces. The results of modeling waveguides with rough internal surfaces based on the described models in computer-aided design systems are presented.

**Keywords:** surface roughness, rectangular waveguide, attenuation coefficient

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Представлены постановка и решение задачи о прохождении плоской волны через многослойную плоскопараллельную структуру на основе электродинамической модели. Приведены результаты расчета коэффициента отражения и прохождения для многослойной плоскопараллельной структуры при разных углах падения.

**Ключевые слова:** плоская волна, многослойная структура, коэффициент отражения

### Введение

В рентгеновской оптике широко используются зеркала на основе многослойных диэлектрических структур [1–3]. В настоящей работе производится исследование возможности использования таких структур в качестве защиты от рентгеновского излучения. Для этого производятся расчёты зависимостей не только коэффициента отражения, являющегося характеристикой зеркал, но и коэффициента прохождения в широком диапазоне длин волн.

Расчет коэффициентов прохождения и отражения волн в многослойных структурах возможен на основе строгого метода двусторонних граничных условий [4], когда диэлектрический слой рассматривается как слой конечной толщины с комплексной диэлектрической проницаемостью.

### Постановка задачи о прохождении плоской волны через многослойную плоскопараллельную структуру на основе электродинамической модели

Многослойная структура состоит из нескольких плоскопараллельных диэлектрических слоев. Для каждого слоя можно записать двухсторонние граничные условия [4]. На рис. 1 представлена плоскопараллельная структура с изображением падающих, отражённых и проходящих лучей.

Расчет коэффициентов прохождения и отражения волн в многослойных структурах осуществляется на основе строгого метода двусторонних граничных условий, когда диэлектрический слой рассматривается как слой конечной толщины с комплексной диэлектрической проницаемостью. Указанный метод пригоден в самом общем (при произвольных параметрах пленок) случае, однако достаточно громоздок: приводит к детерминантным уравнениям высокого порядка с неразделяющимися аналитически действительными и мнимыми частями. Решение таких уравнений в общем случае сопряжено со значительными математическими трудностями, поэтому необходимо использовать вычислительную технику.

Поскольку электромагнитное поле в диэлектрическом слое можно представить в виде суперпозиции парциальных волн, к рассмотрению вопроса о записи граничных условий на верхней и нижней границах диэлектрического слоя  $\Pi$  можно подойти с позиции задачи о

прохождении плоской волны через диэлектрический слой, для которой применяются законы геометрической оптики.

Рассмотрим плоскопараллельный диэлектрический слой II, рис. 1, разделяющий две области, характеризуемые параметрами  $\varepsilon_1, \mu_1$  и  $\varepsilon_3, \mu_3$ . Диэлектрическую и магнитную проницаемости области II полагаем равными  $\mu_2, \varepsilon_2$ . В области над центральным диэлектрическим слоем две волны (прямая – 1 и отраженная – 2), внутри слоя II также две волны (прошедшая через верхнюю границу  $z=0$  волна 3 и волна 4, отраженная от нижней границы  $z=\Delta$ ). В области III – одна прошедшая волна 5.

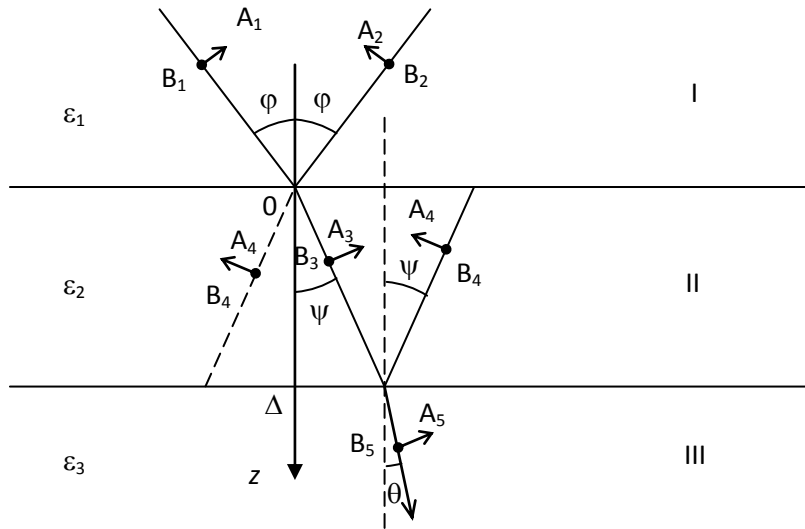


Рисунок 1. Падение плоской электромагнитной волны на плоскопараллельный слой

Полагая комплексные амплитуды электрического поля указанных волн в плоскостях  $(x, z)$  и  $(y, z)$  равными соответственно  $A_i$  (для  $p$ -поляризации) и  $B_i$  (для  $s$ -поляризации), на границе  $z=0$  записываем граничные условия в виде:

$$\begin{aligned}
 (A_1 - A_2)\cos\varphi &= \left( A_3 - A_4 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} \right) \cos\psi, \\
 B_1 + B_2 &= B_3 + B_4 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}}, \\
 (B_1 - B_2) \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} \cos\varphi &= \left( B_3 - B_4 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} \right) \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} \cos\psi, \\
 (A_1 + A_2) \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} &= \left( A_3 + A_4 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} \right) \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Граничные условия при  $z = \Delta$ :

$$\begin{aligned}
 \left( A_3 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} - A_4 \right) \cos\psi &= A_5 \cos\theta, & B_3 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} + B_4 &= B_5, \\
 \left( B_3 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} - B_4 \right) \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} \cos\psi &= B_5 \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\mu_3}} \sin\theta, \\
 \left( A_3 e^{-\frac{ik\Delta}{\cos\psi}} + A_4 \right) \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} &= A_5 \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\mu_3}}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения (2), (4) образуют систему восьми алгебраических уравнений относительно восьми неизвестных:  $A_2, B_2, A_3, B_3, A_4, B_4, A_5, B_5$ . Амплитудные коэффициенты падающей волны  $A_1$  и  $B_1$  полагаем заданными.

По заданным коэффициентам  $A_1$  и  $B_1$  находим остальные неизвестные коэффициенты. Используя найденные амплитудные коэффициенты, рассчитываем компоненты напряженностей электрического и магнитного полей. По рассчитанным напряженностям прошедшей и отраженной волны находим коэффициенты отражения и прохождения  $R$  и  $T$  плоской электромагнитной волны через слой толщины  $\Delta$ :

$$R = \frac{E_2}{E_1}, \quad T = \frac{E_5}{E_1}. \quad (3)$$

На основе приведенного выше алгоритма строился алгоритм решения задачи о расчёте коэффициентов отражения и прохождения плоской электромагнитной волны для многослойной структуры. Каждый слой ( $i$ - номер слоя) представлялся в виде четырехполюсника с матрицей рассеяния:

$$S_i = \begin{vmatrix} S_{11}^i & S_{12}^i \\ S_{21}^i & S_{22}^i \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Матрица рассеяния переводилась в матрицу передачи по формуле:

$$T_i = \begin{vmatrix} 1 & -\frac{S_{22}^i}{S_{21}^i} \\ \frac{S_{11}^i}{S_{21}^i} & S_{12}^i - \frac{S_{11}^i S_{22}^i}{S_{21}^i} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Для получения матрицы передачи многослойной структуры производилось перемножение матрицы передачи отдельных слоев:

$$T_\Sigma = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdots T_N = \prod_{i=1}^N T_i. \quad (6)$$

Через элементы ~~общей~~ матрицы передачи  $T_\Sigma$  (6), вычислялись элементы ~~общей~~ матрицы рассеяния по формуле:

$$S_\Sigma = \begin{vmatrix} S_{11}^\Sigma & S_{12}^\Sigma \\ S_{21}^\Sigma & S_{22}^\Sigma \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{t_{21}^\Sigma}{t_{11}^\Sigma} & t_{22}^\Sigma - \frac{t_{12}^\Sigma t_{21}^\Sigma}{t_{11}^\Sigma} \\ 1 & -\frac{t_{12}^\Sigma}{t_{11}^\Sigma} \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где  $S_{11}^\Sigma$  – коэффициент отражения;  $S_{21}^\Sigma$  – коэффициент прохождения многослойной структуры.

Для расчета характеристик многослойных плоскопараллельных структур с использованием приведенного алгоритма была написана программа расчета коэффициентов прохождения и отражения на языке C# в интегрированной среде разработки программного обеспечения



MS Visual Studio. Программа позволяет рассчитать зависимости коэффициентов отражения и прохождения для многослойной структуры от длины волны для разных углов падения плоской электромагнитной волны.

В качестве исходных данных в программу загружаются зависимости добавок  $\delta_j, \beta_j$  показателю преломления веществ от длины волны, взятые на специализированном сайте [5]. С их помощью находятся показатели преломления слоев  $n_j=1-\delta_j-i\beta_j$ . Диэлектрические проницаемости слоёв определяются как  $\epsilon_j=n_j^2\epsilon_0$ . Магнитные проницаемости слоёв  $\mu_j=\mu_0$ .

### Результаты расчета характеристик плоскопараллельных многослойных структур

Рассмотрим результаты расчёта коэффициентов отражения и прохождения для многослойных структур, полученные с использованием рассмотренного алгоритма и сравнивались с результатами, полученными методом направленных графов. Сравнение результатов производилось для различных количества слоёв многослойной структуры, углов падения в диапазоне длин волн от 10 до 20 нм. Отличие в результатах расчётов не превысило 2 %.

Многослойные плоскопараллельные структуры изготавливают из различных веществ, например, таких как *Mo* – молибден, *Si* – кремний, *B<sub>4</sub>C* – карбонат бора, *Co* – кобальт, *Ni* – никель, *Sb* – сурьма, *Sc* – скандий и других. Эти вещества используются в парах. Пара веществ подбирается таким образом, чтобы отражение от каждой границы раздела было максимальным, по этой причине различие между показателями преломления у соответствующих веществ должно быть как можно большим. Пары материалов, из которых формируется многослойная структура, не должны быть подвержены взаимному влиянию друг на друга и обеспечивать наилучший коэффициент отражения в рентгеновском диапазоне, то есть диффузия между выбранными веществами должна быть минимальна. Для того чтобы слои были параллельны друг другу и не искривлялись, первичная поверхность подложки на которую наносится плоскопараллельные слои веществ должна быть ровной, гладкой без шероховатостей.(перенёс снизу по смыслу)

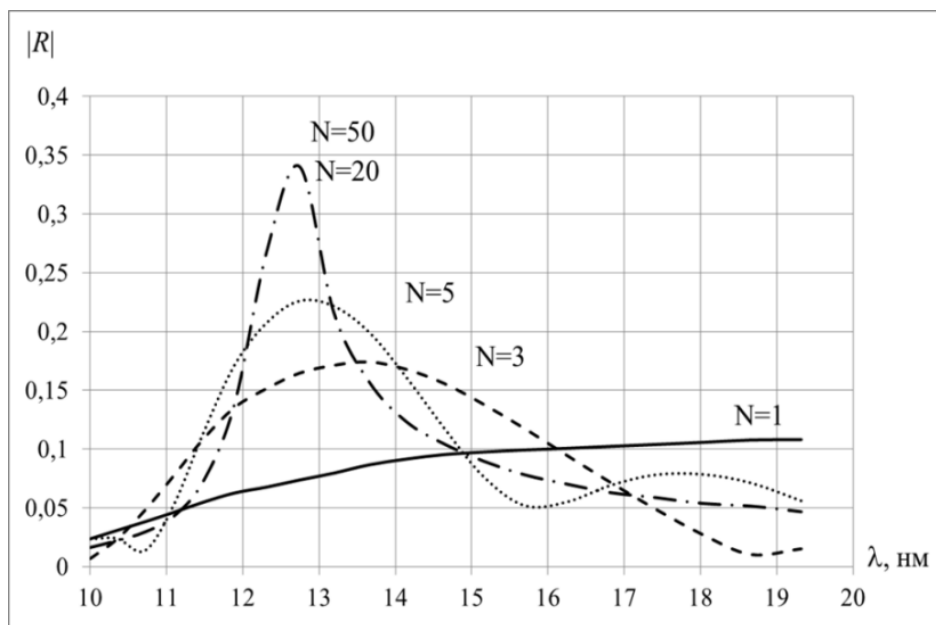
Наилучшие результаты по величине коэффициента отражения показывает пара *Sb/B<sub>4</sub>C*, которая обеспечивает отражение в диапазоне длин волн 8-13 нм  $R \sim 10\%$  при нормальном падении излучения. Поэтому для расчета была взята многослойная структура, состоящая из этих материалов, рис. 2.



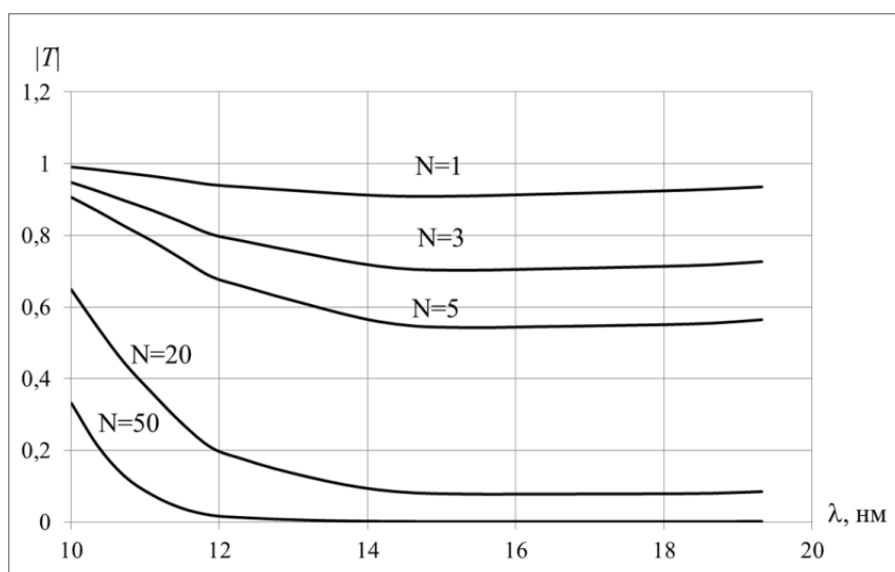
**Рисунок 2. Многослойная плоскопараллельная структура, состоящая из пары веществ сурьма/карбонат бора**

На рис. 3 приведены зависимости модулей коэффициентов отражения от длины волны, а на рис.4 зависимости модулей коэффициентов прохождения при разном количестве слоев толщиной  $d=3,30$  нм при нормальном угле падения. Максимумы коэффициента отражения определяются условием Брэгга. Увеличение количества слоёв больше 50 не даёт значитель-

ного увеличения коэффициента отражения, однако коэффициент прохождения уменьшается, что можно объяснить поглощением в материалах плёнок.

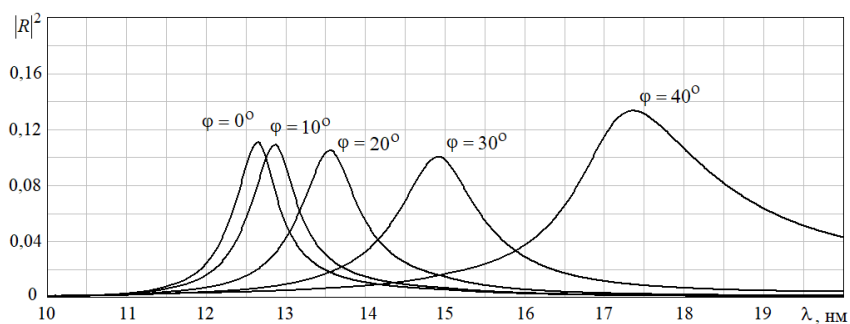


**Рисунок 3.** Зависимости модулей коэффициентов отражения от длины волны при разном количестве слоев пары веществ сурьма/карбонат бора ( $Sb/B_4C$ )

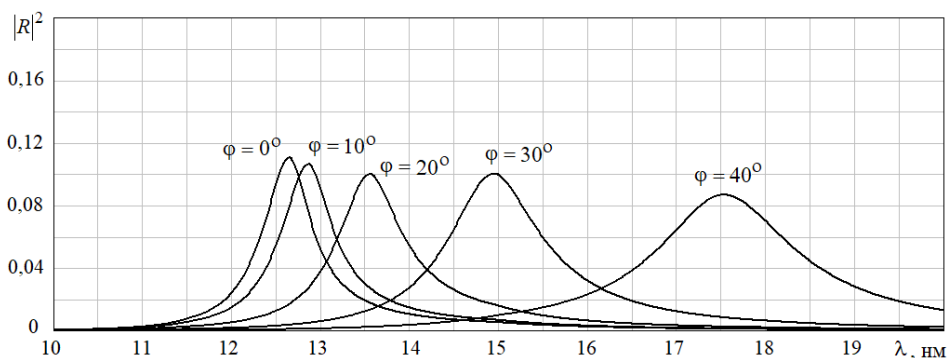


**Рисунок 4.** Зависимости модулей коэффициентов прохождения от длины волны при разном количестве слоев пары веществ сурьма/карбонат бора ( $Sb/B_4C$ )

На рис.5 приведены зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения от длины волны для углов падения плоской электромагнитной волны  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ , количество пар слоёв  $Sb/B_4C$  сравню 50, толщина каждого слоя равна 3,3 нм. Видно, что с увеличением угла падения максимумы зависимостей смещаются в длинноволновую область. Это можно объяснить тем, что лучи при увеличении угла падения проходят в материале всё больший оптический путь.



а) *s* - поляризация



б) *p* - поляризация

**Рисунок 5. Зависимость квадратов модулей коэффициентов отражения от длины волны для углов падения плоской электромагнитной волны  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ , для структуры, состоящей из слоев пары сурьма/карбонат бора ( $Sb/B_4C$ )**

### Выводы

Приведены результаты расчета характеристик отражения и прохождения плоской электромагнитной волны через многослойные структуры. Показано, что результаты, полученные с использованием теории графов, с высокой степенью точности совпадают с результатами, полученными на основе электродинамической модели. Приведены результаты для различных углов падения. Показано, что защитные свойства многослойных покрытий улучшаются с увеличением числа слоёв и имеют незначительную частотную зависимость в широком диапазоне.

### Библиографический список

1. **Nambiar, S.** Polymer-Composite Materials for Radiation Protection / S. Nambiar and J. T. W. Yeow // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2012. – Vol. 4. – № 11. – P. 5717-5726.
2. **Prokhorenko, E.M.** Radiation-protective properties of composition materials / E.M. Prokhorenko, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko [et al] // East Eur. J. Phys. – 2015. – Vol.2. – № 1. – P. 41-45.
3. **Вишняков, Е.А.** Аперiodические многослойные зеркала нормального падения на основе сурьмы для области спектра 8-13 нм / Е.А. Вишняков [и др.] // Квантовая электроника. – Т. 41. – № 1. – С. 75-80.

4. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. - М.: «Радио и связь». – 1988. – 248 с.

5. Сайтоткрытогодоступа «CXRO X-Ray Interactions With Matter»  
[http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)

**V.V. Biryukov, I.V. Malakhova, A.S. Raevskii**

## **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING MULTI-LAYER STRUCTURES FOR PROTECTION AGAINST X-RAY RADIATION**

**Purpose:** The results of calculating the coefficients of reflection and transmission of a plane electromagnetic wave through multilayer structures are presented.

**Design/methodology/approach:** The calculation of wave transmission and reflection coefficients in multilayer structures is based on a strict method of bilateral boundary conditions, when the dielectric layer is considered as a layer of finite thickness with a complex dielectric permittivity.

**Findings:** The results of calculating the characteristics of reflection and passage of a plane electromagnetic wave through multilayer structures are presented

**Research limitations/implications:** The presented research can help in protection against x-ray radiation.

**Originality/value:** Results for different angles of incidence are given. It is shown that the protective properties of multilayer coatings improve with an increase in the number of layers and have a slight frequency dependence over a wide range.

**Key words:** reflection coefficient, transmission coefficient, multi-layer structures

В.В. Бирюков, В.А. Малахов, И.В. Малахова, М.С. Мякишева, А.С. Раевский

## РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ САПР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г.Нижний Новгород

Актуальным вопросом современности является защита аппаратуры от электромагнитного излучения, в частности рентгеновского диапазона. Один из возможных вариантов эффективной защиты – использование многослойных плоскопараллельных структур, обеспечивающих необходимый уровень поглощения и отражения излучения. В представленной работе рассматривается метод анализа композитных материалов на основе электродинамического анализа в системе автоматизированного проектирования (САПР).

**Ключевые слова:** многослойные структуры; САПР; электродинамический анализ; композитные материалы; рентгеновский диапазон.

### Введение

Мощным инструментом, позволяющим производить трёхмерное моделирование электромагнитных процессов, являются современные системы автоматизированного проектирования (САПР). В данной работе рассматривается возможность эффективного применения САПР при моделировании и анализе композитных покрытий, предназначенных для защиты от электромагнитного излучения рентгеновского диапазона: многослойных плёночных покрытий.

### Постановка задачи о прохождении плоской волны через многослойную плоскопараллельную структуру



Рисунок 1. Схема многослойного покрытия, состоящая из пары веществ сурьма/карбонат бора

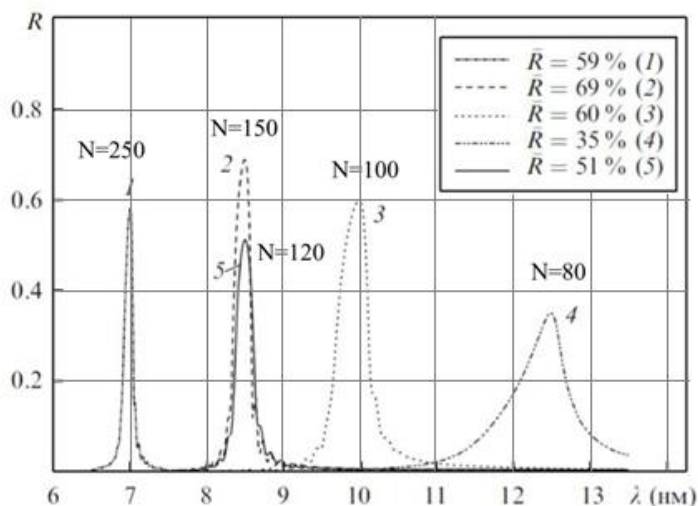
Один из вариантов эффективной защиты от электромагнитного излучения - использование многослойных плоскопараллельных структур, обеспечивающих допустимый уровень прохождения излучения. Для подтверждения возможности анализа многослойных структур с ис-

пользованием САПР, проводится сравнение результатов, полученных в результате анализа модели в САПР с результатами, изложенными в статье [1].

На рис. 1 представлена модель защитного покрытия, взятого для анализа. Покрытие представляет собой плоскопараллельные чередующиеся слои материалов: сурьмы и карбоната бора. Выбор пары материалов обусловлен тем, что они не должны быть подвержены взаимному влиянию, иметь большую контрастность показателей преломления между собой и обеспечивать минимальный коэффициент прохождения в интересующем частотном диапазоне.

Результаты расчетов коэффициента отражения в статье [1] для периодических структур, состоящих из пары веществ сурьма/карбонат бора, для разного числа слоев  $N$  приведены на рис. 2. Структура из 250 слоёв пар сурьма/карбонат бора (линия 1) имеет максимум отражения 59%, на длине волны 7 нм. Для 150 слоёв пар Сурьма/Карбонат бора (линия 2) максимум приходится на длину волны 8,5 нм, для 100 слоев (линия 3) – на 10 нм, для 80 слоев (линия 4) – на 12,5 нм.

При уменьшении числа слоёв увеличивается длина волны, на которую приходится максимум отражения. При этом уменьшается коэффициент отражения, а полоса отражения увеличивается.



**Рисунок 2. Коэффициенты отражения для периодических структур, состоящих из пары веществ сурьма/карбонат бора (линии 1-4) и сурьма/скандий (линия 5) для разного числа слоев  $N$**

### Методика расчётов в САПР

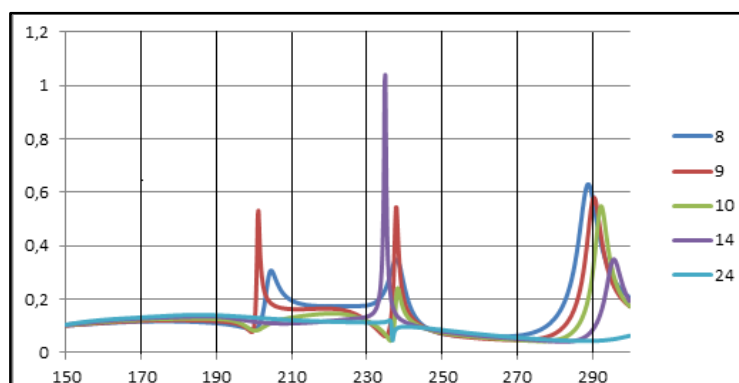
Большинство САПР, предназначенных для электромагнитного анализа, не позволяют производить расчёты на частотах, соответствующих мягкому рентгеновскому диапазону. Как правило, такие разработки, либо отсутствуют в свободном доступе, либо предназначены для узкоспециализированных задач. Методика, предложенная для моделирования и анализа структуры в мягком рентгеновском диапазоне - получение аналогичных зависимостей коэффициента отражения и прохождения для структур на меньших частотах, применяя принцип электродинамического подобия. Цель работы - подтверждение возможности применения данного метода анализа. Для моделирования структуры бесконечного размера с периодически повторяющимися фрагментами были использованы каналы Флоке. Для выбранных размеров ячейки Флоке можно выбрать минимальное число мод - фундаментальные типы волн

Флоке TE (0,0) и ТМ (0,0), что соответствует моделированию падающей на поверхность плоской волны [2]. Направление падения плоской волны при этом задавалось перпендикулярным поверхности многослойного покрытия.

Толщина периода  $d=0.65994$  мм (совместная толщина слоев сурьмы и карбоната бора),  $N$ -количество периодов,  $a=b=1,5$  мм – продольные размеры ячейки Флоке. Частоты, на которых производится анализ: (150–300) ГГц, что соответствует диапазону длин волн (2–1) мм. Данный диапазон частот был поставлен в соответствие диапазону длин волн (20–10) нм, то есть коэффициент подобия составил величину  $10^5$  (во столько раз происходило уменьшение частоты и увеличение толщины плёнок). При этом частотная зависимость диэлектрической проницаемости перенесена из диапазона (20–10) нм в диапазон (2–1) мм.

Первичный расчет анализируемой многослойной плоскопараллельной структуры показал наличие аномальных пиков в характеристиках и говорит о недостаточной точности вычислений (особенно при малом количестве слоев в структуре). В используемой САПР для электродинамического анализа используется метод конечных элементов. Для устранения ошибок анализа необходимо увеличение разбиения вычислительной сетки. Параметр точности определяется как количество ячеек разбиения на одну длину волны.

На рис.3 показан коэффициент отражения для структуры с количеством периодов  $N=2$ . Увеличение количества ячеек на одну длину волны производилось от восьми до 24. Наличие аномальных пиков в характеристике убывает с ростом точности. В результате коэффициент отражения при высокой точности расчетов имеет один максимум, и характеристика ведет себя достаточно плавно в диапазоне частот. Это соответствует ожидаемым результатам для структуры с малым количеством слоев.



**Рисунок 3. Коэффициент отражения для структуры с  $N=2$  при увеличении точности расчетов**

Также возможно увеличение точности за счет уменьшения частотного диапазона, в котором производится расчёт при фиксированном размере сетки. Исходный диапазон частот может быть разбит на три частотных участка (150-200 ГГц; 200-250 ГГц; 250-300 ГГц), для каждого из которых расчеты проводятся отдельно. Был произведен расчет коэффициентов отражения структуры с количеством периодов  $N=2$  для случаев широкого и узких диапазонов анализа. Характеристики совпадают, кроме малого частотного диапазона, есть возможность проанализировать его отдельно. В дальнейшем наиболее рациональным вариантом по времени анализа структуры является расчет в широком диапазоне частот, а затем уже детальный анализ интересующих частотных участков или участков, на которых присутствуют скачки в характеристиках.

## Результаты расчётов структуры

При использовании предлагаемого метода анализа в САПР с использованием принципа электродинамического подобия были получены характеристики многослойной структуры, представленные на рис.4 – 6. Представлены модуль коэффициента отражения и модуль коэффициента прохождения структуры, состоящей из пар слоев сурьма/карбонат бора, при разном количестве периодов (увеличение количества периодов от 1 до 10).

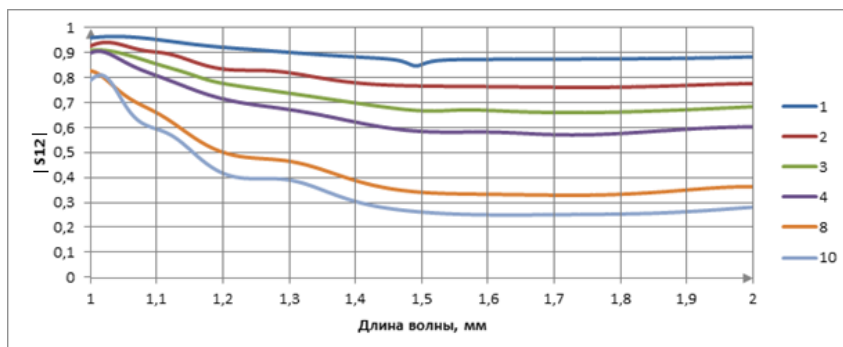


Рисунок 4. Модуль коэффициента прохождения для структур разным количеством периодов

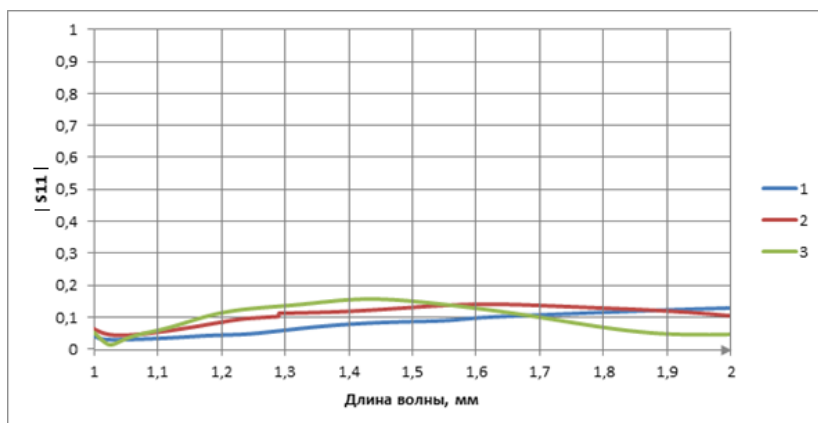


Рисунок 5. Модуль коэффициента отражения для структур разным количеством периодов

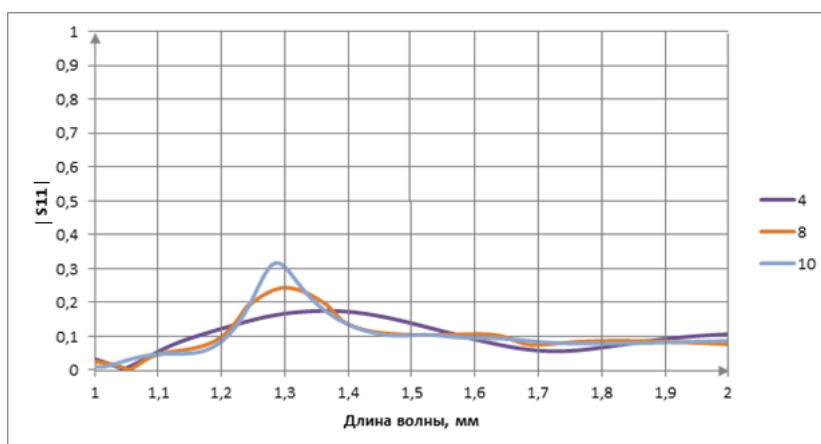


Рисунок 6. Модуль коэффициента отражения для структур разным количеством периодов



Сравнивая полученные в САПР результаты, полученные по предложенному в данной работе методу, с результатами, представленными в статье [1] можем наблюдать аналогичный характер поведения зависимостей коэффициентов отражения и прохождения от частоты. При увеличении количества периодов в структуре наблюдается:

- сдвиг максимума коэффициента отражения в сторону меньших длин волн;
- увеличение значения коэффициента отражения в максимуме;
- сужение частотного диапазона, в котором наблюдается повышенный коэффициент отражения;
- уменьшение коэффициента прохождения.

Также при увеличении длины волны наблюдается установление достаточно стабильного коэффициента прохождения.

### Выводы

Моделирование и анализ композитных покрытий, предназначенных для защиты от электромагнитного излучения рентгеновского диапазона в САПР с использованием метода электродинамического подобия, позволяет решать задачу с многослойной структурой. Трудности, которые могут возникнуть при использовании представленного метода анализа: привлечение больших затрат машинного времени и необходимость контроля точности вычислений. Рост времени анализа наблюдается при увеличении количества периодов в многослойной структуре. Помимо задания падения волны перпендикулярно поверхности многослойного покрытия, в САПР возможно рассмотрение падения на структуру плоской волны под произвольным углом. Кроме того моделирование с использованием САПР позволяет анализировать и оптимизировать и более сложные структуры, включающие в себя различные неоднородности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-07-20152.*

### Библиографический список

1. **Вишняков, Е.А.** Аперриодические многослойные зеркала нормального падения на основе сурьмы для области спектра 8-13 нм / Е.А. Вишняков [и др.] // Квантовая электроника. – Т. 41. – № 1. – С. 75-80.
2. **Курушин, А. А.** Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №. 11. – С. 3-3.

**V.V. Biryukov, V.A. Malakhov, I.V. Malakhova, M.S. Myakisheva, A.S. Raevskii**

### **CALCULATION OF THE INTERACTION CHARACTERISTICS OF X-RAY RADIATION WITH COMPOSITE MATERIALS USING SPECIALIZED CAD SYSTEMS**

**Purpose:** Consideration of a method for analyzing composite materials based on electrodynamic analysis in a computer-aided design system.

**Design/methodology/approach:** Modeling and analysis of composite coatings designed to protect against x-ray electromagnetic radiation in CAD using the electrodynamic similarity method.

**Findings:** The module of the reflection coefficient and the module of the passage coefficient of a structure consisting of pairs of antimony/boron carbonate layers for different number of periods are presented.

**Research limitations/implications:** Using this method will help in the current issue of protection of equipment from electromagnetic radiation, in particular x-ray range.

**Originality/value:** Modeling and analysis of composite coatings designed to protect against x-ray electromagnetic radiation in CAD using the electrodynamic similarity method allows solving a problem with a multi-layer structure and with more complex structures that include various inhomogeneities.

**Key words:** multilayer structures; CAD; electrodynamic analysis; composite materials; x-ray range.

М.П. Гладышева, Е.В. Колпакова, Д.Е. Орехов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА УСАДКИ ОТ РЕЖИМОВ ЛАМИНИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ ПО ТЕХНОЛОГИИ LTCC

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

В статье обсуждается вопрос возможности влияния на коэффициент усадки режимов ламинирования, что позволит при наличии отклонения от заданного коэффициента усадки, изготовить многослойные керамические платы, не корректируя имеющиеся пакеты фотошаблонов и трафаретов для проведения печати проводниковых элементов, программ пробивки отверстий.

**Ключевые слова:** многослойная керамическая плата, технология низкотемпературного совместного обжига, технология LTCC, СВЧмодуль, коэффициент усадки, коэффициент масштабирования.

Технология изготовления многослойных керамических плат (МКП) методом низкотемпературного совместного обжига (Low Temperature Cofire Ceramic – LTCC) широко применяется в области создания СВЧ техники. Широкий диапазон рабочих частот МКП (до 100 ГГц) позволяет размещать на одной плате планарную антенну, СВЧ приемо-передающий модуль и НЧ схемы аналоговой и цифровой обработки сигнала [1], значительно сокращая габариты и массу аппаратуры с одновременным повышением ее надежности.

В НИИИС им. Ю.Е. Седакова (далее НИИИС) имеется опыт проектирования LTCC-устройств, создан участок по изготовлению МКП, оснащенный современным технологическим оборудованием. Маршрут изготовления МКП включает в себя следующие технологические операции: пробивка переходных отверстий и полостей, заполнение переходных отверстий пастой, трафаретная печать проводниковых элементов, пакетирование, ламинирование керамических заготовок, резка и обжиг модулей [2].

Остановимся более подробно на операции ламинирования. Данная операция на предприятии проводится на установке ILS-66s фирмы КЕКО методом изостатического прессования в герметичной рабочей камере, заполненной водой. Таким образом, давление на заготовку в установке подается равномерно по всей площади заготовки, включая торцы и углубления. Равномерность давления, в свою очередь, исключает образование «пузырей», отслоений в местах расположения углублений и неравномерность плотности керамики. Изостатическое прессование ведет к минимизации отслоений, существенно улучшает плоскостность структуры после спекания и равномерность при усадке.

Керамическая заготовка располагается на металлической пластине-носителе и представляет собой предварительно собранный на одноосном прессе пакет керамических листов. Данная конструкция помещается в металлизированный пакет, из которого откачивается воздух.

Чтобы активизировать процесс сцепления слоев, при котором органическое связующее проникает из слоя в слой, вода в камере подогревается. Давление и температура в камере задается оператором в зависимости от толщины и количества слоев в структуре.

Для изготовления МКП необходимо предварительно разработать управляющие программы на фотошаблоны и пробивку отверстий и полостей с учетом коэффициента масштабирования, соответствующему предполагаемому коэффициенту усадки изготавливаемой платы. Однако при изготовлении МКП очень сложно получить коэффициент усадки тождественный заданному коэффициенту масштабирования, так как усадка зависит от многих факторов (толщины МКП, наличия полостей, процентного соотношения металла и керамики, количества переходных отверстий и т.д.). Несоответствие заданного и полученного коэффициента усадки может привести к смещению контактных площадок относительно заданного положения в конструкторской документации (КД), что вызовет сложности при установке навесных элементов.

Корректировка коэффициента масштабирования сопряжена с необходимостью повторного проведения технологической подготовки производства, а именно изготовления нового пакета фотошаблонов и трафаретов для проведения печати проводниковых элементов, программ пробивки отверстий. В тоже время, ряд специалистов предлагает регулировать усадку путем изменения режима ламинирования, тем самым, как бы «подогнать» ее под уже заданный коэффициент масштабирования.

В настоящей работе исследования проводились с использованием керамического материала SK-47 производства фирмы КЕКО (Словения) [3, 4].

Рекомендованный поставщиком керамики режим ламинирования керамических образцов из материала SK-47 [5]:

- давление – 21 МПа;
- температура – 60 °С;
- время ламинирования – 10 мин;
- время предварительного нагрева – 5 мин.

Специалисты фирмы КЕКО предлагают влиять на усадку изменением температуры ламинирования, как показано на рис.1 [5]. Из данного графика следует, что увеличение температуры приводит к уменьшению коэффициента линейной усадки.

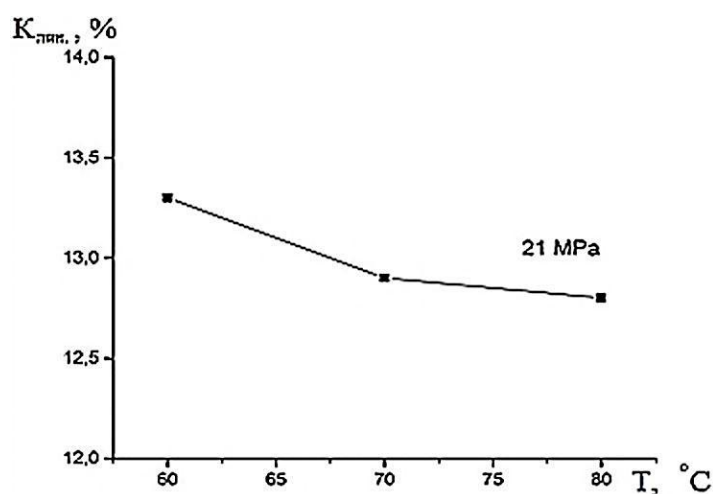


Рисунок 1. Зависимость коэффициента линейной усадки от температуры ламинирования

Задачей данных исследований было построение графика зависимости коэффициента линейной усадки от температуры ламинирования, полученного при использовании имеющегося оборудования.

Для этого были подготовлены три образца, при ламинировании которых изменяли температуру, а остальные параметры оставляли стандартными:

- образец №1 ламинировали при  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- образец № 2 – при  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- образец № 3 – при  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Контроль усадки проводили по изменению расстояния между сквозными отверстиями до и после обжига. Отверстия сверлились в четырех углах ламинированных образцов. Обжиг проводили по разработанной программе в соответствии с рекомендованным поставщиком материала профилем обжига. Контроль внешнего вида показал, что данные образцы деформации не имели, неплоскостность составила менее 50 мкм.

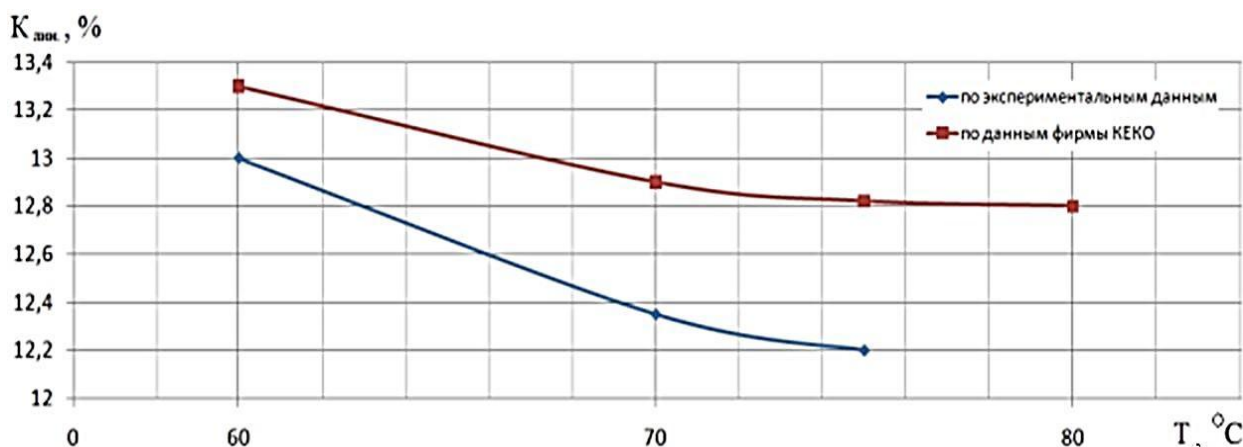
Изменения значений линейной усадки, а также значения плотности образцов приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Значения линейной усадки, плотности образцов № 1-3**

№образца	Температура ламинирования, $T$ , $^{\circ}\text{C}$	$K_{\text{лин.}}$ , %	Плотность, $\rho$ , $\text{г/см}^3$
1	60	13,0	2,9
2	70	12,35	2,9
3	75	12,2	2,9
Данные по ТУ6365-001-05717914-2019 [6]		$13,5 \pm 0,5$	2,9

График зависимости коэффициента линейной усадки от температуры ламинирования, полученный в результате эксперимента, в сравнении с графиком, представленным фирмой КЕКО приведен на рис. 2.



**Рисунок 2. Зависимости коэффициента линейной усадки от температуры ламинирования**

Сравнивая полученные результаты, можно сказать, что данные зависимости качественно не отличаются. Небольшое отличие  $\sim 0,5\%$ , можно объяснить разницей используемого оборудования при проведении исследований в НИИИС и фирме КЕКО. Так, используемый изостатический пресс не дает возможности задать температуру ламинирования выше  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Не-

обходимо отметить, что изменение температуры в процессе ламинирования не оказывает влияния на плотность образца.

Таким образом, при изготовлении МКП увеличивая температуру ламинирования от 60 до 75 °С можно уменьшить линейную усадку с 13 до 12,2 %. Тем самым, в ряде случаев, можно получить необходимую усадку МКП без повторного изготовления нового пакета фотошаблонов и трафаретов для проведения печати проводниковых элементов, программ пробивки отверстий и полостей.

Кроме того известно[7], что усадку, например, керамики фирмы DuPont, можно регулировать, изменяя давление ламинирования. Поэтому были проведены исследования по влиянию давления ламинирования на линейный коэффициент усадки керамики SK-47. Были изготовлены образцы № 4 и № 5 с изменением давления ламинирования, остальные параметры – без изменений (по рекомендованному режиму):

- образец № 4 ламинировали при  $P = 12$  МПа (1800 psi);
- образец № 5 – при  $P = 31$  МПа (4500 psi).

Контроль внешнего вида показал, что данные образцы деформации не имели, неплоскостность - менее 50 мкм.

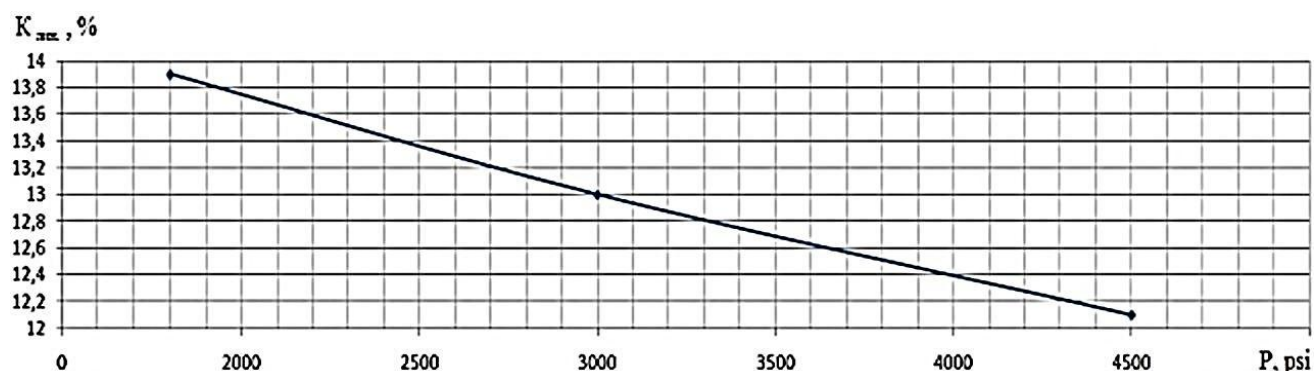
Для сравнения был использован образец № 1, заламинированный по рекомендованному производителем материалов режиму(при  $P = 21$  МПа(3000psi)). Значения линейной усадки, плотности приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

**Значения линейной усадки, плотности образцов № 1, 4, 5**

№ образца	Давление ламинирования, P, МПа (psi)	$K_{\text{лин.}}$ , %	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
4	12 (1800)	13,9	2,9
1	21 (3000)	13,0	2,9
5	31 (4500)	12,1	2,9
Данные по ТУ6365-001-05717914-2019 [6]		13,5±0,5	2,9

На рис. 3 приведена полученная зависимость коэффициента линейной усадки от давления ламинирования.



**Рисунок 3. Зависимость коэффициента линейной усадки от давления ламинирования**

Анализируя зависимость, представленную на рис. 3, можно утверждать, что при изготовлении МКП, увеличивая давление ламинирования от 1800 до 4500 psi можно уменьшить линейную усадку с 13,9 до 12,1 %.

Проведенные исследования показали, что изменением таких параметров ламинирования, как температура и давление, можно изменять коэффициент усадки на 1-2 % без изменения плотности керамики. Такое незначительное изменение коэффициента усадки может привести к существенному увеличению или уменьшению габаритных размеров МКП. Например, при размере МКП 40 мм отклонение размеров от КД может составить до 700 мкм.

### **Выводы**

1. Изменение таких параметров ламинирования, как температура и давление, может изменять коэффициент усадки на 1-2 % без изменения плотности керамики.

2. Если отклонение полученного коэффициента усадки от заданного коэффициента масштабирования составляет не более 2 %, можно изготовить МКП с требуемой усадкой, исключая повторное изготовление нового пакета фотошаблонов и трафаретов для проведения печати проводниковых элементов, программ пробивки отверстий и полостей.

### **Библиографический список**

1. **Симин, А.** Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // Компоненты и технологии – 2005 - №5 - С. 190-196.

2. **Гладышева, М.П.** Исследования и разработка технологии изготовления многослойных керамических LTCC-плат из отечественной системы материалов / М.П. Гладышева, Е.В. Колпакова, Д.Е. Орехов // Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии – 2019» – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. - С. 173-176

3. **Гладышева, М.П.** Исследование возможности использования керамического материала SK-47 для изготовления многослойных керамических плат / М.П. Гладышева, Е.В. Колпакова, Д.Е. Орехов // Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии – 2019» – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. - С. 168-172.

4. **Макарович, К.** LTCC-система SK-47 от KEKOEquipmentLtd. / К. Макарович, В. Мейлицев, С. Чигиринский // Электроника (наука, технология, бизнес) - 2018 - № 5 (00176) - С. 98-102.

5. Правила проектирования многослойных LTCC/HTCC компонентов (модулей) // ООО «АК Микротех» (ред. 08.2019).

6. Технические условия ТУ 6365-001-05717914-2019. Ленты LTCC/KEKOSK-47 // ООО «КЕКО-Р». - 2019.

7. Материалы лекций «LTCC-материалы, процессы и технологии», Технический университет, г. Ильменау, январь, 2011.

**M.P. Gladysheva, E.V Kolpakova, D.E. Orehov**

**INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE SHRINKAGE COEFFICIENT ON THE LAMINATION MODES IN THE MANUFACTURE OF MULTILAYER CERAMIC CIRCUIT BOARDS IN LTCC TECHNOLOGY**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakova”, Nizhny Novgorod

**Object of research:** Shrinkage coefficient of ceramic material SK-47.

**Purpose:** To study the possibility of adjusting the shrinkage coefficient lamination modes.

**Results:** Studies have shown that by varying lamination parameters such as temperature and pressure, the shrinkage coefficient can be changed by 1-2% without changing the density of the ceramic.

**Key words:** multilayer ceramicboard, Low Temperature Co-firing Technology Ceramic, LTCCtechnology, microwave module, shrinkage coefficient, coefficient scalings.



А.Н. Голубев, В.Л. Зефиров

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Проведены работы по поиску, исследованию и испытаниям новых перспективных электроизоляционных и коррозионностойких порошковых покрытий для радиоэлектронной аппаратуры морского базирования.

**Ключевые слова:** порошковые краски, защита от коррозии, морской климат, сверхвысокочастотная техника.

Создание и эксплуатация радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) морского базирования является сложной задачей из-за высокого коррозионного воздействия морского тумана. В связи с этим всегда актуальны исследования возможности применения новых лакокрасочных материалов (ЛКМ) для разрабатываемой сверхвысокочастотной (СВЧ) техники с целью увеличения срока эксплуатации в условиях повышенной коррозионной нагрузки, таких как высокие или низкие температуры, повышенная влажность, соляной туман, ультрафиолетовое (УФ) излучение и др. Основным требованием к ЛКМ применяемым в новых разработках является сохранение защитных свойств при максимально длительном сроке эксплуатации в жестких условиях.

В последнее время широкое развитие получили технологии в области порошковых покрытий. Данные покрытия имеют ряд преимуществ: отсутствие растворителей и других летучих веществ, возвращение в производственный цикл при нанесении (безотходность), относительная простота и экономичность процесса. Как правило, порошковые покрытия наносят в один слой вместо двух-трех по сравнению с растворными ЛКМ, при этом обладают хорошими защитными свойствами. Нанесенные порошковые покрытия не уступают растворным ЛКМ, а в некоторых случаях более устойчивы к внешним воздействующим факторам (ВВФ).

Применяемое оборудование, как и сам технологический процесс формирования порошковых покрытий, существенно отличается от таковых для растворных красок. Наиболее распространенными способами нанесения порошковых покрытий являются трибостатическое или электростатическое распыление. Появление и применение нового оборудования и установок нанесения порошковых покрытий позволяет получать качественные покрытия различными методами при окраске изделий со сложным профилем (глухие отверстия, внутренние углы, углубления и т.п.).

В последние годы появились новые разработки в области порошковых материалов, покрытия из которых обладают относительно низкой влагопроницаемостью, высокой коррозионной стойкостью с сохранением защитных и декоративных свойств до 20 лет эксплуатации и улучшенными механическими и диэлектрическими свойствами. Выпускаемые порошковые краски различаются по цвету (классификация по RAL), типу пленкообразователя (эпоксидные, полиэфирные и др.), по фактуре внешнего вида покрытия (гляцевые, матовые, «муар» и др.). Также имеются и порошковые покрытия со специальными свойствами: цинконаполненные грунты, лаки, УФ-отверждаемые покрытия, электроизоляционные и химически стой-

кие покрытия. Свойства данных покрытий позволяет расширить область применения порошковых покрытий и увеличить срок эксплуатации окрашенных изделий.

Целью данной работы являлся поиск и исследование перспективных электроизоляционных и коррозионностойких порошковых покрытий из отечественных материалов, которым возможно найти применение в изделиях РЭА СВЧ техники с возможностью длительной эксплуатации в условиях морского климата и других агрессивных ВВФ. В результате информационного поиска были выявлены перспективные для дальнейших исследований материалы для выполнения работ по исследованию и разработке технологии нанесения данных покрытий. Наибольшее применение имеют эпоксидные, эпоксидно-полиэфирные (гибридные), и полиэфирные краски. В меньшей степени используют (по причине повышенной стоимости) полиуретановые и полиакриловые материалы. Эпоксидные материалы пользуются большим спросом в промышленности. Они пригодны для нанесения на поверхность всеми известными способами нанесения. Главные направления использования эпоксидных материалов – защита от коррозии и электроизоляции. Покрытия отличаются высокой адгезией, механической прочностью и химической стойкостью. Отвердителями служат амины, амиды, соли амидов и ангидриды кислот. Эпоксидные покрытия хорошо защищают изделия от коррозии в атмосфере различных климатических, однако, при воздействии УФ-лучей наблюдается ухудшение декоративных свойств (пожелтение, потеря глянца, меление). Поэтому покрытия рекомендуется эксплуатировать внутри помещений или под навесом. Эпоксидно-полиэфирные материалы наиболее распространены в технологии порошковых покрытий. Их получают путем сочетания эпоксидного и полиэфирного (карбоксилсодержащего) олигомеров и поэтому нередко называют гибридными составами. Это приводит к получению покрытий с промежуточными свойствами. По коррозионным свойствам они приближаются к эпоксидным, но в то же время существенно уступают им по устойчивости к действию растворителей и щелочей. С другой стороны, в отличие от эпоксидных, они более атмосферостойки и дольше сохраняют исходный внешний вид. Основой полиэфирных материалов, как и в гибридных составах, являются карбоксил содержащие насыщенные полиэфирные. Применяют отвердители двух типов – триглицидилизоцианурат (ТГИЦ) и гидроксиламид (Примид). По технологическим характеристикам полиэфирные материалы не отличаются от эпоксидных и гибридных. Отличительные их особенности – стойкость к перегреву, хорошие атмосферостойкость и устойчивость к воздействию УФ-лучей. Это – один из наиболее светостойких и атмосферостойких видов порошковых материалов. Стойкость покрытий к химическим агентам также хорошая, но несколько ниже, чем у эпоксидных покрытий. Полиэфирные материалы можно использовать как самостоятельные покрытия, так и в многослойных системах с использованием порошковых цинконаполненных грунтов, для улучшения коррозионной стойкости.

Технология нанесения порошковых покрытий включает в себя следующие операции:

- 1) подготовка поверхности перед окрашиванием;
- 2) подготовка порошковой краски;
- 3) нанесение порошковой краски;
- 4) полимеризация покрытий;
- 5) контроль качества покрытий.

Подготовка поверхности – начальная стадия процесса получения покрытия и в значительной степени определяет коррозионную стойкость окрашенных изделий, а также долговечность покрытия. Наличие загрязнений на поверхности под слоем порошковой краски может приводить к возникновению многочисленных очагов коррозии и последующему разрушению покрытия. При эксплуатации изделий с нанесенным без конверсионного подслоя покрытием

в жестких атмосферных условиях через пленку к подложке будут поступать (диффузионно) влага, кислород, кислотные загрязнения. Их контакт с металлической поверхностью будет приводить к аналогичным результатам. В качестве конверсионных подслоев часто используют распространенные химические покрытия такие как: химическое оксидирование или хромирование для алюминия и его сплавов и фосфатирование для изделий из стали. Для изделий, эксплуатируемых в жестких атмосферных условиях и агрессивных средах, широко применяют цинконаполненные грунты, применение которых исключает необходимость нанесения конверсионных подслоев. Для проведения исследований были выбраны различные марки эпоксидных и полиэфирных красок, а также цинконаполненные порошковые грунты.

На металлические пластинки размером 150x70, подготовленные по ГОСТ 8832 [1] и изготовленные из сплавов АМГ6 и СТ20 (далее – экспериментальные образцы), были нанесены порошковые покрытия марок: П-ЭП-7150, П-ПЛ-1010, «Приматек» серии 69, «Приматек» серии 49 и двухслойные системы покрытий: цинконаполненный грунт «Приматек» серия 69 + краска «Приматек» серия 49, цинконаполненный грунт П-ЭП-0190 + краска П-ПЛ-1010. Определены физико-механические свойства порошковых покрытий по следующим показателям:

- внешний вид покрытия по ГОСТ 9.032 [2];
- эластичность покрытия при изгибе по ГОСТ 31974 [3];
- прочность покрытия при ударе по ГОСТ 4765 [4];
- адгезия по ГОСТ 31149 [5].

Полученные результаты приведены в табл.1.

*Таблица 1*

**Физико-механические характеристики электроизоляционных и коррозионностойких покрытий из отечественных материалов.**

Покрытие/Система покрытия	Внешний вид	Прочность покрытия при изгибе, мм	Прочность пленки при ударе, см	Адгезия, баллы
Краска П-ЭП-7150	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	4	40	0
Краска П-ПЛ-1010	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	3	40	0
Краска «Приматек» серия 49	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	3	50	0
Краска «Приматек» серия 69	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	4	40	0
Грунт «Приматек» серия 69 Краска «Приматек» серия 49	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	4	40	0
Грунт П-ЭП-019 Краска П-ПЛ-1010	Поверхность покрытия однородная без механических включений. Морщины и кратеры отсутствуют	3	50	0

Полученные результаты свидетельствуют о высокой стойкости данных покрытий к механическим воздействиям и высокой адгезии к металлическим основаниям.

Исследования диэлектрических свойств были проведены по следующим показателям:

- тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) по ГОСТ 22372 [6];
- диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) по ГОСТ 22372 [7];
- удельное объемное сопротивление ( $\rho_v$ ) по ГОСТ 6433.2 [8].

Образцы для определения тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления лакокрасочных материалов были получены на медных пластинках диаметром с нанесенным порошковым покрытием. Полученные результаты в ходе исследования диэлектрических свойств экспериментальных образцов, приведены в табл.2.

**Таблица 2**

**Диэлектрические показатели электроизоляционных и коррозионностойких покрытий из отечественных материалов**

Покрытия	Удельное объемное сопротивление ( $\rho_v$ ), Ом·м	Тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ), при частоте $10^6$ Гц	Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ), при частоте $10^6$ Гц
Краска П-ЭП-7150	$1,2 \cdot 10^{14}$	0,018	2,4
Краска П-ПЛ-1010	$2,1 \cdot 10^{13}$	0,0074	2,8
Краска «Приматек» серия 49	$7,9 \cdot 10^{13}$	0,0067	2,7
Краска «Приматек» серия 69	$3,4 \cdot 10^{14}$	0,0089	2,5

Для оценки стойкости исследуемых покрытий к воздействию ВВФ в условиях хранения по специальной программе, на экспериментальные образцы из стали марки СТ20 и АМг6 толщиной 0,8-1,2 мм нанесли покрытия (системы покрытия) из данных порошковых красок.

Для оценки стойкости порошковых покрытий к воздействию соляного тумана по ГОСТ 9.401 [9], на экспериментальных образцах были сделаны надрезы лакокрасочного покрытия проходящий до самой поверхности металла и выдержаны в камере соляного тумана в течение 500 ч для однослойных порошковых покрытий (1 слой порошковой краски) и 1000 ч для двухслойных систем покрытия (1 слой цинконаполненного грунта и 1 слой порошковой краски).

Оценку защитных свойств покрытий на экспериментальных образцах после климатических испытаний, проводили по изменению внешнего вида покрытий в соответствие с ГОСТ 9.407 [10]. Внешний вид окрашенных экспериментальных образцов деталей остался без изменений, разрушения отсутствуют, распространение коррозии под надрезом не обнаружено, вследствие чего можно сделать вывод, что данные покрытия устойчивы к воздействию ВВФ в условиях хранения до 20 лет и к воздействию соляного тумана до 1000 ч.

Анализируя результаты, представленные в данной работе можно сделать вывод, что выбранные покрытия, возможно использовать в качестве электроизоляционных материалов с коррозионностойкими свойствами для корпусной изоляции радиоэлектронной аппаратуры при изготовлении элементов СВЧ компонентов антенно-фидерных систем морского базирования.

## Выводы

Выявлены, опробованы и испытаны новые перспективные порошковые краски и грунты, обеспечивающие наилучшие защитные свойства при эксплуатации РЭА СВЧ техники в условиях морского климата. Установлено, что исследуемые порошковые покрытия «Приматек» серий 49 и 69, П-ПЛ-1010, П-ЭП-7150 и цинконаполненные грунты «Приматек» серии 69 и П-ЭП-0190 характеризуются высокой стойкостью к воздействию внешних климатических факторов, в том числе стойкость к соляному туману, а также обладают повышенной долговечностью и могут быть рекомендованы к широкому применению.

## Библиографический список

1. ГОСТ 8832-76 «Материалы лакокрасочные. Методы получения лакокрасочного покрытия для испытания» - д.в. 01.01.77.
2. ГОСТ 9.032-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения» - д.в. 01.07.75.
3. ГОСТ 31974-2012 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности покрытия при изгибе вокруг цилиндрического стержня» - д.в. 01.08.2014.
4. ГОСТ 4765-73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе» - д.в. 01.07.74.
5. ГОСТ 31149-2014 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза» - д.в. 01.09.2015.
6. ГОСТ 22372-77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до 5·10<sup>6</sup> Гц» - д.в. 01.01.78.
8. ГОСТ 6433.2-71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении» - д.в. 01.07.72.
9. ГОСТ 9.401-2018 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов» - д.в. 01.07.2019.
10. ГОСТ 9.407-2015 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида» - д.в. 01.03.2016.

**A.N. Golubev, V. L. Zefirov**

## **RESEARCH OF POWDER COATINGS FOR PROTECTION OF PRODUCTS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT, OPERATED IN THE MARINE CLIMATE.**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

Conducted research and testing of new promising electrical insulation and corrosion-resistant powder coatings for radio-electronic equipment, operated in the marine climate.

**Keywords:** powders paints, corrosion protection, superhigh-frequency devices, marine climate.

Т.Л. Гудина, Ю.А.Светлаков

## ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА ДЛИННОМЕРНЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Приводятся основные результаты разработки технологии получения длинномерных отверстий малых размеров сечений, в том числе переменных, с применением электроэрозионной обработки. Технология используется при изготовлении волноводов и волноводных переходов сверхвысокочастотных радиоэлектронных устройств и систем.

**Ключевые слова:** электроэрозионная размерная обработка, металлический волновод, волноводный канал, сверхвысокочастотный.

Размерная обработка любых деталей имеет свои особенности в зависимости от их конструктивного исполнения, использования основных и вспомогательных материалов, состояния имеющейся технологической базы [1] и т.д. Технологическая база и ее состояние [2] во многом определяет применение тех или иных методов обработки [3], в том числе наиболее эффективных с экономической точки зрения (затраты на трудовые и материальные ресурсы). Например, нередко возникают задачи получения отверстий и пазов сложной формы, длинномерных отверстий малого диаметра, отверстий с переменным сечением и др., изготовление которых традиционными методами или трудоемко и малоэффективно, или невозможно. В данных случаях, альтернативой для решения вышеуказанных задач может быть применение электрофизических методов размерной обработки [4], в том числе электроэрозионной обработки (ЭЭО).

Целью работы являлся подбор наиболее эффективных способов и технических решений для изготовления отверстий в элементах антенно-фидерных систем (АФС) СВЧ и КВЧ диапазонов, таких как волноводные каналы, волноводные переходы, элементы рупорных антенн и т.п. [5 -8]. Основными особенностями отверстий в таких элементах АФС являются большая длина отверстий, малое отношение размеров сечения отверстий к глубине обработки, наличие переменных сечений отверстий, высокая точность и качество обработки.

Технические требования, предъявляемые к отверстиям в деталях элементов АФС:

- точность обработки – до 9 квалитета;
- шероховатость обработанных поверхностей – от Ra 2,5 до Ra 0,32;
- отношение наименьшего размера сечения отверстия к его длине – до 1:100.

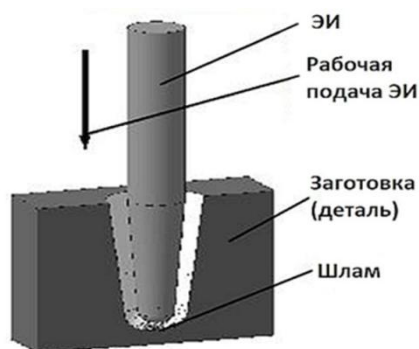
В результате анализа состояния технологической базы и наличия технологических средств [3] на момент начала проведения работы выявлено, что получение сквозных отверстий с необходимыми точностью и качеством можно обеспечить ЭЭО на проволочно-вырезной установке, имеющейся в составе технологической базы института.

На данной установке размерная обработка заготовок из токопроводящих материалов осуществляется в диэлектрической жидкости проволокой, при этом заготовка является одним из

электродов, а проволока - электродом-инструментом (ЭИ). При обработке на установке сквозного отверстия с замкнутым профилем в заготовке должно быть выполнено технологическое отверстие для заправки проволоки [5].

К технологическим отверстиям, как правило, не предъявляются высокие требования по точности и качеству изготовления при условии, что проекции каждого технологического отверстия на установочную базовую поверхность заготовки гарантированно не выходят за границы проекций соответствующего вырезаемого отверстия. При соотношении диаметра отверстия к его глубине более 1:10, как правило, не возникает проблем с обработкой. В этом случае можно использовать традиционную обработку резанием - сверление с применением стандартных сверл. Однако, изготовление отверстий с меньшим соотношением диаметра отверстия к его глубине проблематично в связи с возможным уводом оси отверстия во время сверления, закусыванием и разрушением сверла и другое, а также из-за отсутствия стандартных сверл большой длины. Решением данной проблемы может быть получение технологических отверстий на специализированных электроэрозионных установках, - так называемых электроэрозионных станках - «супердрелях» [6]. На этих установках возможна прошивка отверстий в токопроводящих материалах с соотношением диаметра отверстия к глубине обработки до 1:100 и менее. В качестве ЭИ используются специальные латунные или медные трубки, через которые во время работы прокачивается диэлектрическая рабочая жидкость (РЖ).

Эффективность ЭЭО с использованием трубчатого ЭИ прослеживается при рассмотрении физического явления электрической эрозии и технологической схемы процесса копировально-прошивочной ЭЭО. На рис. 1 показана в общем виде технологическая схема копировально-прошивочной ЭЭО.



**Рисунок 1. Технологическая схема копировально-прошивочной ЭЭО**

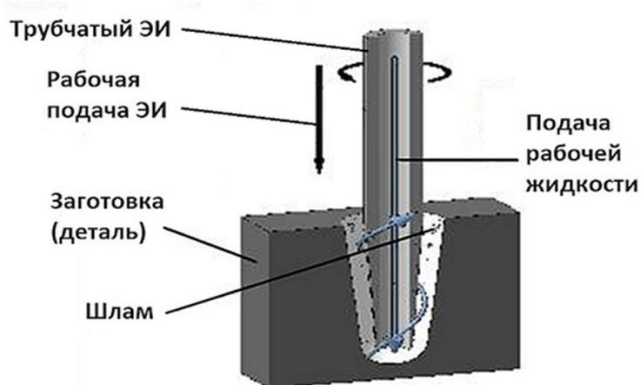
При сближении ЭИ и заготовки, погруженных в РЖ, между ними инициируются разряды под действием импульсного напряжения задающего генератора импульсов станка. В межэлектродном зазоре (МЭЗ) между заготовкой и ЭИ под действием сил, возникающих в каналах разрядов, жидкий и парообразный материал электродов, а так же продукты разложения РЖ, выбрасываются из зон разрядов в РЖ, окружающую их, и застывают в ней в виде отдельных частиц (шлама). В местах действия импульсов электрического тока на поверхностях электродов появляются лунки. Таким образом, осуществляется электрическая эрозия токопроводящего материала.

При небольшой глубине обработки при обеспечении достаточной прокачки РЖ через МЭЗ, шлам вымывается из зоны обработки с помощью специальных технологических средств (обычно - дополнительной подачей РЖ в зону обработки), и интенсивность эрозион-

ного процесса обработки находится на одном уровне. Однако, по мере увеличения глубины обработки, удаление шлама из зоны обработки становится затруднительным, в результате чего процесс ЭЭО, который во многом зависит и от состояния рабочей среды в МЭЗ, замедляется и на определенной глубине прекращается.

Как правило, копировально-прошивочная операция ЭЭО производится с вертикальной подачей ЭИ. Под действием силы тяжести шлам опускается вниз в зону обработки (см. рис. 1) и, таким образом в зоне обработки образуется взвесь из токопроводных частиц в РЖ. В результате этого в зоне обработки нарушается электрическая прочность рабочей среды. При постепенном загрязнении рабочей среды в МЭЗ в процессе обработки часть энергии электрических разрядов, направленной на разрушение материала заготовки и ЭИ, тратится на разложение присутствующих в МЭЗ частиц, - на так называемые «холостые» разряды. С увеличением глубины обработки количество шлама в МЭЗ увеличивается, и количество холостых разрядов так же увеличивается. При этом снижается эффективность электроэрозионной обработки и соответственно производительность. В итоге, на определённой глубине обработки, насыщенность рабочей среды частицами достигает такого уровня, что процесс ЭЭО прекращается.

Использование трубчатого ЭИ позволяет подавать РЖ под давлением в зону обработки через внутреннее отверстие ЭИ и вымывать из МЭЗ шлам (рис. 2). Поэтому рабочая среда в МЭЗ имеет относительно постоянные диэлектрические свойства (электрическая прочность), то есть условия для протекания процесса ЭЭО мало изменяются в процессе обработки.



**Рисунок 2. Технологическая схема копировально-прошивочной ЭЭО с использованием трубчатого вращающегося ЭИ**

Придание вращения ЭИ ещё более способствует удалению шлама из зоны обработки (вследствие образования гидродинамических потоков) и предотвращению снижения производительности процесса с увеличением глубины обработки. Кроме этого, вращение ЭИ с высокой частотой вкупе с прокачкой через него РЖ под давлением улучшает качество обработки за счет придания ЭИ прямолинейности и жесткости в процессе обработки, - например, способствует уменьшению овальности и отклонения от прямолинейности обрабатываемого отверстия. Это особенно касается случая применения трубчатых ЭИ небольших диаметров (менее 2 мм).

В результате проведенных работ была предложена и экспериментально опробована технология изготовления сквозных отверстий с малым отношением размеров сечения отверстий к глубине обработки (до 1:100), необходимыми точностью (до 9 квалитета) и шероховатостью обработанных поверхностей (от Ra 2,5 до Ra 0,32), включающая операции:



1. Прошивка технологических отверстий на электроискровом координатно-прошивочном станке-«супердрели».

2. Вырезка электродом-проволокой отверстий с заданными точностью и качеством обработки на электроэрозионной проволочно-вырезной установке.

Прошивка технологических отверстий (операция 1) производилась на станке, предназначенном для прошивки отверстий трубчатыми электродами диаметрами от 0,3 до 3 мм. В ходе работы были исследованы режимы обработки технологических отверстий в образцах из алюминиевых сплавов, латуней и сталей, и подобраны сочетания значений параметров генератора импульсов станка (основные задаваемые на станке параметры обработки: сила пикового тока, время разряда, время паузы, режим сервоконтроля; емкость задействованных конденсаторов в схеме генератора и др.) для каждого из материалов.

Для обработки применялись трубчатые ЭИ из латуни и меди длиной 400 мм. В качестве рабочей жидкости применялась деионизованная вода, подаваемая в зону обработки с давлением не менее 4 МПа. Обработку отверстий производили с вращением ЭИ.

По результатам проведенных работ были выбраны режимы обработки технологических отверстий различной глубины. Также были определены материалы ЭИ и максимальная глубина отверстий при обработке ЭИ различных диаметров (см. табл. 1).

*Таблица 1*

**Выбранные материалы электрод-инструментов и значения максимальной глубины отверстий**

Диаметр ЭИ, мм	Материал заготовки					
	Алюминиевые сплавы		Латуни		Стали	
	Материал ЭИ	Максимальная глубина отверстия, мм	Материал ЭИ	Максимальная глубина отверстия, мм	Материал ЭИ	Максимальная глубина отверстия, мм
0,3	Латунь	20	Медь	40	Латунь	30
0,5	Латунь	40	Медь	50	Латунь	50
0,8	Медь	100	Медь	100	Латунь	100
1,0	Медь	180	Медь	180	Латунь	180
2,0	Медь	180	Медь	180	Латунь	180

Вырезка отверстий с необходимыми точностью и качеством обработки (операция 2) выполнялась на электроэрозионной проволочно-вырезной установке для размерной обработки токопроводящих материалов способом многопроходной обработки [6]. ЭЭО деталей выполнялась по разработанным управляющим программам (УП) с помощью системы автоматического программирования, входящей в программное обеспечение ЧПУ-генератора установки. При составлении УП режимы обработки выбирались исходя из задаваемых технологических параметров: материал заготовки, толщина (высота) заготовки, материал ЭИ, диаметр ЭИ, требуемая шероховатость обработанной поверхности [5]. В качестве ЭИ применялась латунная проволока диаметром 0,2 – 0,25 мм.

В результате анализа экспериментальных данных было выявлено, что для обеспечения расположения технологического отверстия в пределах границ требуемого вырезаемого отверстия диаметр ЭИ должен соответствовать формуле  $B \leq A - 0,8$ : где  $B$  – диаметр ЭИ, мм;  $A$  – требуемый по чертежу номинальный размер вырезаемого на проволочно-вырезной установке отверстия, мм. В связи с этим были определены минимальные размеры сечения отверстий, вырезаемых на проволочной установке, для различных длин отверстий (см. табл. 2).

Размер сечения вырезаемых отверстий для различных длин отверстий

Материал заготовки			Размер (диаметр) А вырезаемого отверстия
Алюминиевые сплавы	Латуни	Стали	
Глубина отверстия			
не более 20 мм	не более 40 мм	не более 30 мм	не менее 1,1 мм
от 20 до 40 мм	от 40 до 50 мм	от 30 до 50 мм	не менее 1,3 мм
от 40 до 100 мм	от 50 до 100 мм	от 50 до 100 мм	не менее 1,6 мм
от 100 до 180 мм	от 100 до 180 мм	от 100 до 180 мм	не менее 1,8 мм

Для верификации технологического процесса обработки отверстий методом ЭЭО разработана конструкторская документация на экспериментальные образцы, представляющие собой корпус с волноводными каналами, в том числе переменного сечения, с отношением диаметра вписанной окружности сечения отверстий к глубине обрабатываемых отверстий до 100:1. Для контроля шероховатости и размеров обработанных поверхностей образцы конструктивно выполнены разъемными. Эскиз экспериментальных образцов представлен на рис. 3.

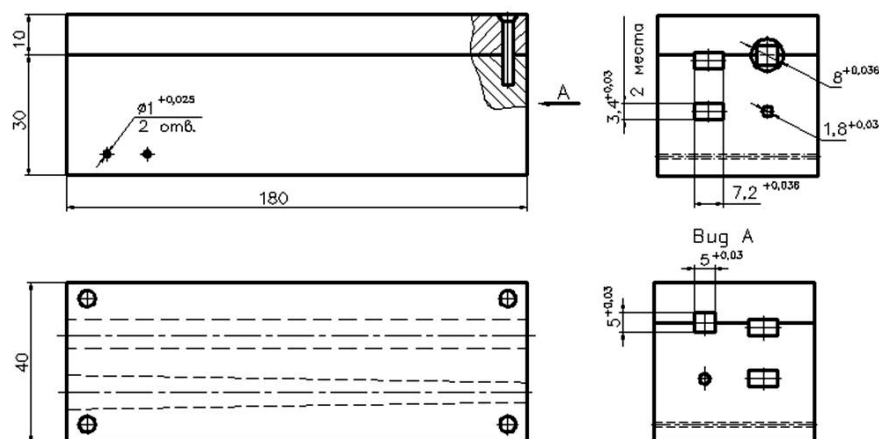


Рисунок 3. Эскиз экспериментального образца

Отверстия в экспериментальных образцах выполнены по предложенной технологии.

Экспериментальный образец с выполненными на станке - «супердрели» технологическими отверстиями представлен на рис. 4, а, а после операции вырезки на проволочно-вырезной установке, на рис. 4, б.



Рисунок 4. Экспериментальный образец:

а – с технологическими отверстиями, полученными трубчатыми ЭИ на станке - «супердрели»;

б - после операции вырезки на проволочно-вырезной установке

Анализ контроля качества обработанных поверхностей отверстий в экспериментальных образцах показал, что достигаемый параметр шероховатости Ra для заготовок из сталей - не более 0,32 мкм, для заготовок из латуни и алюминиевых сплавов - не более 0,63 мкм. Контроль шероховатости поверхностей производился с помощью профилометра MarSurf PS1. Измерения размеров отверстий показал, что они выполнены с точностью по 9 качеству (контроль производился на микроскопе инструментальном ИМЦЛ 100x50, А).

В результате проведенных работ была разработана технология изготовления сквозных отверстий длиной до 180 мм, включающая разработанные технологические процессы электроэрозионной обработки технологических отверстий на станке-«супердрели» и электроэрозионной обработки отверстий с заданной точностью и качеством обработанных поверхностей на проволочно-вырезной установке.

### Выводы

Полученные экспериментальные результаты можно считать верификацией технологических процессов изготовления с высокой точностью (до 9 качества) и шероховатостью обработанных поверхностей (от Ra 2,5 до Ra 0,32) глубоких (длинномерных) отверстий в элементах конструкций СВЧ устройств с применением электроэрозионной обработки.

Результаты работы позволили расширить возможности технологической базы [1, 2] НИИИС им. Ю.Е. Седакова, в частности размерной обработки волноводных каналов, переходов и других элементов антенно-фидерных систем СВЧ и КВЧ диапазонов, для проектирования и изготовления устройств.

### Библиографический список

1. **Светлаков, Ю.А.** Совершенствование и развитие технологической базы проектирования и изготовления СВЧ устройств // Материалы XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2017. – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2017. -С.1344-1349.

2. **Светлаков, Ю.А.** Формирование технологической базы при технологическом обеспечении проектирования и изготовления СВЧ устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. - № 4. -С. 30-36.

3. **Козлов, В.А.** Развитие структуры технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых радиоэлектронных систем / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Проектирование и технология электронных средств. -2018. - № 3. - С. 23-29.

4. **Светлаков, Ю.А.** Применения электрофизикохимических методов размерной обработки материалов при изготовлении деталей и узлов СВЧ и КВЧ устройств // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2013. – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. - С.71-72.

5. **Прокофьев, Л.И.** Методы изготовления волноводно-щелевых антенных решеток для бортовых АФС КВЧ диапазона длин волн / Л.И. Прокофьев, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Новые промышленные технологии. – 2009. – №3 – С. 11-14.

6. **Светлаков, Ю.А.** Технология формирования апертуры волноводно-щелевой антенной решетки / Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков// Проектирование и технология электронных средств. – 2019. - № 3. - С. 3-9.

7. **Варенцов, Е.Л.** Проектирование и технология изготовления зондовых антенн КВЧ диапазона, предназначенных для измерений в ближней зоне / Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов, Ю.А. Светлаков // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганова. – Самара: «Самарское книжное издательство». - 2014. – С. 65-67.

8. **Кашин, А.В.** Проектирование волноводно-щелевых антенных решеток КВЧ диапазона и технологические особенности их изготовления / А.В. Кашин, И.А. Илларионов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганова. – Самара: «Самарское книжное издательство». - 2014. – С. 69-71.

**T.L. Gudina, Yu.A. Svetlakov**

### **ELECTRIC CHARGE MACHINING OF LENGTHY OPENINGS IN DETAILS OF ELEMENTS OF SUPERHIGH FREQUENCY DEVICES**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

The main results of development of technology of dimensional processing of openings with using electric charge machining are given. The technology is used at manufacture of wave guides and the waveguide transitions of superhigh-frequency radio-electronic devices and systems.

**Key words:** electric dimensional charge machining, metal wave guide, the waveguide channel, superhigh frequency.

М.И. Дудкин, И.А. Илларионов, Е.Л. Варенцов

## СЛАБОНАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ СМ И ММ ДЛИН ВОЛН: РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В работе описаны подходы к проектированию антенных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Приводятся результаты численных и экспериментальных исследований антенных систем на базе микрополосковых волноводных излучателей. Предлагаются инженерные методики создания слабонаправленных антенных систем широкой области применения.

**Ключевые слова:** микрополосковые антенны, открытые концы волноводов, методы настройки антенн, широкополосные антенны, коэффициент усиления, диаграмма направленности, радиолокация.

### Введение

Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование миниатюрных антенных устройств для радиолокаторов широкого спектра применения в разных диапазонах S (2-4ГГц), Ku (12-18ГГц), V (56-67ГГц). Большинство подобных антенн не имеют СВЧ – входа по причине миниатюризации всего радиотехнического устройства (РТУ), которое выполняется в виде моноблока. Таким образом, актуальными являются задачи: 1) обеспечение характеристик излучения антенн без регулировки, 2) обеспечение необходимой стойкости конструкций антенн к технологическим допускам при изготовлении РТУ. Основными способами решения поставленных задач являются расширение полосы частот антенн, а также разработка и экспериментальное исследование предмакетов антенн, характеристики которых соответствуют реальным антеннам РТУ.

В работе приводятся результаты разработки антенных систем в широком диапазоне электромагнитных волн. Характеристики излучения разрабатываемых антенн имеют разнообразные значения – это слабонаправленные и остронаправленные антенны, широкополосные и узкополосные. В данной работе основное внимание уделяется слабонаправленным антеннам.

Основными типами антенн, рассматриваемыми в работе, являются микрополосковые антенны различных топологий [1] и волноводные. Микрополосковый тип антенн обеспечивает высокую интеграцию и миниатюризацию всего радиотехнического устройства (РТУ). Одним из основных результатов выполненной работы является создание теоретической и эмпирической базы микрополосковых антенных устройств разработчика.

Новизна работы заключается в разработке и исследовании миниатюрных антенных систем, имеющих оригинальную топологию, обеспечивающую заданные характеристики излучения и требуемый уровень интеграции с приемопередатчиками, позволяющий использование в том числе технологии изготовления многослойных печатных плат. Приведенные в работе микрополосковые антенные системы могут быть изготовлены как с использованием

импортных материалов-подложек Rogers, так и фольгированных материалов отечественного производства ФФ4, стеклотекстолит и т.д.

Существует два основных типа микрополосковых антенн: антенны бегущей волны и резонансные антенны [2].

Микрополосковые антенны бегущей волны являются частью печатной линии передачи (микрополосковой, щелевой, копланарной), модифицированной таким образом, чтобы обеспечить эффективное излучение. Пример такой антенны – это антенна Вивальди [3], построенная на основе расширяющейся щелевой линии. Такие антенны имеют обычно широкую частотную полосу. Однако обладают существенным недостатком – сильной зависимостью характеристик излучения антенны от частоты.

Резонансные микрополосковые элементы имеют стабильные характеристики излучения в полосе частот, но узкую рабочую частотную полосу. Конструкция резонансной микрополосковой антенны представляет собой плоскую проводящую пластину той или иной формы, размещенную на диэлектрическом слое – подложке, ограниченном снизу проводящей плоскостью, больших, чем у пластины, размеров. Форма пластины может быть круглой, прямоугольной, эллиптической, треугольной. Относительная рабочая полоса антенны весьма узкая (от 1% до нескольких %) и зависит от диэлектрической проницаемости подложки и ее высоты.

Относительная полоса резонансных микрополосковых антенн узкая по сравнению с полосой других типов антенн и зачастую не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным системам связи, системам радиовидения и др. На данный момент существует огромное число работ, посвященных проблеме расширения частотной полосы резонансных микрополосковых антенн [4]. Достижимая величина относительной рабочей частотной полосы в современных резонансных микрополосковых антеннах от 1% до 50%! Платой за такую широкую частотную полосу является усложнение конструкции антенн.

В литературе [4] описаны различные техники и методы расширения полосы антенн. Можно выделить два способа расширения частотной полосы: 1) структурная техника, 2) применение методов теории цепей. Последний метод основан на технике согласования импедансов, используемой в теории цепей, и адаптированной к СВЧ цепям с распределенными параметрами. Пример применения подобной техники к разработке резонансной микрополосковой антенны содержится в [5]; достигнутая относительная частотная полоса антенны в работе 20%. Заметим, что подобная адаптация не всегда очевидна.

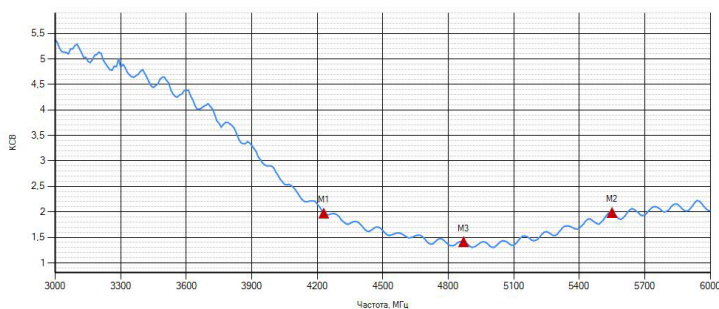
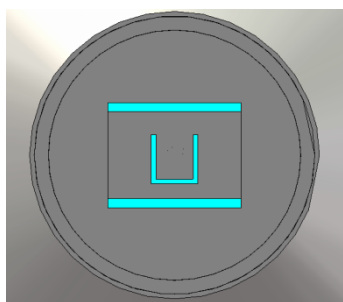
Структурная техника расширения частотной полосы антенны основана: 1) на включении в антенну дополнительных излучающих элементов – щелей в пластине различной формы и размеров; 2) на применении *electronic band gap* (EBG) материалов и метаматериалов [5]. В обычных микрополосках используется проводящий экран, который согласно методу изображений, приводит к ограничению частотной полосы и эффективности излучения антенны [4]. Использование новых материалов, обеспечивающих другие граничные условия на экране (импедансные, магнитная проводящая плоскость) может приводить к изменению характеристик микрополосковых антенн и как следствие может приводить к расширению частотной полосы [5].

Все техники расширения рабочей полосы частот микрополосковых печатных излучателей (МПИ) описываются тремя способами, приведенными в табл. 1 [4]. Известно, что основными факторами, влияющими на полосу МПИ, являются форма излучателя, подложка, схема питания, существование и расположение паразитных излучателей. Особенно широкую полосу рабочих частот в МПИ можно достигнуть, используя сразу несколько способов, приведенных в таблице, например, снижение добротности с возбуждением нескольких резонансов.

**МПИ S –диапазона.** На рис.1 приведена разработанная интегрированная антенна моноблока S-диапазона. К антенной системе предъявлялись следующие основные требования: диапазон рабочих частот 4.3-4.5 ГГц, коэффициент усиления не менее 4 дБ, возможность интеграции АС с платой приемопередающего модуля. Разработанная антенна является микрополосковой интегральной, в конструкции которой для расширения рабочей полосы частот были применены несколько техник: использование дополнительных щелей, использование толстой подложки, низкая диэлектрическая проницаемость подложки. На этапе отработки антенны использовался микроминиатюрный разъем SMP.

Особенностью разработанной антенны (рис.1) является применение широкополосного микрополоскового излучателя, что позволило: отказаться при изготовлении от операции регулировки антенны; сделать конструкцию антенны устойчивой к технологическим допускам при изготовлении; провести интеграцию антенны с платой приемопередатчика.

Способ	Техника
1) Снижение добротности антенны	1) Выбор формы излучателя; 2) Увеличение толщины подложки; 3) Снижение относительной диэлектрической постоянной; 4) Введение дополнительных потерь.
2) Согласование входного импеданса	1) Введение согласующей цепи; 2) Введение настроенного элемента; 3) Использование щелей и пазов в излучателе.
3) Использование нескольких резонансов	1) Использование паразитных элементов; 2) Использование щелей в пластине патча; 3) Использование встроенной цепи с сосредоточенными элементами; 4) Использование апертурного или неконтактного возбуждения антенны.



**Рисунок 1. Антенна S – диапазона (слева), измеренное значение КСВн (справа)**

**Антенная система Ku – диапазона.** На рис. 2 приведена разработанная антенная система (АС) Ku – диапазона. К антенной системе предъявлялись следующие требования: рабочая полоса частот 14.4-15.0 ГГц, АС с учетом обтекателя должна обеспечивать суммарную круговую (360°) диаграмму направленности; суммарный коэффициент усиления АС не менее 10 дБ; развязка между приемной и передающей антеннами не хуже минус 20 дБ, элементы АС

должны быть выполнены в виде печатных излучателей и интегрированы с платой приемопередающего модуля.

Была предложена антенная система, состоящая из трех пар микрополосковых антенн прямоугольной формы (рис.2 (слева)), интегрированных с платами приемопередающих модулей (ППМ) и расположенных на цилиндрической поверхности под радиопрозрачным обтекателем. Пары антенн (Т/Р) расположены на плоскостях. Плоскости расположения антенн параллельны оси цилиндра и располагаются под углом  $60^\circ$  друг относительно друга. Таким образом, была обеспечена круговая форма ДН всей антенной системы.

Передающая и приемная антенны являются микрополосковыми печатными антеннами, расположенными на одной подложке из материала RO4350В. Возбуждение антенн осуществляется металлическим зондом, технологически выполненным как металлизированное отверстие, соединяющим антенну и отрезок копланарной линии платы ППМ. Для настройки АС необходимо было предусмотреть изготовление макетов антенн, имеющих на интегрированной с ними плате ППМ только копланарные линии. На рис.2 приведен внешний вид АС для настройки. Настройка проводится путем уменьшения геометрических размеров частотно-чувствительной выступающей частей металлизации МПИ. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны одного МПИ, коэффициент развязки двух МПИ (приемного и передающего), расположенных на одной подложке, показаны на рис. 3.

Особенностью разработанной АС является применение отработочного макета для настройки и регулировки, что позволило: 1) отказаться при изготовлении от операции регулировки антенны, 2) сделать конструкцию антенны устойчивой к технологическим допускам при изготовлении.

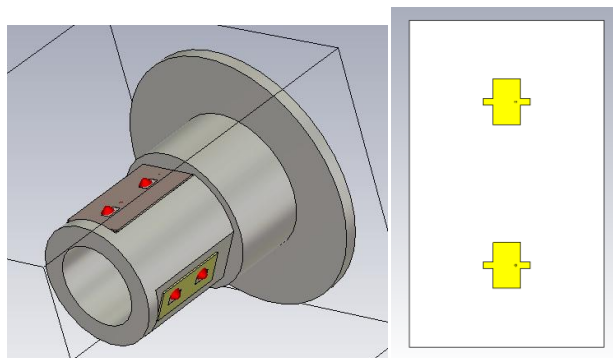


Рисунок 2. АС Ку – диапазона (слева), предмакет АС (справа)

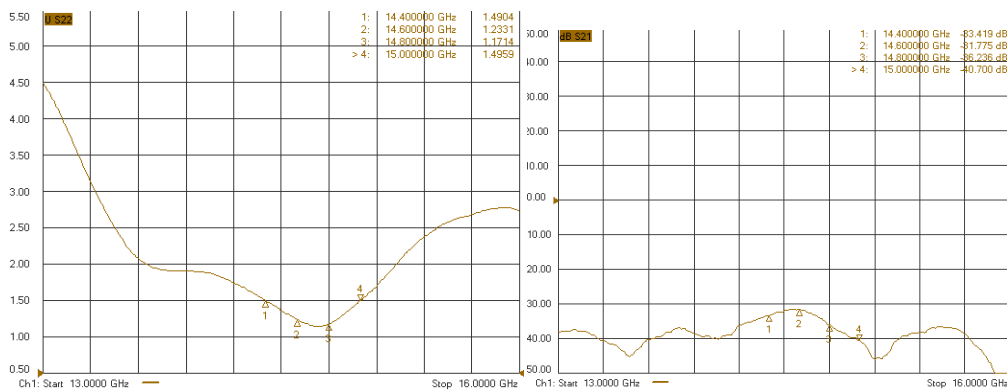


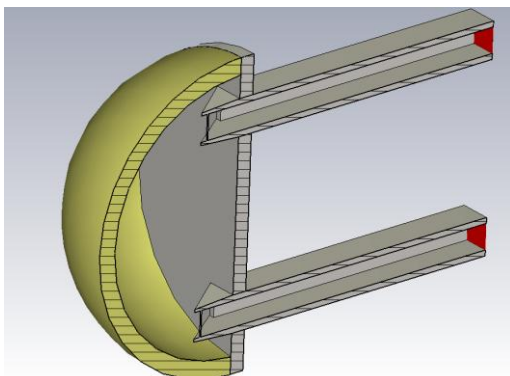
Рисунок 3. Частотная зависимость КСВн одного МПИ АС Ку – диапазона (слева), развязка АС (справа)



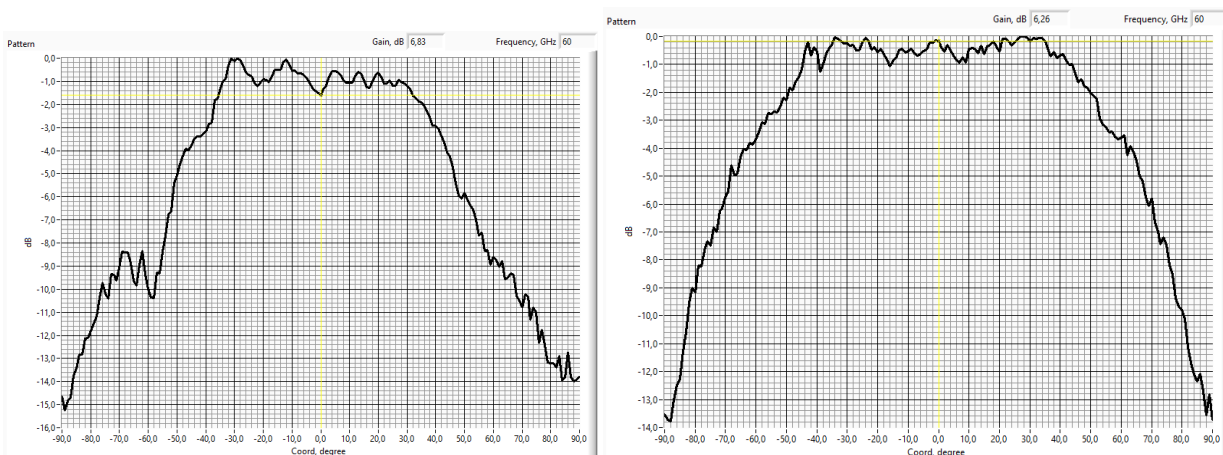
**Антенная система ММ – диапазона длин волн.** На рис. 4 приведена разработанная антенная система (АС) 5 мм – диапазона длин волн. К антенной системе предъявлялись следующие требования: рабочая полоса частот  $60 \pm 0,75$  ГГц, ширина ДН АС должна быть не менее  $80^\circ$  во всех меридиональных плоскостях; суммарный коэффициент усиления АС не менее 10 дБ; развязка между приемной и передающей антеннами не хуже минус 20 дБ, элементы АС должны обеспечивать подключение в приемо-передающему модулю с волноводными выходами.

Эскиз и изготовленный макет антенной системы приведен на рисунке 4. Антенная система представляет собой два волноводных излучателя с установленными в апертуре рассекателями. Излучатели смонтированы на металлическом фланце. Присоединительный фланец со стороны возбуждения антенной системы соответствует фланцу приемо-передающего модуля. Антенна представляет собой отрезок прямоугольной волноводной линии 5-мм диапазона с установленным в апертуре рассекателем, представляющим собой проволочный закороченный диполь-рассеиватель (см. рис.4). На рис.5 приведены измеренные ДН одного элемента АС. Результаты моделирования и экспериментальных исследований подтверждают правильность и обоснованность выбранной конструкции АС.

Особенностью разработанной АС является применение простой конструкции, в основе которой волноводы стандартного прямоугольного сечения, обеспечивающие простую интеграцию с ППМ.



**Рисунок 4. АС ММ – диапазона**



**Рисунок 5. Нормированные диаграммы направленности элемента АС в Е и Н плоскостях на частоте 60 ГГц**

## Выводы

Область применения разработанных антенных систем – радиодатчики и радиолокаторы. Характеристики излучения разработанных антенных систем имеют разнообразные значения. Основными типами антенн, рассматриваемыми в работе, являются микрополосковые антенны различных топологий и антенны на основе волноводов мм диапазона. Микрополосковый тип антенн обеспечивает высокую интеграцию и миниатюризацию радиотехнического устройства в целом.

Практическая значимость работы состоит в разработке инженерных методик проектирования и рекомендаций, а именно:

- применение широкополосных микрополосковых излучателей позволяет отказаться при изготовлении от операции регулировки антенны, а также сделать конструкцию антенны устойчивой к технологическим допускам при изготовлении;
- применение широкополосных микрополосковых печатных излучателей с апертурным возбуждением в качестве элементов антенных решеток минимизирует паразитные эффекты рассогласования с линией возбуждения, связанные с взаимодействием элементов по внутреннему и внешнему пространству.

## Библиографический список

1. **Balanis, Constantine A.** Antenna Theory Analysis and Design.- John Wiley, 1997.
2. **Shafai, Lot** Wideband microstrip antennas. Antenna Engineering Handbook ed. J.L. Volakis. Ch.16.- McGraw-Hill Companies, 2007.
3. **Gibson, P. J.** The Vivaldi aerial// Proc. 9th European Microwave Conf., pp 101–105, 1979.
4. **Chen, Zhi Ning** Broadband planar antennas: design and application / Zhi Ning Chen, Y. W. Chia Michael // Wiley&Sons, 2006.
5. **Pues, F. Hugo** An Impedance-matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas / Hugo F. Pues and A. Van de Capelle // IEEE Trans. On Antennas and propagation, vol. 37, No.11, 1989, P. 1345-1354.
6. **Братчиков А.Н.** EBG-материалы (электронные кристаллы) в антенной и СВЧ технике – М.: «Радиотехника», 2009.- 72 с.
7. **Илларионов, И.А.** Проектирование микрополосковых антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн с волноводным возбуждением / Илларионов И.А., Варенцов Е.Л., Кашин А.В., Светлаков Ю.А.// Антенны.-2016, Вып.1 (221).- С.-.
8. **Visser, Hubregt J.** Array and phased array antenna basics.- John Wiley & Sons, – 2005, 359 p.

**M.I. Dudkin, I.A. Illarionov, E.L. Varentsov**

## OMNIDIRECTIONAL SM- AND MM-WAVE ANTENNAS. THE DESIGN TECHNIQUES AND EXPERIMENTAL METHODES

Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» «Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.E.Sedakov», Russian Federation, Nizhny Novgorod

The paper presents the approaches to the design of antenna systems of the centimeter and millimeter wavelength ranges. The results of numerical and experimental studies of antenna systems based on microstrip and waveguide antennas elements are presented. Engineering methods are proposed for designing the omnidirectional antenna systems of a wide range of applications.

**Keywords:** microstrip antennas, open ends of waveguides, antenna tuning methods, broadband antennas, gain, radiation pattern, radar.

С.М. Гаранин, И.А. Илларионов, Ю.М. Куликов

## РАЗРАБОТКА БОРТОВОЙ КОНФОРМНОЙ АНТЕННЫ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С СИСТЕМОЙ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Настоящая работа посвящена разработке антенно-фидерной системы, входящей в состав радиовысотомера и обеспечивающей решение задачи встроенного контроля. Система встроенного контроля необходима для проверки работоспособности всех функциональных узлов радиовысотомера.

**Ключевые слова:** радиовысотомер; система встроенного контроля; антенно-фидерная система; микрополосковая антенна;  $L$ -зонд; коэффициент усиления;  $S$ -параметры.

### Введение

Большинство существующих систем встроенного контроля (СВК) бортовых радиовысотомеров (РВ) не обеспечивают контроль антенны радиовысотомера и фидерного тракта к антенне, таким образом, являются недостаточными и ограниченными по своим функциональным характеристикам. Задача создания СВК, включающей антенно-фидерный тракт, осложнена необходимостью создания сложной антенно-фидерной системы (АФС), включающей в себя 1) приемопередающую антенну, имеющую необходимые характеристики излучения, обеспечивающие технические характеристики радиовысотомера, 2) зондовую антенну съема СВЧ сигнала, имеющую необходимый уровень связи с антенной радиовысотомера, и оказывающую малое влияние на характеристики излучения последней, 3) линию задержки, подключаемую к зондовой антенне, имеющую необходимую фазовую задержку и амплитудное ослабление, имитирующие амплитудные характеристики отраженного от поверхности радиосигнала.

В данной работе с помощью пакета электродинамического моделирования CST MS исследуется вариант малогабаритной антенно-фидерной системы, обеспечивающей характеристики, необходимые для создания СВК радиовысотомера сантиметрового (СМ) диапазона длин волн.

Малогабаритная АФС имеет в своем составе две антенны: 1) основную антенну РВ, которая представляет собой микрополосковую антенну (патч антенну) с  $L$ -образным возбуждающим штырем ( $L$ -зонд), обеспечивающим характеристики излучения в широкой полосе частот СМ диапазона, 2) зондовую антенну, представляющую собой низкопрофильную микрополосковую антенну со стандартным штыревым возбуждением.

### Конструкция разрабатываемой антенно-фидерной системы

Внешний вид разработанной АФС приведен на рис. 1. В основе конструкции антенны лежит металлическая полость – резонатор, геометрические размеры которого: длина –  $1,13\lambda_{\max}$ , ширина –  $0,9\lambda_{\max}$ , высота –  $0,18\lambda_{\max}$ , где  $\lambda_{\max}$  – наибольшая длина волны в частотной полосе

антенны. Внутри резонатора устанавливается радиопрозрачная диэлектрическая крышка, необходимая для выполнения требования защиты от внешних воздействующих факторов (ВВФ). Крышка изготавливается из материала – полисульфон с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 2,8$ . Внутри резонатора установлена система двух независимых излучателей, как изображено на рис. 2.

Излучатель 1 представляет собой резонаторную микрополосковую антенну (МПА), закороченную металлической пластиной [1] (см. рисунок 3). Излучатель 1 выполняет роль зондовой антенны СВК. Закорачивание МПА приводит к уменьшению длины с  $\lambda_e/2$  до  $\lambda_e/4$ , где  $\lambda_e$  – длина волны в диэлектрике подложки, что является необходимым в целях минимизации размеров антенно-фидерной системы (АФС). Основные геометрические размеры излучателя 1: длина –  $0,3\lambda_{max}$ , ширина –  $0,2\lambda_{max}$ , высота –  $0,03\lambda_{max}$ . Подложка излучателя 1 выполнена из фторопласта (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=2.2$ ). Для макетирования излучателя может быть использован фольгированный фторопласт.

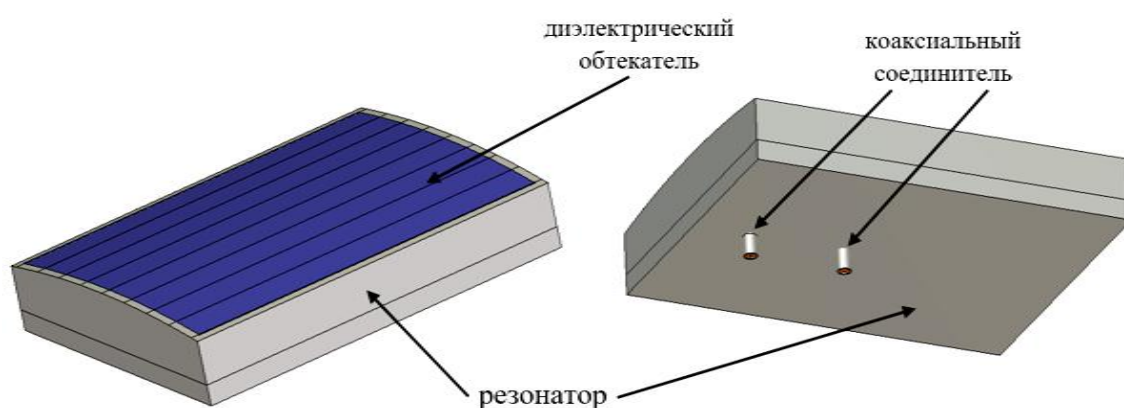


Рисунок 1. Внешний вид макета антенны

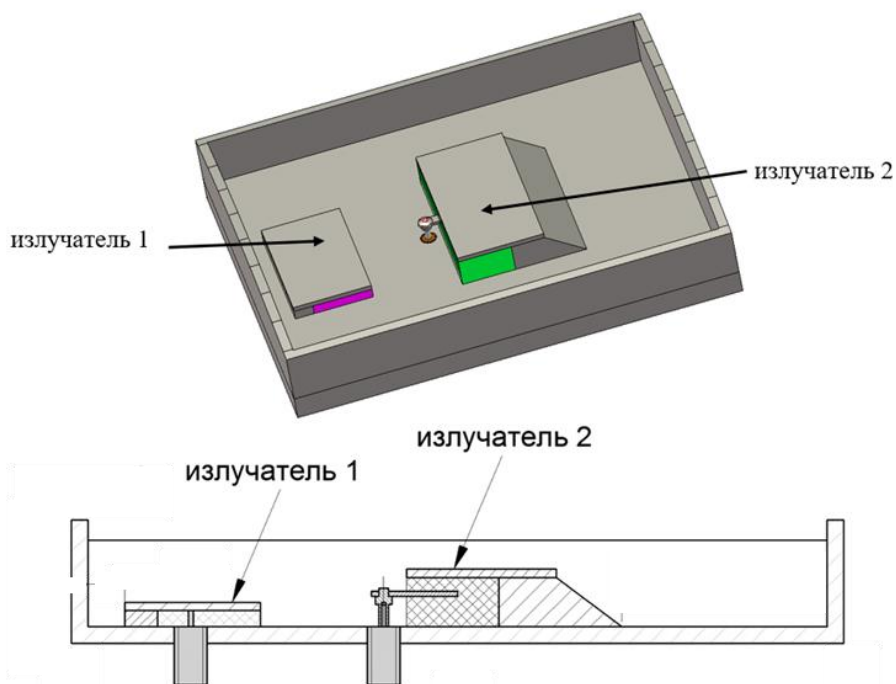
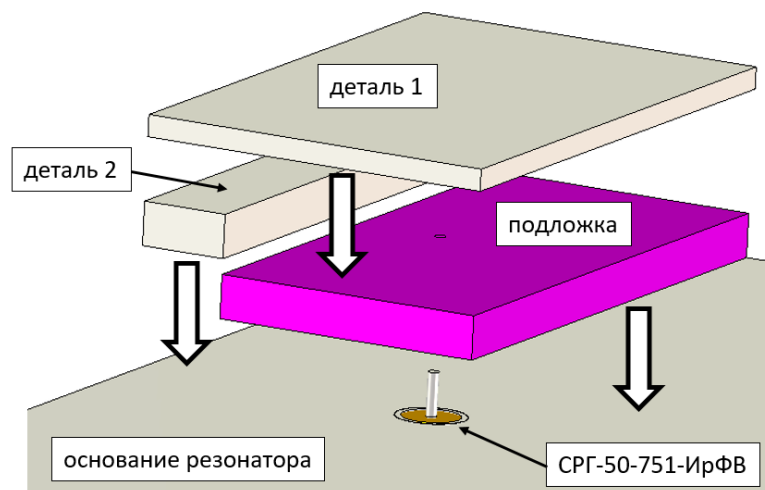
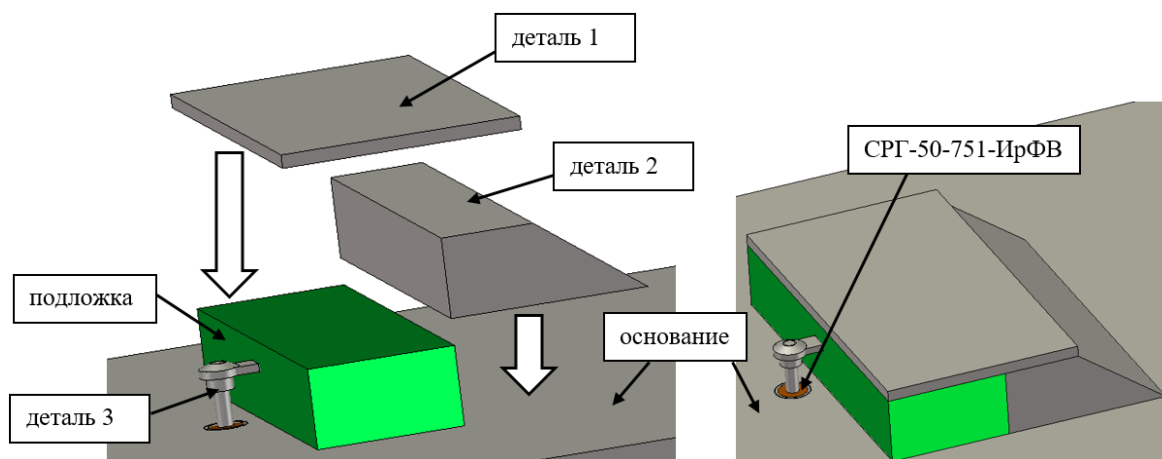


Рисунок 2. Размещение излучателей в резонаторе



**Рисунок 3. Конструкция излучателя 1 – зондовой антенны СВК**

Излучатель 2 – основная антенна РВ представляет собой МПА, закороченную пластиной, с *L*-образным возбуждающим штырем (*L*-зонд) [2]. Закорачивание МПА пластиной приводит не только к снижению размеров, как в случае зондовой антенны, но и к формированию несимметричной ДН при размещении АФС на носителе, что являлось необходимым для обеспечения технических характеристик РВ. Возбуждение *L*-зондом обеспечило необходимую широкую полосу рабочих частот РВ. Конструкция излучателя 2 представлена на рисунке 4. Излучатель 2 имеет следующие габариты: длина –  $0,4\lambda_{\max}$ , ширина –  $0,2\lambda_{\max}$ , высота –  $0,08\lambda_{\max}$ . Подложка излучателя выполнена из полисульфона (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \approx 2.8$ ).



**Рисунок 4. Конструкция излучателя 2**

### **Результаты численного моделирования характеристик разрабатываемой антенны**

На рис. 5 приведены численно полученные *S*-параметры разрабатываемой АФС: коэффициент отражения основного излучателя  $S_{11}$  (излучатель 2), коэффициент отражения вспомогательного излучателя  $S_{22}$  (излучатель 1), а также  $S_{21}$  (развязка между излучателями). Относительная полоса рабочих частот антенны (определяется полосой излучателя 2) составляет 15%. Полоса рабочих частот вспомогательного излучателя составляет:

7%. Развязка между вспомогательным и основным излучателями в полосе рабочих частот вспомогательного излучателя составляет около 10 дБ, что необходимо для обеспечения работы СВК с линией задержки. Расположение излучателей внутри резонатора варьировалось с целью обеспечения необходимого уровня развязки и внесения минимальных искажений в характеристики излучения основного излучателя РВ.

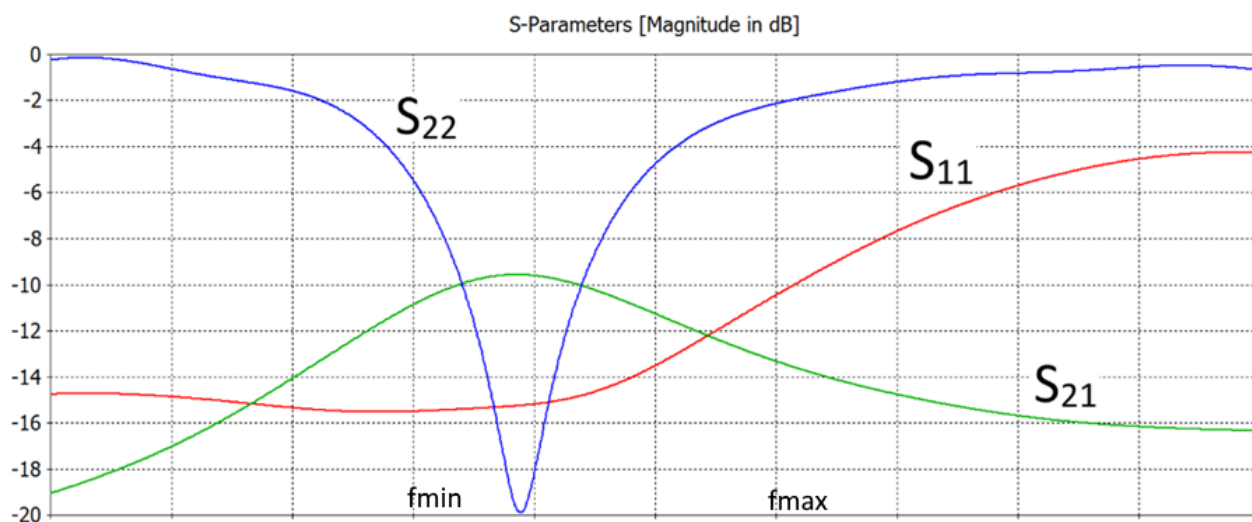


Рисунок 5. Частотные зависимости S-параметров АФС

На рис. 6 изображено расположение антенны на подвижном объекте, а также определена ориентация декартовой системы координат XYZ.

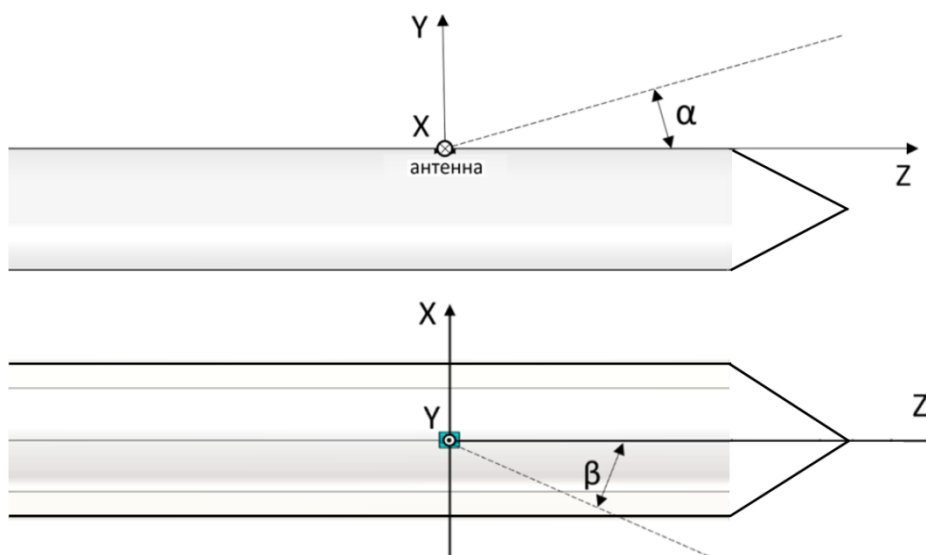
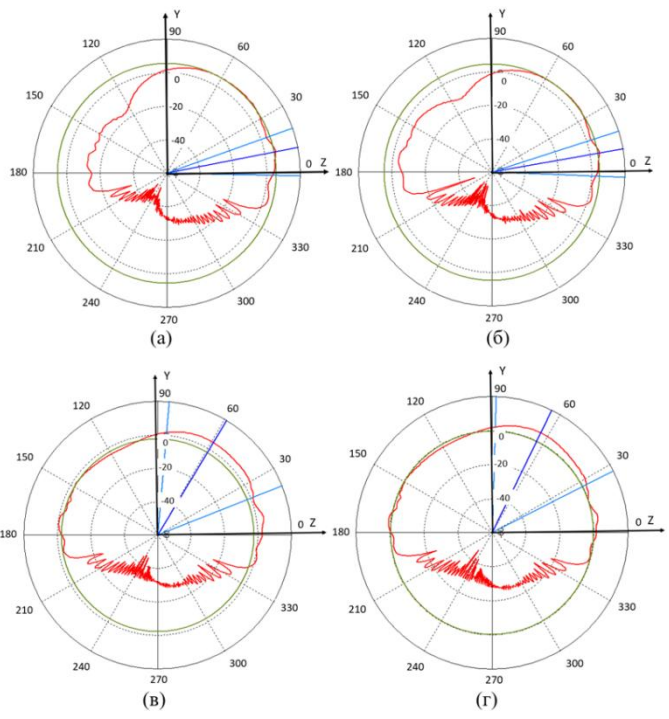


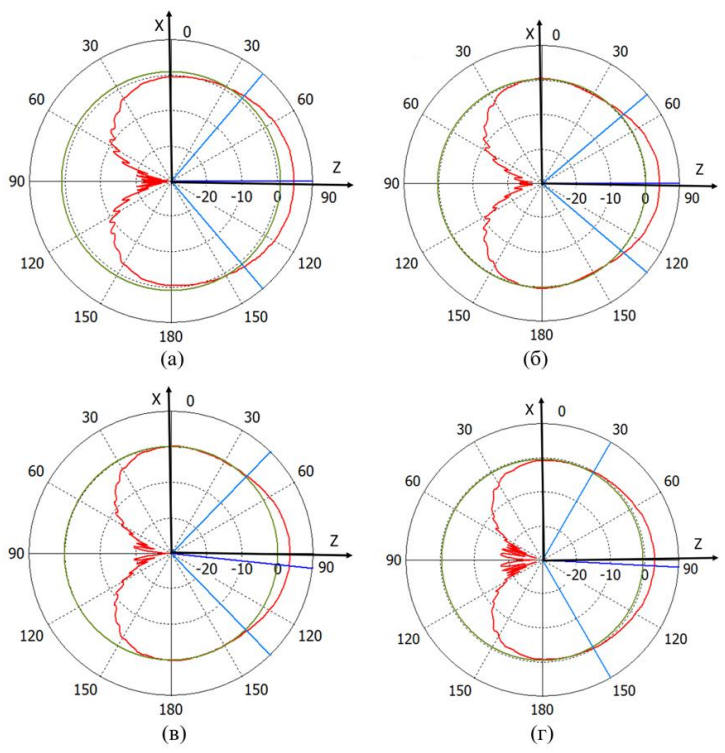
Рисунок 6. Расположение антенны на носителе

На рис. 7 представлены диаграммы направленности (ДН) излучателя 2 в плоскости YOZ. Из рисунка видно, что ДН имеет несимметричную форму с максимумом излучения в носителя, в диапазоне углов  $\alpha = (0^\circ \div 90^\circ)$  коэффициент усиления (КУ) антенны в рабочем диапазоне частот составляет не менее минус 1,5 дБ.

КУ антенны в любой из плоскостей  $\alpha = (0^\circ \div 90^\circ)$  в диапазоне углов  $\beta = (0^\circ \div 90^\circ)$  составляет не менее минус 2.5 дБ. На рис. 8 приведены ДН антенны в плоскости  $\alpha = 30^\circ$ .



**Рисунок 7. ДН антенны РВ в плоскости YOZ на частотах:**  
 (а) –  $f_{min}$ ; (б) –  $f_{min} + 0.3\Delta f$ ; (в) –  $f_{max} - 0.3\Delta f$ ; (г) –  $f_{max}$



**Рисунок 8. ДН антенны в плоскости  $\alpha=30^\circ$  на частотах:**  
 (а) –  $f_{min}$ ; (б) –  $f_{min} + 0.3\Delta f$ ; (в) –  $f_{max} - 0.3\Delta f$ ; (г) –  $f_{max}$



## Выводы

В результате выполнения работы была продемонстрирована возможность совместной работы антенны РВ и зондовой антенны СВК при общих малых габаритах. Данный результат был обеспечен следующими конструктивными особенностями АФС:

- 1) применением резонаторных МПА с закорачивающими стенками, что обеспечило малые габариты антенн и необходимую несимметричную форму ДН;
- 2) применение  $L$ -зонда для возбуждения основной антенны РВ, что обеспечило широкую полосу рабочих частот;
- 3) применение тонкой подложки зондовой антенны СВК, что, во-первых, обеспечило необходимый уровень развязки с основной антенной РВ, а во-вторых, малые искажения ДН основной антенны РВ;
- 4) оптимизацией относительного расположения антенн внутри металлического резонатора был обеспечен необходимый уровень развязки.

## Библиографический список

1. C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. 2-d edition, NY, John Wiley & Sons, Inc., 1997
2. C.L. Mak, K.M. Luk, K.F. Lee, and Y.L. Chow "Experimental study of a microstrip patch antenna with an L-shaped probe," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-48, no.5, pp.777-783, 2000.

S.M. Garanin, I.A. Illarionov, Yu.M. Kulikov

### DEVELOPMENT OF ONBOARD CONFORMAL ANTENNA OF THE CENTIMETER WAVELENGTH RANGE WITH BUILT-IN TESTING SYSTEM

*Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» «Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.E. Sedakov», Russian Federation, Nizhny Novgorod*

The paper is dedicated to the development of the antenna system which is part of a radio altimeter and which provides a solution to the problem of integrated control. The integrated control system is necessary to verify the operability of all functional components of the radio altimeter.

**Keywords:** radio altimeter; system of integrated control; antenna system; microstrip patch antenna;  $L$ -probe excitation; gain;  $S$ -parameters.



М.И. Дудкин, И.А. Илларионов, А.П. Платонов

## ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ ТИПА BOW-TIE В РЕЗОНАТОРЕ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В работе приводятся результаты численных и экспериментальных исследований широкополосной малогабаритной антенны на основе излучателя bow-tie. Антенна формирует излучение в одно полупространство и предусматривает бортовое применение. Был предложен простой способ настройки антенны, заключающийся в модификации формы плеч плоского излучателя bow-tie. Предлагаемая антенна имеет широкую относительную полосу рабочих частот не менее 37% и стабильную форму диаграммы направленности в полосе частот.

**Ключевые слова:** продольный широкополосный диполь, bow-tie антенна, методы настройки антенн, широкополосные антенны, коэффициент усиления, диаграмма направленности.

### Постановка задачи

Одной из задач настоящего исследования являлась разработка бортовой малогабаритной антенны, имеющей электрически малые размеры и располагающейся в резонаторе из проводящего материала на проводящем экране. На рис. 1 схематично представлена антенна, заключенная внутри воображаемой сферы радиусом  $a$ , обладающей минимальными размерами и описывающей антенну. Это так называемая сфера Чу [5]. Электрически малыми антеннами называют антенны, удовлетворяющие критерию  $ka < 0,5$  [5], где  $k = 2\pi / \lambda$ . Общими свойствами электрически малых антенн являются [6]: 1) добротность антенн  $Q$  пропорциональна  $(ka)^{-3}$ ; 2) относительная полоса частот  $BW$  пропорциональна  $(ka)^3$  (то есть  $BW \approx 1/Q$ ); 3) коэффициент полезного действия (КПД) антенны пропорционален  $(ka)^4$ . Таким образом, из приведенных выражений, очевидно, что антенна малых размеров обладает высоким значением добротности и, как следствие, узкой частотной полосой. Уменьшение размеров антенны также приводит к уменьшению КПД и следовательно падению коэффициента усиления (КУ). Все это является основной проблемой, стоящей перед разработчиками малогабаритных антенн.

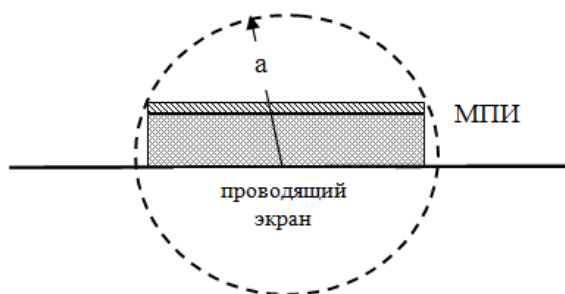


Рисунок 1. К определению электрически малой антенны

Проектируемая малогабаритная антенна должна обладать следующими характеристиками: 1) относительная рабочая полоса частот не менее 30%, 2) линейная поляризация излучения, 3) абсолютное значение коэффициента усиления (КУ) в рабочей полосе частот не ниже 3 дБ. Дополнительным требованием к рассматриваемой конструкции антенны являлось размещение под радиопрозрачной вставкой (РПВ). Большинство разработанных на данный момент [3], [4] широкополосных и сверхширокополосных антенн с металлическим резонатором обладают рядом недостатков: нестабильной ДН в полосе согласования, большими электрическими размерами, ограничивающих расположение антенн в резонаторах с диаметрами более  $1.5\lambda$ .

Вторая задача – это исследование возможности быстрой регулировки и настройки изготовленной антенны, достижение полученных на этапе моделирования характеристик.

### Метод решения поставленных задач. Результаты исследований

Одной из простых конфигураций антенны, обладающей широкой полосой частот, является биконическая антенна. Подобная антенна состоит из двух одинаковых конусов бесконечных размеров. Биконическая антенна бесконечной длины может рассматриваться как однородная линия, вдоль которой без отражений распространяются сферические волны точно так же, как вдоль однородной линии из двух параллельных проводов распространяются плоские волны. Решая уравнения Максвелла в сферической системе координат и используя граничное условие о равенстве нулю тангенциальной составляющей электрического поля на поверхности конуса, можно определить напряжение между конусами и ток, протекающий по поверхности конуса. Отношение напряжения к току определяет волновое сопротивление биконической антенны [5]:  $\rho = \frac{Z_0}{\pi} \ln \left( \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4} \right)$ , где  $Z_0$  - волновое сопротивление среды между поверхностями конусов,  $\alpha$  - угол конуса. Волновое сопротивление определяет входной импеданс бесконечной биконической антенны.

В данной работе приведены результаты проектирования дипольной антенны типа bow-tie (галстук-бабочка) [5], расположенной в металлическом резонаторе. Подобный тип антенны является плоской модификацией биконической антенны (см. рис. 1); фактически является плоской дипольной антенной с плечами треугольной формы. В отличие от биконической антенны, даже при расположении в свободном пространстве частотная зависимость входного импеданса bow-tie антенны имеет существенные осцилляции, ограничивающие полосу антенны одной октавой [6]. Однако значение полосы частот bow-tie антенн более чем удовлетворительно для цели наших разработок.

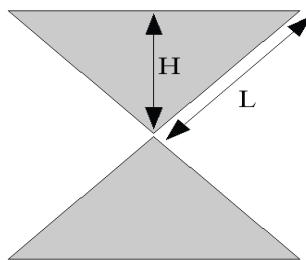
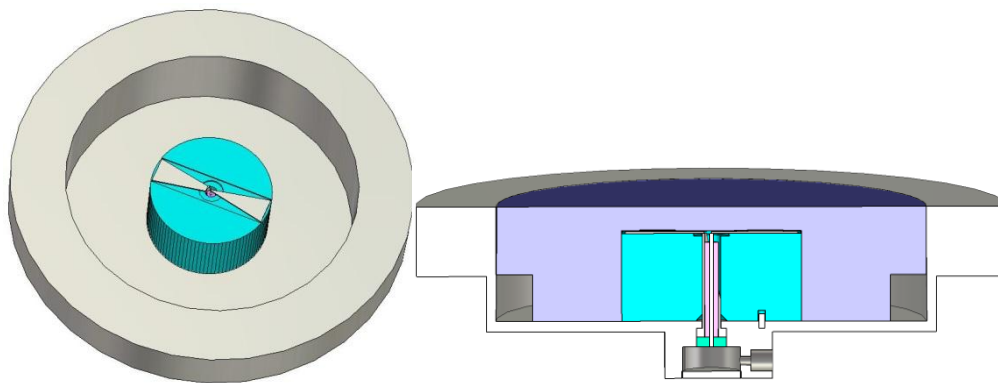


Рисунок 2. Антенна bow-tie

Предлагаемая конструкция антенны представляет собой плоский излучатель, расположенный на цилиндрическом диэлектрическом основании в металлическом резонаторе глубиной  $0,12\lambda_{\max}$ , внутренний диаметр резонатора составляет  $0,44\lambda_{\max}$ , где  $\lambda_{\max}$  - наибольшая длина волны рабочей полосы антенны. Внешний вид антенны без настроечных элементов и РПВ показан на рисунке 2 слева. Излучающий элемент представляет собой микрополосковую линию, по форме напоминающую галстук-бабочку (bow-tie), расположенную на основании цилиндрической формы из диэлектрика полисульфон ПСФ-5, имеющего относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon \approx 5$ . Параметры антенны оптимизировались для работы в частотном диапазоне  $f_1 \dots f_2$ , с относительной полосой  $2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} > 30\%$ . Длина плеча излучателя

составляет порядка  $\frac{1}{6} \lambda_{\max}$  и определялась на этапе численной оптимизации модели антенны. Возможность достижения столь малой глубины металлического резонатора  $0,12\lambda_{\max}$  обусловлено двумя основными причинами: 1) применением в качестве диэлектрика, заполняющего резонатор, материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 5$ , 2) применением плавного симметрирующего устройства для возбуждения антенны (см. рис.3). Возбуждение излучателя bow-tie осуществляется коаксиальным волноводом (см. рис.3), внешний проводник которого подключается к одному из плеч излучателя, а центральный проводник - ко второму. При этом конструктивно коаксиальная линия представляет собой плавно заужающийся экраный проводник (плавный трансформатор [7]) переходящий в симметричную двухпроводную линию, что необходимо для согласования волнового импеданса микрополоскового излучателя с 50 – омным сопротивлением запитывающей линии в широкой полосе частот. Внешний вид исполнения суженного трансформатора показан на рисунке 2.



**Рисунок 3. Bow-tie антенна в резонаторе: слева- без РПВ, справа – сечение антенны с РПВ**

На рис. 3 приведена измеренная частотная зависимость КСВн антенны, изображенной на рис.2. Как видно из рис.3, КСВн антенны в полосе  $f_1 \dots f_2$  превышает значение 2 на некоторых частотах, что объясняется большим значением реактанса (более 50 Ом), имеющим емкостной характер и низким значением активной части входного импеданса (около 17 Ом). Причина наблюдаемой зависимости – малая высота продольного излучателя на нижней поверхности металлического резонатора.

Для того, чтобы исключить емкостной характер импеданса антенны был предложен следующий способ настройки антенны путем изменения геометрии плеч излучателя (см. рис. 4).

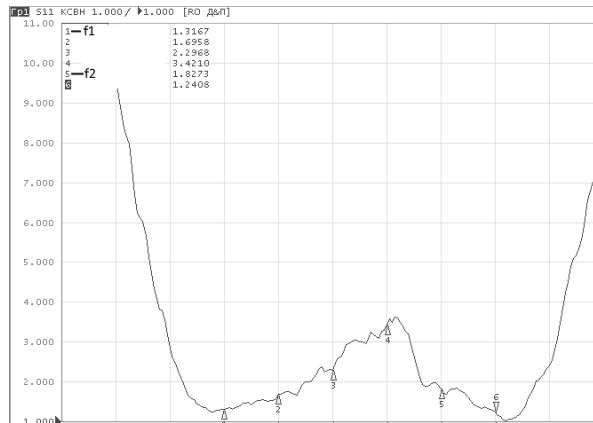


Рисунок 4. Измеренная частотная зависимость КСВн антенны, изображенной на рис.2

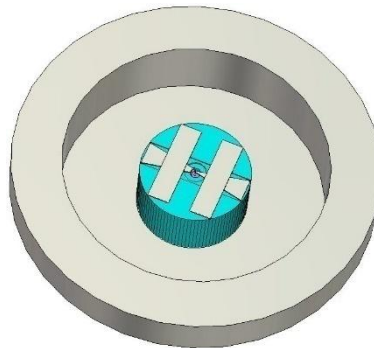
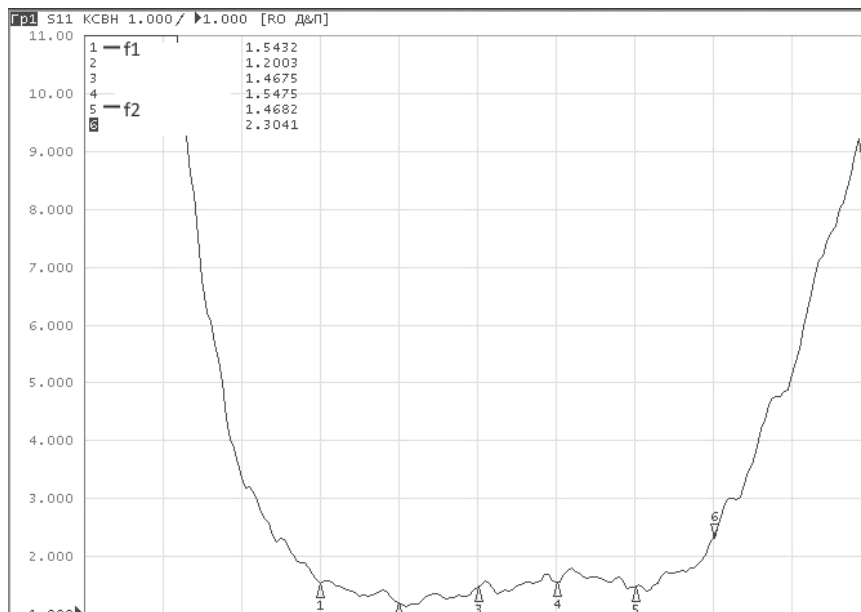


Рисунок 5. Антенна Bow-tie с включенными в плечи металлическими пластинами

### Согласование антенны изменением геометрии излучателя

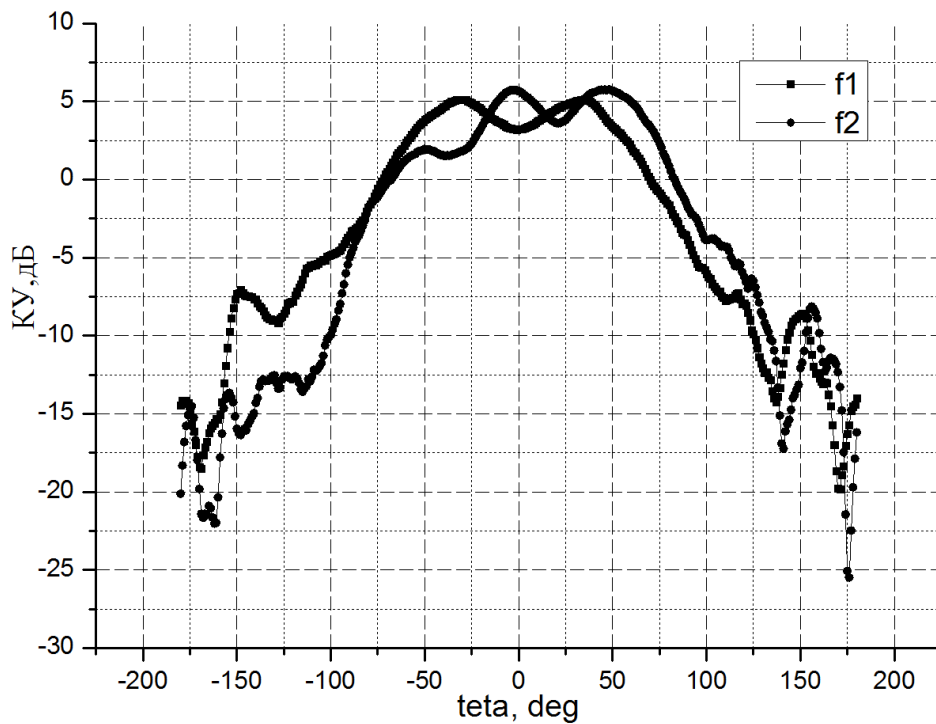
Настройка антенны и согласование в заданной полосе частот по уровню  $КСВн \leq 2$  осуществляется путём введения настроечных элементов- металлических «перемычек» прямоугольной формы, располагаемых перпендикулярно плечам излучателя bow-tie на некотором расстоянии от центра (рисунок 4). Оптимальный размер перемычек обеспечивает уменьшение емкостного реактанса антенны. Электрический контакт и механическая фиксация между плечами излучателя и перемычками обеспечивается путём пайки. Оптимальные линейные размеры настроечных элементов и их расстояние от центра антенны определяются на этапе моделирования и настройки изготовленного макета антенны. На рисунке 5 для изготовленного настроенного макета антенны приведена измеренная зависимость КСВн от частоты в полосе рабочих частот  $f1 \dots f2$ . Относительная полоса антенны по уровню  $КСВн=2$  составляет  $2 \frac{f2 - f1}{f2 + f1} = 30\%$ , по уровню  $КСВн < 2,5$  более 37 %.

Угловые зависимости измеренных КУ антенны на разных частотах рабочей полосы в Е- и Н- плоскостях приведены на рис. 6,7.



**Рисунок 6. Измеренная частотная зависимость КСВн антенны, изображенной на рис.4**

Как видно из представленных результатов измерения, ширина ДН антенны по уровню 3 дБ составляет: в Е - плоскости от 90° до 120°, в Н- плоскости не менее 70°. Форма ДН сохраняется во всей полосе частот антенны по уровню КСВн 2.5. Коэффициент усиления в полосе частот изменяется в интервале 3...7дБ. Наблюдаемые осцилляции КУ в Е- плоскости объясняются влиянием фланца квадратной формы, на котором была закреплена антенна во время измерения.



**Рисунок 7. Измеренная угловая зависимость КУ антенны в Е - плоскости**

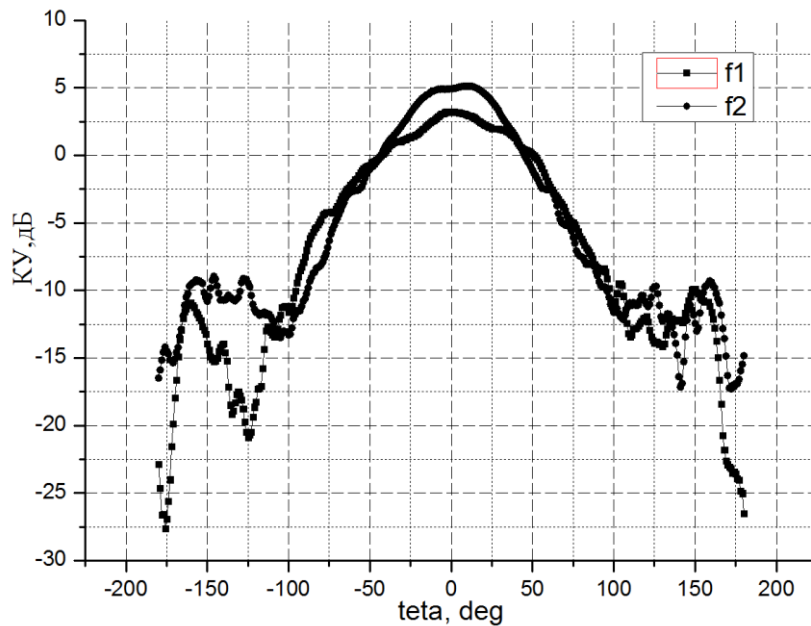


Рисунок 8. Измеренная угловая зависимость КУ антенны в H - плоскости

### Выводы

В результате выполнения работы была продемонстрирована возможность разработки слабонаправленной малогабаритной антенны, представляющей собой плоский излучатель bow-tie, расположенный в металлическом цилиндрическом резонаторе глубиной  $0,12\lambda_{\max}$  с внутренним диаметром  $0,44\lambda_{\max}$ . Экспериментальные исследования показали достижение относительной рабочей полосы частот антенны более 30% при  $K_{СВн} < 2$ . Был предложен простой способ настройки антенны, заключающийся в модификации формы плеч плоского излучателя bow-tie. К основным достоинствам разработанной антенны можно отнести:

- широкую полосу рабочих частот;
- стабильную форму ДН в полосе частот.

### Библиографический список

1. **Volakis, John L.** Small antennas. Miniaturization techniques and applications /John L.Volakis,Chen Chi-Chin, Fujimoto Kyohei // McGraw Hill, 2010, 428 p.
2. **Fujimoto Kyohei** Modern small antennas /Kyohei Fujimoto,MorishitaHisaishi // Cambridge University press, 2013, 473 p.
3. **Allen, M. Dohler**, E. E. Okon, W. Q. Malik, A. K. Brown, and D.J. Edwards, Ultra-Wideband Antennas and Propagation. New York: Wiley, 2007.
4. **Siwiak** and D. Mckeown, Ultra-Wideband Radio Technology.New York: Wiley, 2004.
5. **Balanis, Constantine A.**Antenna Theory Analysis and Design.- John Wiley, 1997.
6. Ultra Wide Band Antennas, Ed. by Xavier Begaud, Willey & Sons, 2011, 281 p.
7. **Duncan, J.W.**100:1 BandwidthBalun Transformer / J. W. Duncan, V. P. Minerva / Proceedings of the IRE, February, 1960, pp. 156-164.

**M.I. Dudkin, I.A. Illarionov, A.P. Platonov**

**STUDY OF THE RADIATION OF THE ELECTRICALLY SMALL CAVITY-BACKED  
BOW-TIE BROADBAND ANTENNA**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» «Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.E.Sedakov», Russian Federation, Nizhny Novgorod

The paper presents the results of numerical and experimental studies of a small-sized broadband antenna based on a bow-tie dipole. The antenna provides omnidirectional radiation and on-board application. A simple method to tuning the antenna was proposed, which consists in modifying the shape of the arms of a flat bow-tie dipole. The proposed antenna has a wide fractional bandwidth at least 37% and a stable shape of the directional pattern in the frequency band.

**Keywords:** longitudinal broadband dipole, bow-tie antenna, antenna tuning methods, broadband antennas, gain, radiation pattern.

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин

## РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПО ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», г. Воронеж

Предложен новый радиоволновый метод восстановления относительных диэлектрических проницаемостей и толщин многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Метод основан на решении обратных задач по восстановлению структуры электрофизических параметров исследуемых многослойных материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны. В отличие от методов с информативным параметром – комплексным коэффициентом отражения, позволяет увеличить точность и достоверность восстановления структуры относительных диэлектрических проницаемостей и толщин.

**Ключевые слова:** многослойное диэлектрическое покрытие, радиоволновый метод, обратная задача, измерение, коэффициент ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны, диэлектрическая проницаемость, метод поперечного резонанса.

Проблема качества и надёжности изделий и конструкций из различных диэлектрических материалов является одной из актуальнейших проблем современного научно-технического развития. Решение этой проблемы – эффективные методы и средства контроля параметров диэлектрических материалов и диагностики изделий из них. Конструкция диэлектриков часто имеет вид многослойной структуры, слои которой различаются электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФГП). К важнейшим ЭФГП относятся относительные диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_n$  и толщины  $t_i, t_{i+1}, \dots, t_n, i=1, \dots, n$  слоя материала. При определении ЭФГП широко применяют радиоволновые методы и средства неразрушающего контроля и диагностики, имеющие значительные возможности как при самостоятельном исследовании, так и в комплексе с другими физическими методами.

Как показано в [1–3] физические особенности распространения поверхностных медленных электромагнитных волн в слоистых диэлектрических и магнитодиэлектрических материалах и покрытиях можно эффективно использовать для их неразрушающего контроля. ЭФГП диэлектрических материалов и покрытий в зависимости от поставленной задачи находят путём решения дисперсионного уравнения, которое связывает ЭФГП с коэффициентом замедления – основным параметром, являющимся мерой всех волноведущих свойств. На практике более предпочтительным информативным параметром, который определяется в результате косвенных измерений является коэффициент  $\alpha(f, \xi)$  ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн по нормали к поверхности материала [2].

### 1. Электродинамическая модель многослойных материалов и покрытий

Задача оценки диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв многослойных диэлектрических материалов и покрытий по коэффициенту ослабления поля поверхностных мед-



ленных электромагнитных волн является обратной по своей постановке. Она сводится к нахождению вектора ЭФГП  $\underline{\xi} = \{\varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$ ,  $i = 1, \dots, 2n$  многослойного материала по информативному признаку – коэффициенту  $\alpha(f, \underline{\xi})$  ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн. Для определения вектора ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий необходимо найти оператор, обратный коэффициенту ослабления:

$$\underline{\xi} = \arg \alpha(f, \underline{\xi}). \quad (1)$$

Коэффициент ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн для оценки вектора ЭФГП многослойного материала анализируется на конечном дискретном наборе частот  $\alpha(f_k, \underline{\xi})$ ,  $k = 1, \dots, L$ , где  $L$  – количество фиксированных частот. Кроме того, проведенные исследования показали, что решение обратной задачи (1) является неустойчивым, поскольку малые изменения в области исходных данных (коэффициентов ослабления  $\alpha(f_k, \underline{\xi})$ ) могут привести к существенным изменениям в области оцениваемых параметров  $\underline{\xi} = \{\varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$ . Это относит задачу (1) к классу некорректных обратных задач.

В соответствии с [4] обратную задачу (1) целесообразно решать методом параметрической оптимизации: в области допустимых значений ЭФГП  $\underline{\xi} \in \underline{\xi}_{\text{доп}}$  находить вектор оценки параметров  $\underline{\xi}$ , обеспечивающий минимальное расстояние  $\rho(\underline{\xi})$  между экспериментально полученными  $\alpha_s(f, \underline{\xi})$  и вычисленными теоретическими значениями  $\alpha_t(f, \underline{\xi})$  коэффициентами ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн на частотах  $f_k$ ,  $k=1, 2, \dots, L$ :

$$\underline{\xi} = \arg \min_{\underline{\xi} \in \underline{\xi}_{\text{доп}}} \rho(\underline{\xi}) = \sum_{k=1}^L \left| \left[ \alpha_s(f_k, \underline{\xi}) - \alpha_t(f_k, \underline{\xi}) \right] / \alpha_t(f_k, \underline{\xi}) \right|^2. \quad (2)$$

Таким образом, для определения ЭФГП многослойного материала необходимо решить прямую задачу, т. е. в общем случае знать теоретические значения коэффициента ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн  $\alpha_t(f_k, \underline{\xi})$ .

Для регуляризации и ускорения решения обратной задачи (1) целесообразно априорно задать область допустимых значений его ЭФГП  $\underline{\xi} \in \underline{\xi}_{\text{доп}}$ , количество слоёв материала и начальное приближение по совокупности параметров  $\underline{\xi}_{\text{нач}}$ , гарантирующим нахождение глобального минимума функционала (2). Начальное приближение задачи (1) определяют заданием грубой «сетки» в области допустимых значений параметров из выражения, аналогичного (2), [4]:

$$\underline{\xi} = \arg \min_{\underline{\xi} \in \underline{\xi}_{\text{доп}}} \rho(\underline{\xi}_{\text{нач}}) = \sum_{k=1}^L \sum_{p=1}^Q \left| \left[ \alpha_s(f_k, \underline{\xi}) - \alpha_t(f_k, \underline{\xi}_p) \right] / \alpha_t(f_k, \underline{\xi}_p) \right|^2. \quad (3)$$

Методам минимизации функций нескольких переменных посвящено значительное число работ. В градиентных и релаксационных методах минимизации по сравнению с прямыми методами резко сокращается число итераций, но при этом возрастают требования к точности начального приближения. Поэтому для минимизации функционалов (2), (3) авторы настоящей статьи ис-

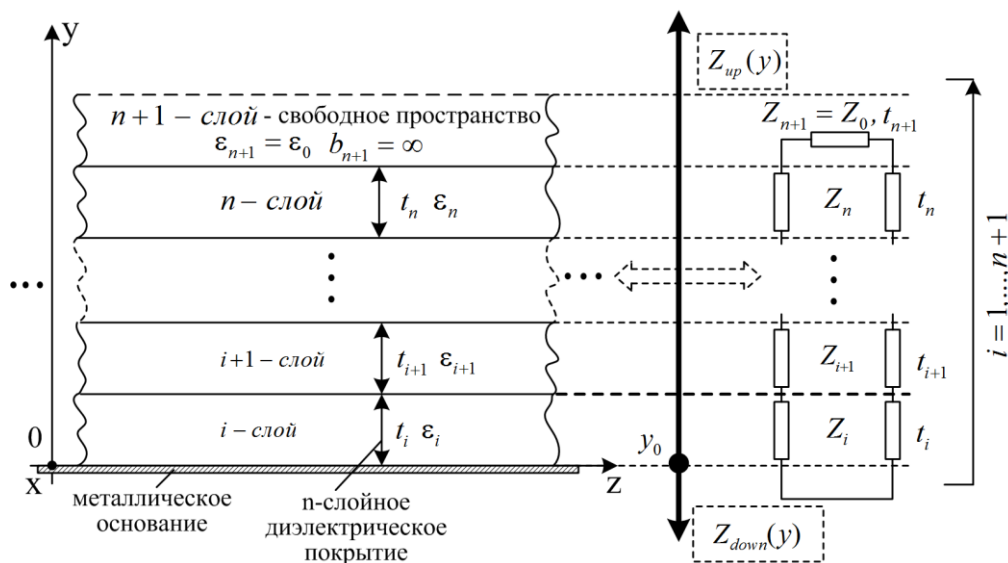
пользовали прямой метод Неллера–Мида, реализованный в системе компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

Прямая задача сводится к решению дисперсионного уравнения для многослойного материала. Корнями этого уравнения являются коэффициенты ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн  $\alpha(f, \underline{\xi})$  для заданной частоты  $f$  [5–7]:

$$D[\alpha(f, \underline{\xi}); f] = 0. \quad (4)$$

Таким образом, прямая задача формулируется как нахождение неизвестных коэффициентов  $\alpha(f_k, \underline{\xi})$  ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн по известному вектору ЭФГП  $\underline{\xi} = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$  на частотах  $f_k, k=1, 2, \dots, L$ .

На рис. 1 приведены структурная и эквивалентная схемы  $n$ -слойного слоисто-однородного диэлектрического покрытия. К ЭФГП, характеризующим указанное покрытие, относятся относительные диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  и относительные толщины  $i$ -го слоя  $b_i = (t_i/\lambda)_i, \dots, b_n = (t_n/\lambda)_n, i=1, \dots, n$ . Область над многослойным покрытием для удобства составления дальнейших расчётных выражений формально имеет вид отдельного  $n+1$  слоя покрытия с ЭФГП  $\varepsilon_{n+1}=\varepsilon_0$  и  $t_{n+1}=\infty$ . В пределах каждого слоя  $b$  параметры среды постоянны. Многослойное покрытие и его эквивалентная схема приведена на рис. 1.



**Рисунок 1. Структурная и эквивалентная схемы многослойного диэлектрического покрытия**

С учётом метода поперечного резонанса в качестве дисперсионного уравнения для собственных волн в многослойном диэлектрическом покрытии можно использовать уравнение поперечного резонанса, записанное относительно произвольно выбранного опорного сечения  $y_0$  [5–7]:

$$\vec{Z}_B(y) + \vec{Z}_H(y) = 0,$$

где  $\vec{Z}_B(y), \vec{Z}_H(y)$  – эквивалентные характеристические сопротивления соответственно «вверх» и «вниз» относительно опорного сечения  $y_0$ .



где  $\vec{Z}(i, i+1)$  – характеристическое сопротивление  $i$ -го слоя покрытия, нагруженного на характеристическое сопротивление  $i+1$  слоя покрытия;  $\vec{Z}_i, \vec{Z}_{i+1}, \dots$  – характеристические сопротивления соответствующих слоёв покрытия (8) (см. рис. 1).

Из (9) следует, что эквивалентное характеристическое сопротивление  $\vec{Z}_B(y)$  равно характеристическому сопротивлению  $\vec{Z}(i, \dots, n+1)$ , полученному в результате последовательной трансформации сопротивлений слоёв  $i=1, \dots, n+1$ . Характеристическое сопротивление  $\vec{Z}_H(y)$  «вниз» относительно опорного сечения  $y_0$  принимается равным нулю, так как ниже его слоев покрытия нет.

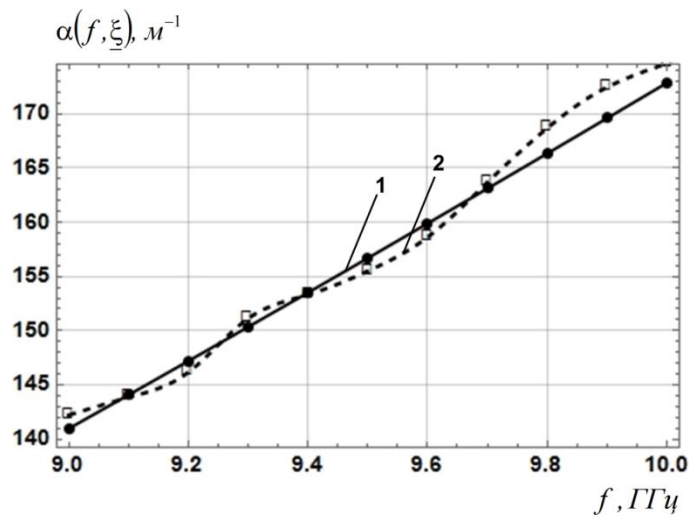
Таким образом, итоговое дисперсионное уравнение для многослойного диэлектрического покрытия принимает вид

$$D[\alpha(f, \underline{\xi}); f] \equiv \vec{Z}(i, \dots, n+1) = 0. \quad (10)$$

**Экспериментальные результаты решения обратной задачи.** Для исследований метода измерения относительных диэлектрических проницаемостей и толщин многослойных диэлектрических материалов и покрытий выбрали следующие диэлектрики: полиметилметакрилат ( $\epsilon=3,8$ ); фторопласт Ф-4Д ( $\epsilon=2,2$ ); полутвёрдая резина ( $\epsilon=1,8$ ). Расположение слоёв диэлектрического покрытия (с первого по третий): полиметилметакрилат – фторопласт Ф-4Д – полутвёрдая резина. Диэлектрическая проницаемость слоёв возрастает от нижнего слоя к верхнему, с учётом этого область допустимых значений ЭФГП ограничили значениями  $\epsilon_i=1 \dots 5$ ;  $t_i=0,1 \dots 3,0$  мм. Коэффициент ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн измеряли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот  $N=10$ ). Толщина слоёв:  $b_1=1,8$  мм (полиметилметакрилат);  $b_2=3$  мм (фторопласт Ф-4Д);  $b_3=1$  мм (полутвёрдая резина).

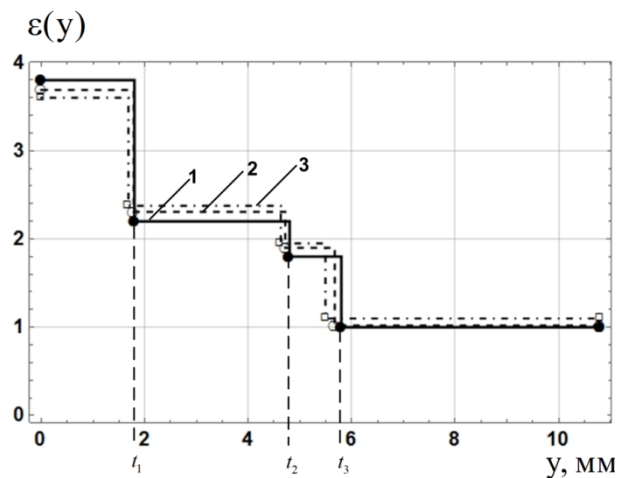
В качестве начального приближения  $\underline{\xi}_{\text{нач}}$  использовали решения обратной задачи, полученные с применением (3) на дискретной сетке из области допустимых значений параметров  $\epsilon_i, t_i$ . Для каждого слоя исследуемого трёхслойного покрытия задавали сетку из равномерно расположенных в области допустимых значений 21 значения  $\epsilon_i=1; 1,2; \dots 5$  и 15 значений  $t_i=0,1; 0,2; \dots 2,9$  мм,  $i=1 \dots 3$ . На рис. 2 представлена теоретическая зависимость коэффициента ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн изучаемого трёхслойного покрытия, полученная численным решением дисперсионного уравнения (10), и экспериментальные значения этого коэффициента в диапазоне частот 9–10 ГГц.

Частотная зависимость коэффициента ослабления  $\alpha(f, \underline{\xi})$  на интервале 9–10 ГГц, в отличие от частотной зависимости коэффициента отражения  $\dot{R}(f, \underline{\xi})$ , линейная. Это позволяет значительно уменьшить неопределённость измерений и количество используемых фиксированных частот. Отличие теоретических значений коэффициентов ослабления от экспериментальных значений не превышает 5 %, что можно оценить как вполне допустимый результат. Основной вклад в погрешность измерения вносит несинфазность фронта поверхностной волны антенны возбуждения поверхностных медленных электромагнитных волн.



**Рисунок 2. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) частотные зависимости коэффициента ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн от частоты для трёхслойного покрытия**

В результате решения обратной задачи (2) на основе экспериментальной и теоретической частотным зависимостям коэффициента ослабления, реконструировали профиль исследуемого трехслойного покрытия. На рис. 3 показаны точный профиль и восстановленные профили, полученные с использованием теоретической и экспериментальной зависимостей коэффициентов ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн. Установили, что относительные погрешности восстановления относительных диэлектрических проницаемостей слоев по теоретической частотной зависимости коэффициента ослабления (т. е. зависимость коэффициента ослабления без погрешностей) и толщин не превышают 2–3 и 3–4 % соответственно. Погрешности восстановления относительной диэлектрической проницаемости слоёв по экспериментальной зависимости коэффициента ослабления и толщин (погрешность измерения коэффициентов ослабления 0,5 %) не превышают 7–8 и 5–6 % соответственно. Отметим, что экспериментальное значение диэлектрической проницаемости слоя воздуха за структурой превысило единицу:  $\epsilon_4=1,08$ .



**Рисунок 3. Восстановленный профиль структуры исследуемого покрытия: 1 – точный профиль; 2, 3 – профили, построенные соответственно по теоретическим и экспериментальным значениям коэффициентов ослабления**

Таким образом, разработанный новый радиоволновый метод восстановления относительных диэлектрических проницаемостей и толщин многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны, в отличие от методов с информативным параметром – комплексным коэффициентом отражения, позволяет увеличить точность и достоверность восстановления структуры диэлектрических проницаемостей и толщин. Повышение точности и достоверности достигается в результате учёта линейной зависимости коэффициента ослабления от частоты, а также уменьшения количества фиксированных частот измерений. При реализации предложенного метода используется упрощённая процедура измерений, так как измеряют только напряженности поля поверхностных медленных электромагнитных волн, не требуются фазовые измерения, выполняющиеся с помощью дорогостоящего векторного анализатора цепей.

По экспериментальным результатам измерений на многочастотном измерительном комплексе в диапазоне 9–10 ГГц с помощью разработанного метода восстановлен профиль диэлектрической проницаемости трёхслойного покрытия полиметилметакрилат – фторопласт Ф-4Д – полутвёрдая резина» с приемлемой для практических приложений точностью. Проведенные экспериментальные исследования ЭФГП многослойного диэлектрического покрытия показали принципиальную возможность измерения относительных диэлектрических проницаемостей и толщин отдельных слоёв с относительными погрешностями не более 8 и 6 % соответственно.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-2009.*

### Библиографический список

1. **Федюнин, П.А.** Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин. – М.: Издательство «Физматлит», 2013. – 190 с.
2. **Федюнин, П.А.** Теоретическое обоснование применения электромагнитных поверхностных волн в диагностике состояния диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин // Радиотехника. – 2009. – № 2. – С. 30–39.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев [и др.]; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 408 с.
4. Подповерхностная радиолокация / Под ред. М. И. Финкельштейна. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
5. **Balanis, C.A.** Advanced engineering electromagnetics / C.A. Balanis. USA: John Wiley & Sons, 1989. –1002 p.
- 6 **Фелсен, Л.** Излучение и рассеяние волн. Том 1 / Л. Фелсен, Н. Маркувиц / перевод с английского под ред. М. Л. Левина. – М.: Мир, 1978. – 547 с.
7. **Фальковский, О. И.** Техническая электродинамика / О.И. Фальковский. – М.: Связь, 1978. – 432 с.

**A.I. Kaz'min, P. A. Fedyunin**

**RECONSTRUCTION OF THE STRUCTURE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS  
OF MULTILAYER DIELECTRIC COATINGS ACCORDING TO THE FREQUENCY  
DEPENDENCE OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF THE FIELD OF SURFACE  
ELECTROMAGNETIC WAVE**

Military Educational and Scientific Center of the Air Force  
«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The new radio wave method of reconstruction profile of the relative permittivity and thickness multilayer dielectric coatings is presented. The method is based on solving inverse problems of reconstruction the structure of the electrophysical parameters of the studied multilayer materials and coatings according to the frequency dependence of the field attenuation coefficient of a surface slow electromagnetic wave. In contrast to the methods with the informative parameter - the complex reflection coefficient, the method allows to increase the accuracy and reliability of restoration of the structure of relative permittivity and thickness.

**Keywords:** multilayer dielectric coating, radio wave method, inverse problem, measurement, field attenuation coefficient of a surface slow electromagnetic wave, relative permittivity, transverse resonance method.

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, В.А. Манин

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», г. Воронеж

Представлена электродинамическая модель для определения степени отслоения диэлектрического покрытия от металлической подложки. Электродинамическая модель основана на дисперсионных уравнениях, позволяющих связать электрофизические параметры диэлектрического покрытия с коэффициентом нормального ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны. Проведена проверка работоспособности модели при дефектоскопическом контроле в системе CST Studio suite.

**Ключевые слова:** электродинамическая модель, диэлектрическое покрытие, поверхностная электромагнитная волна, дисперсионное уравнение, метод поперечного резонанса, дефект.

Диэлектрические покрытия (ДП), работающие в СВЧ-диапазоне, широко применяются в различных областях науки и техники. Основная область их применения – это изготовление печатных и полосковых плат микроволнового диапазона, элементов антенн и других изделий СВЧ-техники. Кроме того, диэлектрические покрытия применяют в виде радиопоглощающих покрытий (РПП) металлических поверхностей авиационных комплексов, танков, ракет и кораблей в целях снижения их радиолокационной заметности (РЛЗ) [1–3].

Для эффективной реализации заявленных выше функций развитие ДП, и, РПП в частности, идет по пути создания тонких, легких, широкополосных и устойчивых к внешним воздействиям материалов. При этом эффективно реализовать свойства современных ДП можно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении. Задача обеспечения надежной адгезии ДП достаточно сложна. При недостаточной адгезии высокие внутренние напряжения приводят к отслоению, а при высокой адгезии – к растрескиванию. Наиболее характерно эти явления проявляются на РПП, работающих в составе образцов вооружения и военной техники, где они находятся в жестких условиях эксплуатации.

Для оценки эксплуатационной пригодности СВЧ-диэлектрических покрытий наиболее предпочтителен дефектоскопический контроль на сверхвысоких частотах, входящих в рабочий диапазон изделия. Существующие методы и методики радиоволновой дефектоскопии обладают низкой достоверностью и вероятностью обнаружения дефектов из-за того, что не позволяют произвести оценку параметров дефекта, таких как глубина залегания, величина раскрытия и размер площади.

В [2] произведено обоснование методов радиоволнового контроля электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП) однослойных диэлектрических плоскоструктур на основе электродинамической модели взаимодействия поверхностных медленных электромагнитных волн (ПМЭМВ) СВЧ диапазона с исследуемым материалом.

Основу электродинамической модели для измерения ЭФГП покрытия составляют дисперсионные уравнения, которые позволяют связать ЭФГП покрытия с коэффициентом ослабления поля ПМЭМВ по нормали к поверхности покрытия –  $\alpha_y$  [2].



Существенным недостатком представленной модели является невозможность использования ее для построения методов дефектоскопического контроля, позволяющих количественно оценивать величину отслоения покрытия от подложки, а также расслоения между слоями в многослойных покрытиях.

В [3] представлена обобщенная электродинамическая модель и СВЧ-метод измерения электрофизических параметров (диэлектрическая проницаемость и толщина) многослойных диэлектрических покрытий.

Сложность определения величины отслоения покрытия от подложки и расслоения между слоями заключается в невозможности получения простых аналитических зависимостей между относительной диэлектрической проницаемостью покрытия  $\epsilon_{II}$ , его толщиной  $b$ , величиной отслоения покрытия  $d$  или расслоения  $g$  и непосредственно измеряемым коэффициентом ослабления поля ПМЭМВ по нормали к поверхности покрытия –  $\alpha_y$ .

Целью представленной работы является разработка новой электродинамической модели, основанной на дисперсионных уравнениях, которые однозначно связывают экспериментально определяемые коэффициенты ослабления поля ПМЭМВ и величину дефектов материалов.

На рис. 1а приведена геометрия задачи нахождения дисперсионного уравнения диэлектрического покрытия при отслоении его от металлического основания.

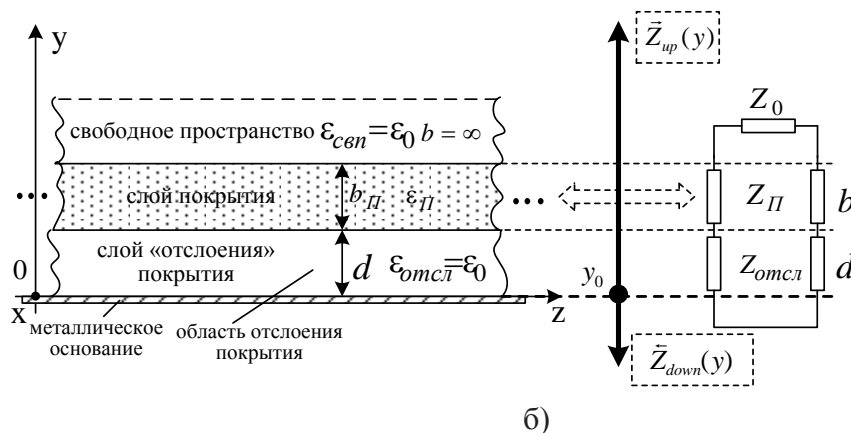


Рисунок 1. Геометрия исследуемой системы: а) – геометрия задачи нахождения дисперсионного уравнения диэлектрического покрытия; б) – эквивалентная схема диэлектрического покрытия

Диэлектрическое покрытие характеризуется электрофизическими и геометрическими параметрами:  $\epsilon_{II}$ ;  $\mu_{II}$ ;  $b$ , где  $\epsilon_{II}$ ,  $\mu_{II}$ ,  $b$  – соответственно относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, а также толщина покрытия. Поскольку рассматривается диэлектрическое покрытие, то  $\mu_{II} = \mu_0$ . Область с отслоением покрытия берется в виде отдельного «слоя» покрытия с ЭФГП  $\epsilon_{отсл} = \epsilon_0$ ,  $\mu_{отсл} = \mu_0$  и  $b_{отсл} = d$ . Свободное пространство для удобства составления дальнейших расчетных выражений также формально берется в виде отдельного «слоя» покрытия с с ЭФГП  $\epsilon_{свн} = \epsilon_0$ ,  $\mu_{свн} = \mu_0$  и  $b_{свн} = \infty$ .

В пределах слоя покрытия параметры среды постоянны. Задача состоит в нахождении дисперсионного уравнения данной системы:

$$\alpha_y = f(\epsilon_{II}; b_{II}; d; \lambda),$$

где  $\lambda$  – длина волны генератора.

Для рассматриваемой слоистой электродинамической модели диэлектрического покрытия дисперсионное уравнение можно найти на основе формализации метода поперечного резонанса [4] для случая покрытия с числом слоев 3. При этом входным информативным параметром дисперсионного уравнения является коэффициент ослабления поля ПМЭМВ  $\alpha_y$ .

Следуя принципам метода поперечного резонанса [4] каждому слою диэлектрического покрытия сопоставим в соответствие четырехполюсник, который представляет собой отрезок линии передачи с длиной равной толщине слоя  $b$  и соответствующим характеристическим сопротивлением  $Z$ . Таким образом, диэлектрическое покрытие при отслоении его от металлического основания можно заменить эквивалентной схемой связанных линий передачи. Эквивалентная схема диэлектрического покрытия при отслоении его от металлической подложки приведена на рисунке 1б.

Дисперсионное уравнение диэлектрического покрытия на основе полученной эквивалентной схемы составляется при условии работы ее в «резонанс» – момента, когда в диэлектрическом покрытии ПМЭМВ имеет критическую частоту. При этом в качестве дисперсионного уравнения для собственных волн в диэлектрическом покрытии может использоваться уравнение поперечного резонанса [4], записанное относительно произвольно выбранного опорного сечения  $y_0$ :

$$\bar{Z}_{up}(y) + \bar{Z}_{down}(y) = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{Z}_{up}(y)$  и  $\bar{Z}_{down}(y)$  – эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно опорного сечения  $y_0$ .

Само по себе опорное сечение выбирается произвольно. Для удобства дальнейших преобразований в качестве опорного сечения  $y_0$  выберем границу между металлическим основанием и первым слоем покрытия.

Коэффициент ослабления поля ПМЭМВ  $\alpha_y$  связан с постоянной распространения  $\gamma$  и коэффициентами фазы  $q_{II}$  ПМЭМВ диэлектрического покрытия следующими зависимостями:

– область свободного пространства:

$$\alpha_y = \sqrt{\gamma^2 - k_0^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – постоянная распространения поля ПМЭМВ;  $k_0$  – волновое число свободного пространства,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

– в слое диэлектрического покрытия:

$$q_{II} = \sqrt{k_{II}^2 - k_0^2 - \alpha_y^2}, \quad (3)$$

где  $k_{II}$  – волновое число слоя покрытия,  $k_{II} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{II}}$ ,  $\epsilon_{II}$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

– область с отслоением диэлектрического покрытия:

$$q_{отсл} = j\alpha_y.$$

С учетом выражений (2,3) выразим характеристические сопротивления слоев через коэффициент ослабления поля ПМЭМВ  $\alpha_y$ .

Характеристические сопротивления для Е-волн имеют следующий вид:

– «слой» свободного пространства:

$$Z_0 = -j \frac{\alpha_y}{\omega \varepsilon_0}, \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

– слой диэлектрического покрытия:

$$Z_{II} = \frac{q_{II}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{II}}, \quad (5)$$

где  $q_{II}$  – коэффициент фазы ПМЭМВ, определяемый по выражению (3).

– «слой» области отслоения покрытия:

$$Z_{отсл} = \frac{q_{отсл}}{\omega \varepsilon_0}, \quad (6)$$

Характеристическое сопротивление «вверх»  $\bar{Z}_{up}(y)$  относительно опорного сечения  $y_0$  представляет собой эквивалентное характеристическое сопротивление «слоя» с отслоением, слоя покрытия и «слоя» свободного пространства.

На основании рисунка 1 последовательные этапы трансформации можно представить следующей рекуррентной формулой:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{отсл\_II} &= Z_{отсл} \frac{Z_{II} + jZ_{отсл} \operatorname{tg}(q_{отсл} d)}{Z_{отсл} + jZ_{II} \operatorname{tg}(q_{отсл} d)}, \\ \bar{Z}_{отсл\_II\_0} &= \bar{Z}_{отсл\_II} \frac{Z_0 + j\bar{Z}_{отсл\_II} \operatorname{tg}(q_{II} b_{II})}{\bar{Z}_{отсл\_II} + jZ_0 \operatorname{tg}(q_{II} b_{II})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, эквивалентное характеристическое сопротивление «вверх»  $\bar{Z}_{up}(y)$  относительно опорного сечения  $y_0$  равно характеристическому сопротивлению  $\bar{Z}_{отсл\_II\_0}$ , полученному в результате последовательной трансформации сопротивлений слоев исследуемого покрытия с отслоением:

$$\bar{Z}_{up}(y) = \bar{Z}_{отсл\_II\_0} \quad (9)$$

Характеристическое сопротивление «вниз» относительно опорного сечения  $y_0$  принимается равным нулю  $\bar{Z}_{down}(y) = 0$ , так как ниже его слоев покрытия нет.

Таким образом, итоговое дисперсионное уравнение для диэлектрического покрытия при отслоении его от подложки, на основе (1), может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{Z}_{отсл\_II\_0} = 0, \quad (10)$$

где  $\bar{Z}_{отсл\_II\_0}$  – эквивалентное характеристическое сопротивление системы слоев покрытия, приведенных на рисунке 1а и определяемое по рекурсивной формуле (8).

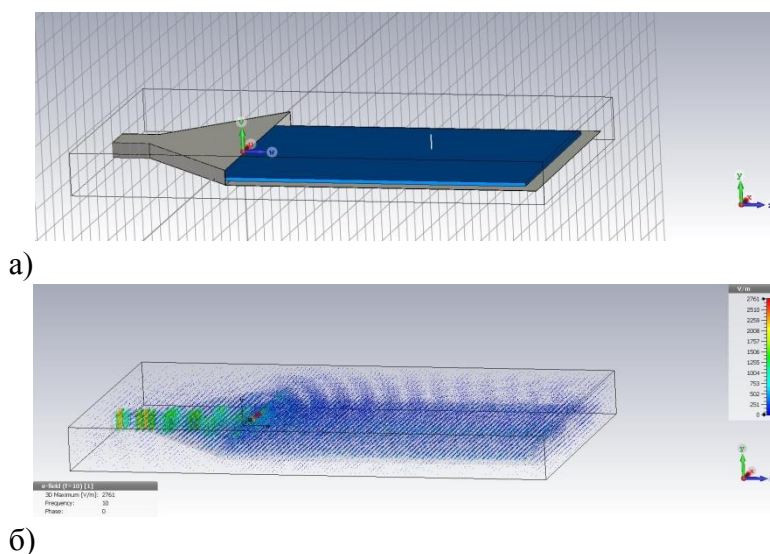
Достоверность и точность разработанной модели можно оценить, сравнивая результаты теоретических расчетов коэффициентов ослабления  $\alpha$  поля ПМЭМВ в зависимости от величины отслоения покрытия  $d$ , с результатами, полученными с использованием стандартных систем электродинамического моделирования, таких как, например, CST Studio suit.

Электродинамическая модель для оценки коэффициента ослабления поля ПМЭМВ в зависимости от величины отслоения покрытия  $d$  в среде CST Studio suit состоит из двух основ-

ных элементов: антенны возбуждения ПМЭМВ и слоя ДП с электрофизическими параметрами  $\varepsilon$ ,  $\mu$  и  $b$ , расположенного на металлическом основании. При этом учитывалась конечная толщина стенок антенны и металлической подложки, что максимально приближает созданную модель к реальному виду. В качестве антенны возбуждения электромагнитного поля ПМЭМВ был выбран Н-секториальный рупор, установленный на металлическую подложку со слоем исследуемого покрытия. Параметры питающего волновода выбраны такие, чтобы в нем возбуждался основной тип волны  $H_{10}$ . Геометрия модели для оценки степени отслоения покрытия от металлической подложки в среде CST Studio suit приведена на рис. 2.

При расчете построенной 3D-модели использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD), производящий решение системы уравнений Максвелла во временной области для каждой из элементных прямоугольных ячеек сетки разбиения созданной модели. Для повышения точности расчетов использовался режим адаптивного уплотнения сетки.

Оценка напряженности поля ПМЭМВ проводилась в дальней зоне Н-секториального рупора по линии максимума диаграммы направленности. После завершения расчета для заданных значений покрытия оценивалась общая трехмерная картина распределения поля ПМЭМВ и закон изменения напряженности поля в конкретной точке измерения. Точка измерения напряженности поля ПМЭМВ показана на рисунке 2 а. В качестве примера на рисунке 2 б показано трехмерное распределение поля ПМЭМВ при параметрах модели:  $\varepsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $b = 2$  мм и  $f = 8$  ГГц.



**Рисунок 2. Электродинамическая модель в среде CST Studio suit:** а) геометрическая модель для оценки степени отслоения покрытия от металлической подложки; б) распределение электрического поля ПМЭМВ

Моделирование проводилось при различных параметрах ДП ( $\varepsilon = 2...11$ ,  $\mu = 1...3$ ,  $b = 1...4$  мм,  $d = 0...1,5$  мм,  $\lambda = 0,0375...0,075$  м).

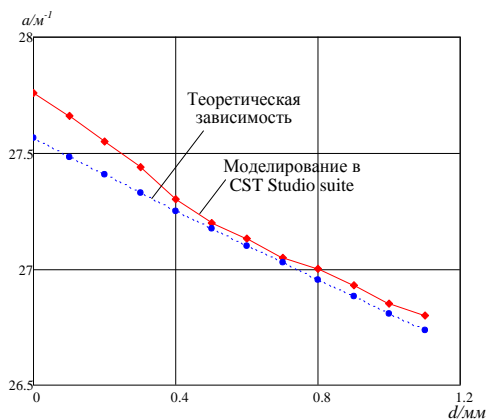
На рис. 3 а–г, в качестве примера, представлены результаты сравнения коэффициентов ослабления поля ПМЭМВ для покрытия с толщиной  $b=2$  мм, с относительными диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon : 2, 4, 6, 8$ , возбуждаемой на частоте  $f = 8$  ГГц, при различных значениях величины отслоения покрытия  $d$ .

На каждом рисунке показана теоретическая кривая и полученная в результате моделирования в CST Studio suit.

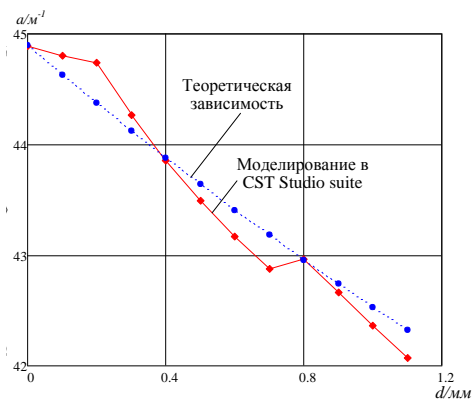
Анализ полученных зависимостей показывает, что отличие коэффициентов ослабления  $\alpha_y$ , полученных теоретически и с помощью программы CST Studio suit, не превышает 2%, что можно оценить как вполне хороший результат. Расхождения в расчетах вызваны несинфазностью фронта поля ПМЭМВ, возбуждаемой рупорной антенной, имеющую конечные размеры и слабой согласованностью апертуры с окружающей средой.

Проведенный анализ подобных зависимостей для всех исследуемых диапазонов  $\varepsilon, \mu, b$  показал хорошее совпадение теоретических результатов с результатами, полученными в среде электродинамического моделирования CST Studio suit.

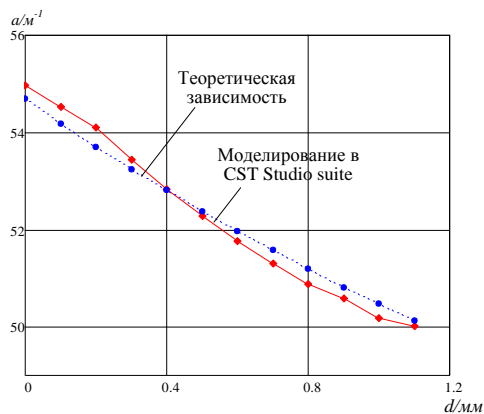
Анализ данных, представленных на рис. 3 показывает, что зависимость коэффициента ослабления от величины отслоения РПП от металлической подложки обладает высокой чувствительностью. Изменение коэффициента ослабления наблюдается даже в области отслоений  $d$  от 0 до 0,004 мм.



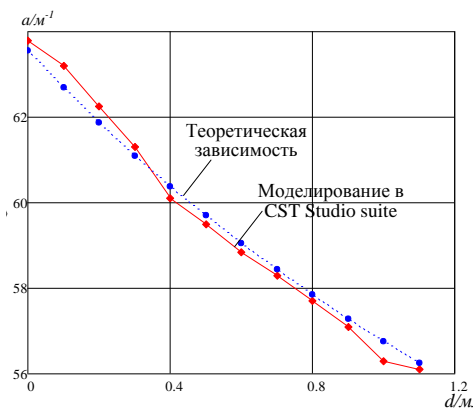
а)  $\varepsilon = 2, \mu = 1, b = 2 \text{ мм}, f = 8 \text{ ГГц}$



б)  $\varepsilon = 4, \mu = 1, b = 2 \text{ мм}, f = 8 \text{ ГГц}$



в)  $\varepsilon = 6, \mu = 1, b = 2 \text{ мм}, f = 8 \text{ ГГц}$



г)  $\varepsilon = 8, \mu = 1, b = 2 \text{ мм}, f = 8 \text{ ГГц}$

**Рисунок 3. Теоретические зависимости  $\alpha_y = f(d)$  и полученные в ходе моделирования в CST Studio suit**

Таким образом, предложенная электродинамическая модель может служить основой для разработки радиоволновых способов обнаружения и оценки дефектов ДП. Проведенные экспериментальные исследования на электродинамической модели показали принципиальную возможность надежного обнаружения и оценки дефектов типа «отслоение покрытия от подложки».

### Библиографический список

1. **Лагарьков, А.Н.** Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Том. 73. – № 9. – С. 779–787.
2. **Федюнин, П. А.** Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин. – М.: Физматлит, 2013. – 190 с.
3. **Казьмин, А.И.** Метод измерения электрофизических параметров многослойных диэлектрических покрытий в диапазоне СВЧ / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин // Контроль. Диагностика. – 2018. – N 11. – С. 52–59.
4. **Фелсен, Л.** Излучение и рассеяние волн. Том 1 / Л. Фелсен, Н. Маркувиц / перевод с английского под ред. М. Л. Левина. – М.: Мир, 1978. – 547 с.

**A.I. Kaz'min, P. A. Fedyunin, V.A. Manin**

### ELECTRODYNAMIC MODEL OF DEFECTOSCOPIC CONTROL OF DIELECTRIC COATINGS ON A METAL BASIS

Military Educational and Scientific Center of the Air Force  
«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

An electrodynamic model for determining the degree of delamination of a dielectric coating from a metal substrate is presented. The electrodynamic model is based on dispersion equations, allowing to connect the electrophysical parameters of the dielectric coating with the coefficient of normal attenuation of the field of a surface slow electromagnetic wave. The model operability was checked during flaw detection control in the CST Studio suite system.

**Keywords:** electrodynamic model, dielectric coating, surface electromagnetic wave, dispersion equation, transverse resonance method, defect.

С.А. Капустин, Н.А. Новоселова, Л.Г. Рудоясова

**КОМПЛЕКСНЫЙ РЕЗОНАНС КАК КОЛЕБАНИЕ,  
ПРИСОЕДИНЕННОЕ К ИСТОЧНИКУ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

На примере круглого двухслойного экранированного волновода рассматриваются колебания и волны в неоднородных электродинамических структурах, описываемые решениями самосогласованных краевых задач, в которых обязательным является присутствие источника, имеющего обратную связь с полем.

**Ключевые слова:** комплексные волны, комплексный резонанс, присоединенная краевая задача, самосогласованная задача.

Неоднородные электродинамические структуры в общем случае описываются несамосопряженными краевыми задачами [1-4]. Для экранированных структур эти задачи, будучи однородными, являются задачами на собственные функции и собственные значения, описывающими собственные волны. Для открытых структур несамосопряженные краевые задачи, являясь полуоднородными (однородное уравнение и неоднородные, в общем случае, граничные условия), наряду с собственными волнами могут описывать несобственные волны дискретного спектра [5]. Собственные значения несамосопряженных краевых задач в общем случае являются [1-5, 6-8] комплексными величинами и соответствуют различным видам комплексных волн, которые, в зависимости от признаков несамосопряженности краевой задачи [1-4, 9-11], могут иметь различную природу и свойства.

Как показано в [2, 12, 13], теоретически и экспериментально, собственные комплексные волны слоистых экранированных волноводов источниками, описываемыми действительными функциями пространственных координат, возбуждаются комплексно-сопряженными параметрами, приводя к возникновению явления комплексного резонанса, описанного в [2, 12-14]. Феномен комплексного резонанса впервые был обозначен в [15].

Комплексный резонанс, отличающийся от обычного резонанса своим существованием не в точке, а во всем диапазоне существования комплексных волн, имеет место [12-14] только при наличии источника, через который замыкаются прямой и обратный потоки мощности [16]. Таким образом, две взаимодействующие между собой комплексные волны оказываются «привязанными» к источнику, а поле комплексного резонанса – является «присоединенным» к источнику электромагнитным колебанием. Задача о возбуждении комплексного резонанса является самосогласованной – источник создает пару комплексных волн, образующих замкнутые через источник потоки мощности.

Как показано в [2, 15], собственные комплексные волны двухслойного круглого экранированного волновода индивидуально возбуждаются распределенным источником бегущей волны. Следовательно, находясь в синхронизме с этой волной, комплексная волна, «привязанная» к источнику такого типа, удовлетворяет уравнению Гельмгольца с правой частью, соответствующей функции, описывающей бегущую волну. Такое уравнение можно назвать присоединенным к обычному уравнению Гельмгольца. Поля двух комплексных волн с комплексно сопряженными амплитудами образуют «присоединенное» к источнику колебание,

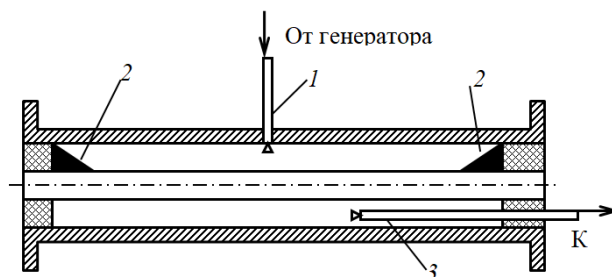
которое в силу обязательного требования присутствия источника не следует называть собственным. Комплексный резонанс, соответствующий этому колебанию, образуется полем, локализованным вблизи источника, рис. 1. В данном случае источник полагается расположенным при  $z = 0$ , а правая часть присоединенного уравнения Гельмгольца имеет вид:

$$R(\alpha_{1,2}r) \cos n\varphi \cdot \cos \beta_1 z \cdot e^{-\beta_2 z},$$

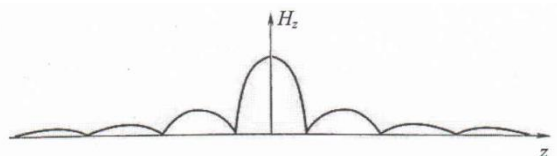
где  $R(\alpha_{1,2}r)$  – функция, описывающая радиальную зависимость поля в 1-ой и 2-ой областях направляющей структуры.

На рисунке изображены отрезок двухслойного круглого экранированного волновода, в котором реализуется комплексный резонанс (рисунок, а), и продольное распределение поля в этом волноводе в режиме комплексного резонанса (рисунок, б).

Рассматривается двухслойная изотропная цилиндрическая направляющая структура. Это может быть двухслойный экранированный волновод или круглый открытый диэлектрический волновод. Комплексные волны таких волноводов достаточно подробно исследованы [2-4]. Их дискретные спектры в экранированных структурах состоят из собственных комплексных волн, в открытых – включают в себя как собственные, так и несобственные волны.



а)



б)

**Отрезок двухслойного круглого экранированного волновода (а)  
и продольное распределение поля в этом волноводе (б)**

Обобщая материалы работ [17-19], в которых рассматривались вопросы теории присоединенных волн в двухслойных изотропных направляющих структурах, формулируется присоединенная краевая задача для круглого двухслойного экранированного волновода. Она состоит из уравнения:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_z^{e,m}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial z^2} + \epsilon \mu \omega^2 \Pi_z^{e,m} = A^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha r) \cdot \cos n\varphi \cdot e^{-i\beta z}, \quad (1)$$

которое будем называть присоединенным уравнением Гельмгольца, и граничных условий:

$$\Pi_z^e(r=b) = 0, \quad \frac{\partial \Pi_z^m}{\partial r}(r=b) = 0; \quad (2a)$$

$$\vec{E}_{1\tau}(r=a) = \vec{E}_{2\tau}(r=a); \quad \vec{H}_{1\tau}(r=a) = \vec{H}_{2\tau}(r=a), \quad (2б)$$



где  $\Pi_z^{e,m}$  – продольные компоненты электрического и магнитного векторов Герца; а и b – радиусы внутреннего слоя и экрана.

Функции  $R_n^{e,m}$  в правой части уравнения (1) имеют [19] вид:

$$\begin{aligned} R_n^{e,m}(\alpha_1 r) &= J_n(\alpha_1 r) \text{ при } r \in [0 \div a]; \\ R_n^e(\alpha_2 r) &= \frac{J_n(\alpha_2 r)Y_n(\alpha_2 b) - J_n(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a)Y_n(\alpha_2 b) - J_n(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 a)} \\ R_n^m(\alpha_2 r) &= \frac{J_n(\alpha_2 r)Y_n'(\alpha_2 b) - J_n'(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a)Y_n'(\alpha_2 b) - J_n'(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 a)}, \text{ при } r \in [a \div b] \end{aligned}$$

где  $J_n(\alpha_{1,2}r)$ ,  $Y_n(\alpha_2 r)$  – цилиндрические функции первого и второго рода;

Правую часть уравнения (1) можно рассматривать либо как функцию распределенного источника типа бегущей волны, а присоединенную краевую задачу (1), (2) – как задачу о возбуждении волн, «присоединенных» к указанному источнику.

Решения сформулированной краевой задачи записываем в виде:

$$\Pi_{z_{1,2}}^{e,m} = \left[ C_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + D_{n_{1,2}}^{e,m} \left( -\frac{iz}{2\beta} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + \rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] \begin{cases} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{cases} e^{-i\beta z} \cos \beta_1 z e^{-\beta_2 z}, \quad (3)$$

где функции  $\rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r)$  удовлетворяют уравнениям:

$$\rho''(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} \rho'(\alpha_{1,2}r) + \left( \alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho(\alpha_{1,2}r) = \bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r), \quad (4)$$

которые можно рассматривать как присоединенные уравнения Бесселя.

Подставляя решения (3) в (1), получаем:

$$\begin{aligned} & C_{n_{1,2}}^{e,m} \left[ R_n^{e,m''}(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} R_n^{e,m'}(\alpha_{1,2}r) + \left( \alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] + \\ & + D_{n_{1,2}}^{e,m} \left[ R_n^{e,m''}(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} R_n^{e,m'}(\alpha_{1,2}r) + \left( \alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] + \\ & + \left[ \rho^{e,m''}(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} \rho^{e,m'}(\alpha_{1,2}r) + \left( \alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] - \\ & - D_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) = A^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) видно, что решение (3) удовлетворяет с учетом уравнения (4) присоединенному уравнению Гельмгольца (1) при условии:

$$\bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} - D_{n_{1,2}}^{e,m} = A^{e,m}. \quad (10)$$

В том случае, когда:

$$\bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} = D_{n_{1,2}}^{e,m}, \quad (11)$$

решения (3) удовлетворяют обычному (однородному) уравнению Гельмгольца.

Из граничных условий (2б) получаем систему функциональных уравнений, зависящих от продольной координаты. Приравнявая в них члены, имеющие линейную зависимость от координаты  $z$ , получаем систему линейных однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $D_{n_{1,2}}^{e,m}$ . Условие нетривиальности решений этой системы дает уравне-

ние, совпадающее с дисперсионным уравнением собственных волн круглого двухслойного экранированного волновода.

Члены в вышеуказанных функциональных уравнениях, не имеющие координатной зависимости, при условии (4) дают систему линейных неоднородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов:  $C_{n_{1,2}}^{e,m}$ . Главные определители двух систем (однородной и неоднородной) совпадают. Будучи приравненными нулю, они дают дисперсионные уравнения собственных волн КДЭВ.

Нетривиальные решения системы линейных однородных алгебраических уравнений (коэффициенты  $D_{n_{1,2}}^{e,m}$ ) подставляются в систему неоднородных уравнений, которая решается относительно коэффициентов  $C_{n_{1,2}}^{e,m}$ .

Поскольку для волн, описываемых решениями (3) должны выполняться граничные условия (2б), необходимо, чтобы системы однородных и неоднородных линейных алгебраических уравнений имели совместные решения. Система однородных уравнений имеет нетривиальные решения только при равенстве нулю ее определителя. Поскольку главный определитель системы неоднородных уравнений совпадает с определителем системы однородных уравнений, система неоднородных уравнений может иметь решения только при равенстве нулю ее дополнительных определителей. Таким образом, собственные значения краевой задачи, определяющие волновые числа волн, описываемых этой задачей, находятся [6-9] как совместные решения трех трансцендентных уравнений:

уравнения:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

совпадающего с дисперсионным уравнением нормальных волн, и двух дополнительных:

$$\begin{vmatrix} c_1 & a_{12} \\ c_2 & a_{22} \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 \\ a_{21} & c_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

Каждое из этих уравнений решается совместно с уравнениями:

$$\varepsilon_{1,2} \mu_{1,2} \omega^2 = \alpha_{1,2}^2 + \beta^2. \quad (10)$$

Волнам, описываемым рассматриваемой краевой задачей, соответствуют решения, удовлетворяющие одновременно всем трем уравнениям (8), (9) совместно с уравнениями (10), связывающими волновые числа. Численное решение указанных уравнений [17,18] показало существование их совместных решений, соответствующих волнам, которые можно назвать присоединенными к источнику, поскольку они описываются уравнением (1), в правой части которого стоит функция (описывающая источник), являющаяся решением краевой задачи на однородном уравнении Гельмгольца.

Таким образом, наблюдается единство математической и физической идеологий: с одной стороны решаем краевую задачу на присоединенном уравнении, с другой – получаем волны, существующие только при наличии источника, то есть присоединенные (привязанные) к нему.

## Выводы

Для колебательных и направляющих электродинамических структур могут быть сформулированы краевые задачи, которые описывают колебания и волны, присоединенные к источнику, существующие только при его наличии. Такие задачи следует называть самосогласо-

ванными, поскольку в них учитывается обратное влияние поля на источник, поскольку волновые числа и в функциях поля, и в функциях источника один и те же. Амплитуды указанных волн и колебаний имеют зависимость от продольной координаты.

### Библиографический список

1. **Веселов, Г.И.**, Раевский С.Б. Комплексные волны в поперечно-неоднородных направляющих структурах // Радиотехника. 1987. т.42. №8. с.64-67
2. **Веселов, Г.И.**, Раевский С.Б. – Слоистые металло-диэлектрические волноводы. М.: Радио и связь. 1988. 248 с.
3. **Раевский, А.С.**, Раевский С.Б. Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами. – М.: Радиотехника, с. 110.
4. **Раевский, А.С.**, Раевский С.Б. Комплексные волны. – М.: Радиотехника, 2010, с. 223.
5. **Шевченко, В.В.** Наглядная классификация волн, направляемых регулярными открытыми волноводами // Радиотехника и электроника, 1969, т.12, №10, с. 1768-1772
6. **Наймарк, М.А.** Линейные дифференциальные операторы. – М.: Наука, 1969.
7. Раевский С.Б. Комплексные волны в двухслойном круглом экранированном волноводе. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика, т.15, №1, 1972, с. 112-116.
8. **Раевский, С.Б.** О существовании комплексных волн в некоторых двухслойных изотропных структурах // Изв. Вузов СССР. Сер. Радиофизика, 1972, т.15, №12, с. 1926-1931.
9. **В. Эллис, С. Буксбаум, А. Берс,** Волны в анизотропной плазме. – М.: Атомиздат, 1969. – 311 с.
10. **Раевский, А.С.**, Раевский С.Б. О комплексных волнах круглого диэлектрического волновода в поглощающей среде // Радиотехника и электроника, 1998, т.43, №12, с. 1409-1412.
11. **Виприцкий, Д.Д.**, Назаров А.В., Раевский С.Б. О комплексных волнах в невзаимных направляющих структурах // Письма в ЖТФ, 2007, т.33, вып.5, с. 1-11.
12. **Веселов, Г.И.**, Калмык В.А., Раевский С.Б., Полосовой фильтр на двухслойном круглом экранированном волноводе в режиме комплексных волн // Изв. вузов СССР. – Радиофизика, 1983, т.26, №8, с. 900-903.
13. **Иванов, А.Е.**, Раевский С.Б. Комплексный резонанс в структуре на основе круглого двухслойного экранированного волновода // Радиотехника и электроника, 1991, т.36, №8, с. 1463-1468.
14. **Раевский, А.С.**, Раевский С.Б., Цинин О.Т. Комплексный резонанс в круглом двухслойном экранированном волноводе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2002, т.5, №2, с. 40-45.
15. **Веселов, Г.И.**, Калмык В.А., Раевский С.Б., Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода // Радиотехника, 1980, т.35, №9, с. 59-61.
16. **Веселов, Г.И.**, Раевский С.Б., О встречных потоках мощности в некоторых двухслойных изотропных структурах // Изв. вузов СССР. – Радиофизика, 1983, т.26, №9, с. 1041 - 1044
17. **Малахов, В.А.**, Раевский А.С., Раевский С.Б. Присоединенные волны в круглом двухслойном экранированном волноводе // Письма в ЖТФ, 2011, т.37, вып. 2, с. 71-79.
18. **Malakhov V.A.**, Raevskii A.S., Raevskii S.B. Added solutions of boundary value problems for double-layer guiding structures. International Journal of Electromagnetics and Applications. 2012, vol.2, №5, p. 114-199.

19. **Раевский, А.С.**, Раевский С.Б., Присоединенные волны как волны, создаваемые источником типа антенны бегущей волны // Письма в журнал технической физики, 2013, №23, с. 13-17.

**S.A. Kapustin, N.A. Novoselova, L.G. Rudoyasova**

**COMPLEX RESONANCE AS A OSCILLATION,  
JOINT TO THE SOURCE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** The study of wave problems on the attached Helmholtz equation, which have a linear field dependence on the longitudinal coordinate due to distributed power take-off on the excitation wave.

**Design/methodology/approach:** The problems of excitation of waves in shielded waveguides by a source such as a traveling wave antenna are considered. The wave numbers of the latter coincide identically with the wave numbers of the excited waves, which in this case are improper, waves “attached” to the source, which do not exist without the source. Since the “connected” waves are in synchronism with the traveling wave exciting them, and these waves are energetically connected, the considered problem should be called self-consistent.

**Finding (Results):** A unity of mathematical and physical ideologies is observed: on the one hand, we solve a boundary-value problem on an attached equation, on the other, we obtain waves that exist only if there is a source, that is, attached (attached) to it. Self-consistent boundary-value problems are formulated that describe oscillations and waves attached to the source, existing only when it is present. The tasks are self-consistent because they take into account the inverse effect of the field on the source, since the wave numbers in the field functions and in the source functions are the same. The amplitudes of these waves and vibrations depend on the longitudinal coordinate. Oscillations and waves are attached because they are described by the attached Helmholtz equations, the right parts of which are solutions to the corresponding homogeneous boundary value problems.

**Keywords:** complex waves, complex resonance, attached boundary value problem, self-consistent problem

С.А. Капустин, Н.А. Новоселова, Л.Г. Рудоясова

САМОСОГЛАСОВАННЫЕ КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ  
НА ПРИСОЕДИНЕННОМ УРАВНЕНИИ ГЕЛЬМГОЛЬЦАНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород

Рассматривается возможность постановки краевых задач Дирихле и Неймана на присоединенном уравнении Гельмгольца для волн типа Еи Нв однородно заполненном экранированном волноводе круглого поперечного сечения. Показывается, что такие задачи являются самосогласованными, поскольку в них учитывается обратное влияние поля на источник, и волновые числа в функциях поля и в функциях источника совпадают. Делается вывод, что в однородно заполненных регулярных волноводах могут существовать только присоединенные волны типа Е. Для Н-волн решение присоединенного уравнения Гельмгольца не удовлетворяет условию Неймана на экране. В неоднородно заполненных волноводах поля являются гибридными, то есть присоединенные краевые задачи являются смешанными, то есть формулируемым на обоих векторах Герца.

**Ключевые слова:** комплексные волны, комплексный резонанс, присоединенная краевая задача, самосогласованная задача.

В работах [1-4] показано, что в экранированных волноводах с неоднородным заполнением наряду с собственными волнами могут существовать присоединенные к источнику несобственные волны, описываемые краевыми задачами на присоединенном уравнении Гельмгольца, под которым понимается уравнение с правой частью, являющейся решением однородной краевой задачи на том же самом уравнении, но с нулевой правой частью. Такие краевые задачи являются самосогласованными, поскольку в них учитывается обратное влияние возбуждаемого поля на первичный источник и волновые числа в функциях поля и источника совпадают. Источники указанного вида можно классифицировать как источники типа бегущей волны, находящейся в синхронизме с возбуждаемым ей полем. Постоянная «подпитка» поля распределенным (бегущим) источником приводит к его (поля) линейному нарастанию в направлении распространения. Возникает эффект, подобный взаимодействию волноводного поля с полем пространственного заряда, наблюдаемый в лампе бегущей волны. Можно предположить, что эффект возбуждения распределенным источником присоединенной волны должен наблюдаться не только в неоднородных направляющих структурах.

Рассмотрим круглый экранированный однородно заполненный волновод. Сформулируем для него присоединенную краевую задачу. Она состоит из уравнения:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_z^{e,m}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial z^2} + \varepsilon \mu \omega^2 \Pi_z^{e,m} = A^{e,m} J_n(\alpha^{e,m} r) \cos n\varphi e^{-i\beta z}, \quad (1)$$

которое в соответствии с [3,4] будем называть присоединенным уравнением Гельмгольца, и граничных условий:

$$\Pi_z^e(r=a) = 0; \quad \frac{\partial \Pi_z^m}{\partial r}(r=a) = 0, \quad (2)$$

соответствующих задачам Дирихле и Неймана.

В (1), (2)  $\Pi_z^{e,m}$  – продольные компоненты электрического и магнитного векторов Герца;  $J_n(\alpha^{e,m}r)$  – функция Бесселя;  $a$  – радиус волновода;  $\alpha^e$  и  $\alpha^m$  – корни уравнений (2).

Запишем решения вышеуказанных краевых задач в виде:

$$\Pi_z^{e,m} = \left[ C^{e,m} J_n(\alpha^{e,m}r) + D^{e,m} \left( -\frac{iz}{2\beta} \right) J_n(\alpha^{e,m}r) + \rho^{e,m}(\alpha^{e,m}r) \right] \cos n\varphi \cdot e^{-i\beta z}, \quad (3)$$

где  $C^{e,m}$  и  $D^{e,m}$  – произвольные на начальном этапе постановки присоединенной краевой задачи амплитудные коэффициенты, на которые в дальнейшем будут наложены условия, обеспечивающие удовлетворение решения (3) уравнению (1);  $\rho^{e,m}(\alpha^{e,m}r)$  – частные решения неоднородного дифференциального уравнения:

$$\bar{R}''(r) + \frac{1}{r} \bar{R}'(r) + \left( \alpha^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \bar{R}(r) = J_n(\alpha r), \quad (4)$$

то есть

$$\rho^{e,m''} + \frac{1}{r} \rho^{e,m'} + \left( (\alpha^{e,m})^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho^{e,m} = \bar{D}^{e,m} J_n(\alpha^{e,m}r). \quad (5)$$

В уравнениях (4), (5) штрих означает дифференцирование по радиальной координате  $r$ . Правые части уравнений (5) – решения краевых задач Дирихле и Неймана на однородном дифференциальном уравнении:

$$R''(r) + \frac{1}{r} R'(r) + \left( \alpha^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R(r) = 0, \quad (6)$$

совпадающим с уравнением Бесселя. Уравнение (4) в отличие от (6) будем называть присоединенным уравнением Бесселя. Его запись в виде (5) соответствует задачам Дирихле и Неймана, решения которых записаны в виде (3). Значения  $\alpha^{e,m}$  в уравнениях (5) находятся из граничных условий (2).

Решения уравнений (5) имеют вид:

$$\rho(\alpha r) = -J_n(\alpha r) \int \frac{Y_n(\alpha r) R(\alpha r)}{W(\alpha r)} d(\alpha r) + Y_n(\alpha r) \int \frac{J_n(\alpha r) R(\alpha r)}{W(\alpha r)} d(\alpha r), \quad (7)$$

где  $R(\alpha r)$  – решения уравнения (6), соответствующие краевым задачам Дирихле и Неймана;  $W(\alpha r)$  – вронскиан, записываемый как:

$$W(\alpha r) = J_n(\alpha r) Y_n'(\alpha r) - J_n'(\alpha r) Y_n(\alpha r) = \frac{2}{\pi \alpha r};$$

$Y_n(\alpha r)$  – функция Неймана.

В (7)  $\rho^{e,m}(\alpha^{e,m}r)$  соответствуют задачам Дирихле и Неймана.

Подставляя (3) в уравнения (1), получаем:

$$\begin{aligned}
& C^{e,m} \left[ J_n''(\alpha^{e,m}r) + \frac{1}{r} J_n'(\alpha^{e,m}r) + \left( (\alpha^{e,m})^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) J_n(\alpha^{e,m}r) \right] + \\
& + D^{e,m} \left[ J_n''(\alpha^{e,m}r) + \frac{1}{r} J_n'(\alpha^{e,m}r) + \left( (\alpha^{e,m})^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) J_n(\alpha^{e,m}r) \right] + \\
& + \left[ \rho^{e,m''}(\alpha^{e,m}r) + \frac{1}{r} \rho^{e,m'}(\alpha^{e,m}r) + \left( (\alpha^{e,m})^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho^{e,m}(\alpha^{e,m}r) \right] - \\
& - D^{e,m} J_n(\alpha^{e,m}r) = A^{e,m} J_n(\alpha^{e,m}r).
\end{aligned} \tag{8}$$

Из (8) видно, что решения (3) с учетом уравнений (5), (6) удовлетворяют присоединенным уравнениям Гельмгольца (1), соответствующим краевым задачам Дирихле и Неймана о возбуждении несобственных (присоединенных к источнику) волн типа Е и Н распределенным источником в виде бегущей волны при условии:

$$\bar{D}^{e,m} - D^{e,m} = A^{e,m}. \tag{9}$$

В том случае, когда

$$\bar{D}^{e,m} = D^{e,m} \tag{10}$$

решения (3) удовлетворяют обычному (однородному) уравнению Гельмгольца. Граничные условия (2) приводят к уравнениям:

$$\left( C^e - i \frac{z}{2\beta} D^e \right) J_n(\alpha^e a) + \rho^e(\alpha^e a) = 0 \tag{11}$$

для Е-волн и

$$\left( C^m - i \frac{z}{2\beta} D^m \right) J_n'(\alpha^m a) + \rho^{m'}(\alpha^m a) = 0 \tag{12}$$

для Н-волн.

Поскольку поперечные волновые числа Е-волн удовлетворяют уравнению:

$$J_n(\alpha^e a) = 0, \tag{13}$$

равенство (11) выполняется тождественно. При этом в (7) полагаем:

$$R(\alpha r) = J_n(\alpha^e r),$$

что обращает в нуль подынтегральное выражение при  $r = a$ .

Поскольку поперечные волновые числа Н-волн удовлетворяют уравнению:

$$J_n'(\alpha^m a) = 0, \tag{14}$$

для выполнения равенства (12) необходимо, чтобы

$$\rho^{m'}(\alpha^m a) = 0. \tag{15}$$

Положив в (7)  $R(\alpha r) = J_n(\alpha^m r)$  имеем:

$$\rho^{m'}(\alpha^m r) = -J_n'(\alpha^m r) \int \frac{Y_n(\alpha^m r) J_n(\alpha^m r)}{W(\alpha^m r)} d(\alpha^m r) + Y_n(\alpha^m r) \int \frac{J_n^2(\alpha^m r)}{W(\alpha^m r)} d(\alpha^m r). \tag{16}$$

Выражение (16) приводим к виду:

$$\begin{aligned}
\rho^{m'}(\alpha^m r) &= -J_n'(\alpha^m r) \int \frac{Y_n(\alpha^m r) J_n(\alpha^m r)}{W(\alpha^m r)} d(\alpha^m r) + \\
&+ \frac{(\alpha^m r)^2}{2} [J_n^2(\alpha^m r) - J_{n-1}(\alpha^m r) J_{n+1}(\alpha^m r)] Y_n'(\alpha^m r) = \\
&= -J_n'(\alpha^m r) \int \frac{Y_n(\alpha^m r) J_n(\alpha^m r)}{W(\alpha^m r)} d(\alpha^m r) + \\
&+ \frac{(\alpha^m r)^2}{2} Y_n'(\alpha^m r) \left\{ J_n^2(\alpha^m r) \left[ 1 - \frac{n^2}{(\alpha^m r)^2} \right] + [J_n'(\alpha^m r)]^2 \right\}.
\end{aligned} \tag{17}$$

Функция (17) обеспечит, если значения  $\alpha^m$  находятся из уравнения (14), выполнение равенства (16) только при условии

$$1 - \frac{n^2}{(\alpha^m r)^2} = 0. \tag{18}$$

Таким образом, граничное условие на экранирующей поверхности в задаче Неймана на присоединенном уравнении Гельмгольца требует выполнения равенства (18).

Показано, что функции (3) при выполнении условия (9) удовлетворяют присоединенным уравнениям Гельмгольца (1). При выполнении условия (10) они удовлетворяют однородным уравнениям Гельмгольца. Для того, чтобы эти функции были решениями краевых задач Дирихле и Неймана необходимо, чтобы они удовлетворяли граничным условиям (2) на экранирующей поверхности. При этом значения  $\alpha^e$  и  $\alpha^m$  определяются как корни уравнений (13) и (14).

Рассмотренные задачи фактически являются задачами возбуждения волн в экранированных волноводах источником типа антенны бегущей волны. Волновые числа последней тождественно совпадают с волновыми числами возбуждаемых волн, которые в данном случае являются несобственными, «присоединенными» к источнику волнами, не существующие без источника. Поскольку «присоединенные» волны находятся в синхронизме с возбуждающей их бегущей волной, и указанные волны являются энергетически связанными, рассмотренную задачу следует называть самосогласованной.

Таким образом, для направляющих структур наряду с обычными краевыми задачами о собственных волнах могут быть сформулированы задачи о волнах на присоединенном уравнении Гельмгольца, которые имеют линейную зависимость поля от продольной координаты за счет распределенного отбора мощности от волны возбуждения. Показано, что такая краевая задача имеет решение в виде (3), удовлетворяющее присоединенному уравнению Гельмгольца и граничным условиям (2), выполняющимся для волн типа Е. Для волн типа Н в силу несовместимости уравнений (14) и (18) граничное условие (2) не выполняется, что говорит о невозможности существования в однородно заполненном экранированном волноводе волн типа Н, присоединенных к источнику.

### Библиографический список

1. Малахов, В.А., Раевский А.С., Раевский С.Б. Присоединенные волны в круглом двухслойном экранированном волноводе. Письма в ЖТФ, 2011, т.37, вып. 2, с. 71-79.



2. Malakhov V.A., Raevskii A.S., Raevskii S.B. Added solutions of boundary value problems for double-layer guiding structures. *International Journal of Electromagnetics and Applications*. 2012, vol.2, №5, p. 114-119.

3. Раевский, А.С., Раевский С.Б., Присоединенные волны как волны, создаваемые источником типа антенны бегущей волны // Письма в журнал технической физики, 2013, №23, с. 13-17.

4. Раевский, А.С., Раевский С.Б. Седаков А.Ю. Колебания и волны, присоединенные к источнику. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2014, т.17, №3, с. 6-8.

**S.A. Kapustin, N.A. Novoselova, L.G. Rudoyasova**

## **SELF-CONSISTENT BOUNDARY VALUE PROBLEMS ON THE ADJUSTED HELMGOLZ EQUATION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** Statement of the Dirichlet and Neumann boundary value problems on the attached Helmholtz equation for waves of type E and H in a uniformly filled shielded waveguide of circular cross section.

**Design/methodology/approach:** Shielded waveguides with inhomogeneous filling are considered. In addition to their own waves, there can exist improper waves attached to the source, described by boundary value problems on the attached Helmholtz equation, which is understood as an equation with the right-hand side, which is a solution of a homogeneous boundary value problem on the same equation, but with zero right side. Such boundary value problems are self-consistent, since they take into account the inverse effect of the excited field on the primary source and the wave numbers in the field and source functions coincide. Sources of this type can be classified as sources of the type of traveling wave, which is in synchronism with the field excited by it. Constant "feeding" of the field by a distributed (running) source leads to its (field) linear increase in the direction of propagation. There is an effect similar to the interaction of a waveguide field with a space charge field, observed in a traveling wave lamp. The effect of excitation by a distributed source of an attached wave should be observed not only in inhomogeneous guiding structures.

**Finding (Results):** In uniformly filled regular waveguides, only coupled waves of type E can exist. For H-waves, the solution of the attached Helmholtz equation does not satisfy the Neumann condition on the screen. In inhomogeneously filled waveguides, the fields are hybrid, that is, the attached boundary value problems are mixed, that is, formulated on both Hertz vectors. The considered problems are actually the problems of excitation of waves in shielded waveguides by a source such as a traveling wave antenna. The wave numbers of the latter coincide identically with the wave numbers of the excited waves, which in this case are improper, waves "attached" to the source, which do not exist without the source. Since the "connected" waves are in synchronism with the traveling wave exciting them, and these waves are energetically connected, the considered problem should be called self-consistent. Thus, for guiding structures, along with the usual boundary value problems on eigenwaves, wave problems can be formulated on the attached Helmholtz equation, which have a linear field dependence on the longitudinal coordinate due to distributed power selection on the excitation wave. It is shown that such a boundary-value problem has a solution in the form satisfying the attached Helmholtz equation and the boundary conditions that are satisfied for waves of type E. For waves of type H, due to the incompatibility of the equations and the boundary conditions, it is not fulfilled, which indicates the impossibility of existence in a uniformly filled shielded waveguide type H waves attached to the source.

**Keywords:** complex waves, complex resonance, attached boundary value problem, self-consistent problem.

Е.С. Балобанов, М.М. Ивойлова, В.А. Козлов, А.Л. Кунилов

## СИСТЕМА ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКА БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Рассматривается техническое предложение по созданию системы встроенного контроля (СВК) приёмопередатчика с приёмником прямого преобразования частоты, входящего в состав бортового ретранслятора. Рассмотрены особенности формирования тестового сигнала и схемно-технического исполнения её основных составных частей. Приведена функциональная схема приёмопередатчика с предлагаемой СВК.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, бортовые ретрансляторы, приёмники, передатчики, встроенный контроль.

### Введение

Современное исполнение ретрансляторов систем спутниковой связи основано на применении бортовой обработки информации, производящей помехоустойчивое кодирование и идентификацию абонента и исключающей несанкционированный доступ в каналы связи [1, 2]. Основными структурными компонентами ретранслятора с бортовой обработкой (РБО), определяющими его возможности, являются приёмопередатчик и система встроенного контроля (СВК), осуществляющая контроль работоспособности РБО непосредственно на орбите.

Контроль работоспособности созданных ретрансляторов, например, типа «Молния-1» [3], осуществляется СВК, построенной на основе имитатора сигналов с несущей частотой земных станций, контрольно-измерительного устройства, измеряющего параметры сигнала передатчика, и программно-временного устройства, управляющего работой этой системы. При этом приёмник подобных ретрансляторов выполнен по супергетеродинной схеме.

Недостатками данной СВК являются:

- сложность создания имитатора сигналов с несущей частотой земных станций и фазовой манипуляцией тестовыми кодами, формирующего всю сетку рабочих частот;
- сложность создания контрольно-измерительного устройства, обеспечивающего контроль уровня мощности и достоверность тестовых кодов фазоманипулированных сигналов передатчика;
- функциональная и схемно-техническая сложность системы в целом, приводящая к снижению массо-габаритных характеристик и увеличению энергопотребления.

В работе [4], рассмотрен технический облик приёмопередатчика РБО с приёмником прямого преобразования и СВК, в которой тестовый сигнал формируется путём сдвига гетеродинированием частот передатчика в диапазон частот приёмника.

Недостатками этой СВК являются:

- функциональная сложность схемы построения, приводящая к низким массо-габаритным характеристикам;

- значительное энергопотребление;
- внешнее управление частотой тестового сигнала;
- пониженная надёжность.

Все перечисленные выше недостатки СВК обусловлены применением в качестве гетеродина этой системы высокостабильного перестраиваемого цифровым способом синтезатора частоты и блока управления и синхронизации (БУС), в памяти которого должен храниться массив цифровых данных для установки в синтезаторе частоты сетки гетеродинных частот.

Целью исследований, результаты которых приведены в настоящем докладе, является разработка технических предложений по созданию более перспективной СВК для приёмопередатчика РБО [4] с лучшими ожидаемыми техническими характеристиками. При этом использование предлагаемой СВК не должно требовать изменений схем передатчика и приёмника, приведённых в [4].

### Функциональная схема приёмопередатчика РБО с СВК [4]

Структурная схема приёмопередатчика РБО включает в себя приёмник (ПРМ), передатчик (ПРД) и СВК.

Функциональная схема приёмопередатчика с СВК для РБО, в которой тестовый сигнал формируется путём сдвига гетеродинированием частот передатчика в диапазон частот приёмника, приведена на рис. 1 [4].

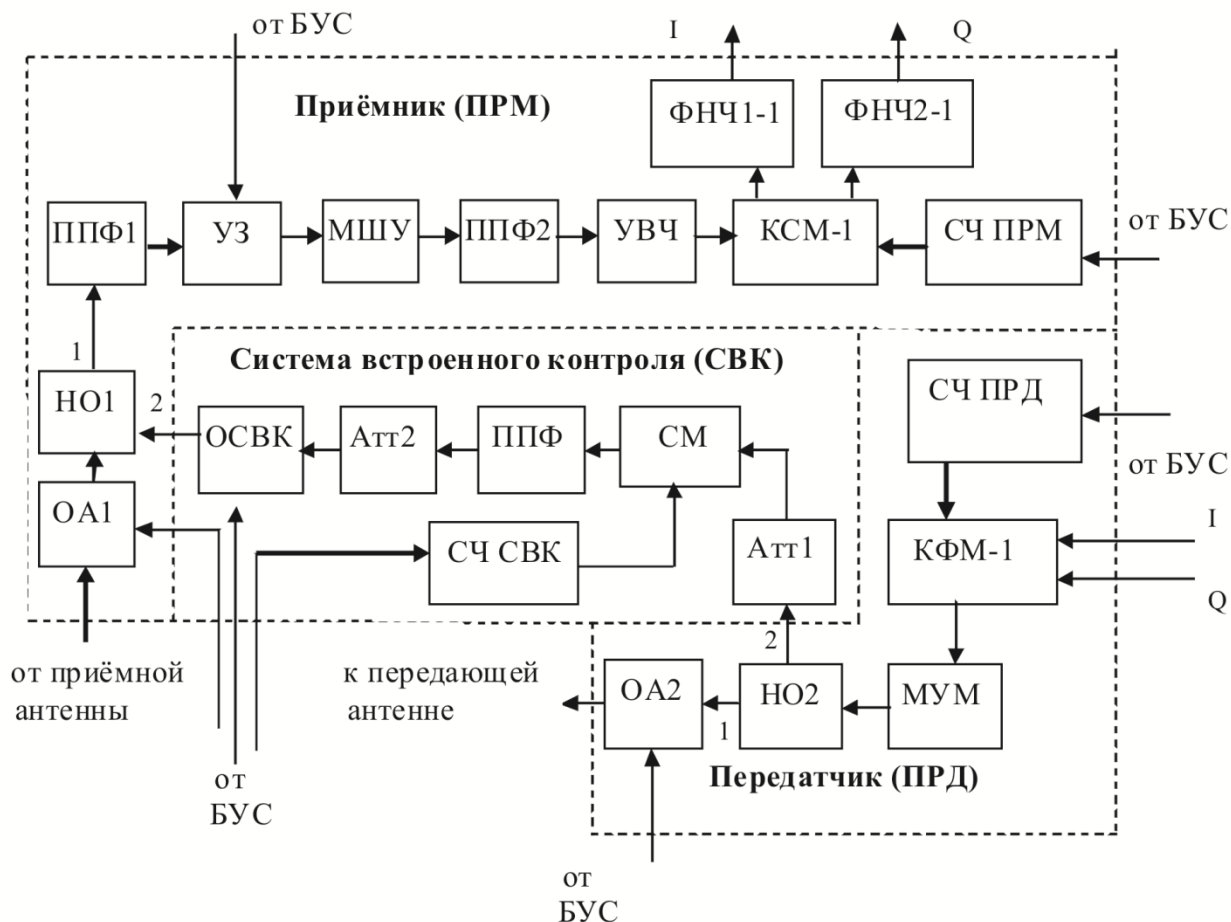


Рисунок 1. Функциональная схема приёмопередатчика РБО с СВК [4]

В состав функциональной схемы ПРМ, приведённой на рис. 1, входят следующие устройства:

- отключатель приёмной антенны (ОА1), предназначенный для отключения приёмной антенны в режиме «Тест-контроль», управляемый командой с БУС;
- направленный ответвитель (НО1), предназначенный для подачи в приёмный тракт тестового сигнала с выхода СВК;
- входной полосно-пропускающий фильтр (ППФ1), осуществляющий предварительную селекцию диапазона частот принимаемого сигнала;
- устройство защиты (УЗ), предназначенное для защиты от мощных помех, управляемое сигналом с БУС;
- малошумящий усилитель (МШУ), осуществляющий предварительное усиление входного сигнала с минимальным внесением собственного шума;
- полосно-пропускающий фильтр (ППФ2), выделяющий диапазон частот принимаемых сигналов из смеси их с собственным шумом МШУ;
- усилитель высокой частоты (УВЧ), усиливающий полезный сигнал до уровня, необходимого для его последующего преобразования на видеочастоту;
- квадратурный смеситель (КМС-1), предназначенный для выделения комплексной огибающей сигнала в аналоговом виде;
- синтезатор частоты (СЧ ПРМ), формирующий высокостабильный по частоте сигнал для КСМ;
- фильтры низкой частоты (ФНЧ1-1, ФНЧ2-1), осуществляющие сосредоточенную фильтрацию полезного сигнала.

В состав функциональной схемы ПРД, приведённой на рис. 1, входят следующие устройства:

- синтезатор частоты (СЧ ПРД), формирующий высокостабильный по частоте сигнал для квадратурного фазового модулятора (КФМ-1);
- квадратурный фазовый модулятор (КФМ-1), управляемый сигналами с БУС;
- многокаскадный усилитель мощности (МУМ), усиливающий сигнал передатчика до требуемого уровня;
- направленный ответвитель (НО2), предназначенный для подачи части сигнала ПРД на вход СВК;
- отключатель передающей антенны (ОА2), предназначенный для отключения передающей антенны в режиме «Тест-контроль», управляемый командой с БУС.

В состав функциональной схемы СВК, приведённой на рис. 1, входят следующие устройства:

- аттенюатор (Атт1), ослабляющий сигнал ПРД до уровня, необходимого для линейного режима работы СВК;
- смеситель сдвига (СМ), сдвигающий частоты излучаемых ПРД сигналов в диапазон принимаемых ПРМ частот;
- синтезатор частоты (СЧ), выполняющий функцию перестраиваемого по частоте гетеродина;
- полосно-пропускающий фильтр (ППФ), предназначенный для фильтрации сигнала промежуточной частоты (ПЧ);
- аттенюатор (Атт2), ослабляющий сигнал ПЧ до уровня, соответствующего средней части динамического диапазона ПРМ;
- отключатель СВК (ОСВК), отключающий выход СВК от входа ПРМ в рабочем режиме и подключающий его в режиме «Тест-контроль».

Включение – выключение СВК осуществляется по команде «Тест-контроль» с БУС.

Установка в синтезаторе частоты СЧ СВК сетки гетеродинных частот, необходимой для контроля работоспособности ПРМ на принимаемых рабочих частотах, обеспечивается БУС, в памяти которого должен храниться массив цифровых данных, обеспечивающих управление частотой СЧ СВК.

### Функциональная схема приёмопередатчика РБО с предлагаемой СВК

Функциональная схема приёмопередатчика, построенного по схеме, рассмотренной в работе [4], и предлагаемой СВК приведена на рис. 2.

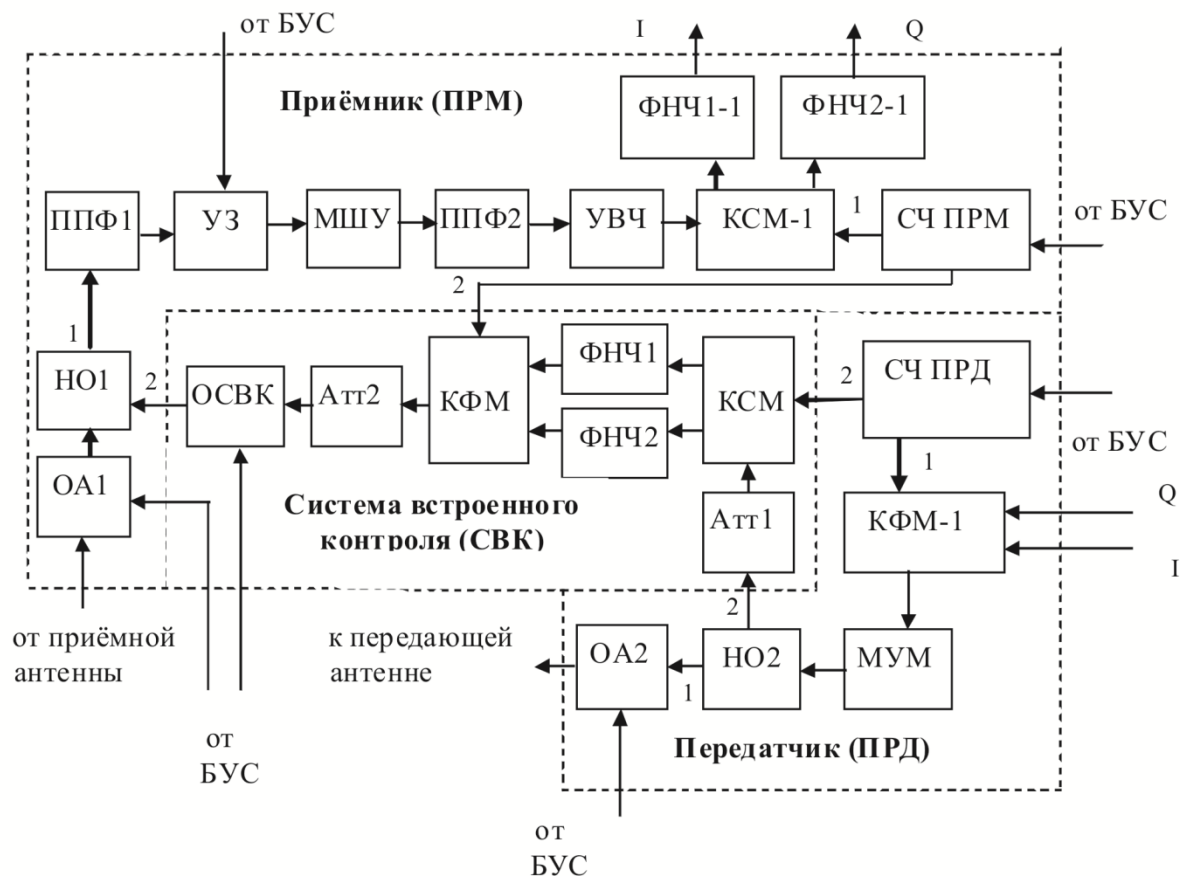


Рисунок 2. Функциональная схема приёмопередатчика с предлагаемой СВК

Сравнение схем приёмопередатчиков, приведённых на рис. 1 и рис. 2, показывает что, кроме наличия двух выходов у СЧ ПРМ и СЧ ПРД, их схемы ПРД и ПРМ идентичны друг другу. Рассмотрим особенности построения схемы СВК и алгоритм её работы в составе приёмопередатчика.

В состав функциональной схемы СВК, приведённой на рис. 2, входят следующие устройства:

- аттенуатор (АТТ1), обеспечивающий нахождение входного сигнала на линейном участке характеристики квадратурного смесителя (КСМ);
- квадратурный смеситель (КСМ), предназначенный совместно с фильтрами низкой частоты ФНЧ1 и ФНЧ2 для выделения комплексной огибающей фазоманипулированного сигнала ПРД в аналоговом виде;
- квадратурный фазовый модулятор (КФМ), управляемый сигналами с ФНЧ1, ФНЧ2;

- аттенуатор (Атт2), предназначенный для формирования уровня тестового сигнала;
- отключатель СВК (ОСВК), предназначенный для включения СВК в режим «Тест-контроль» и управляемый командой с БУС.

На схеме рис. 2 видно, что вход СВК подключён к выходу 2 второго направленного ответвителя НО2, установленного перед отключателем передающей антенны ОА2, а выход системы СВК подключён к выходу 2 первого направленного ответвителя НО1, установленного после отключателя приёмной антенны ОА1. Гетеродинный сигнал для квадратурного смесителя КСМ поступает с выхода 2 синтезатора частоты передатчика СЧ ПРД, а входной сигнал для квадратурного фазового модулятора КФМ поступает с выхода 2 синтезатора частоты приёмника СЧ ПРМ. В режиме «Тест-контроль» тестовая кодовая последовательность модуляции фазы с БУС поступает на квадратурный фазовый модулятор передатчика КФМ-1. Полученный фазоманипулированный сигнал передатчика с выхода 2 второго направленного ответвителя НО2 через первый аттенуатор Атт1 поступает на вход квадратурного смесителя КСМ, для которого гетеродинный сигнал снимается с выхода 2 синтезатора частоты передатчика СЧ ПРД. На выходе фильтров низкой частоты ФНЧ1, ФНЧ2 выделяются квадратурные составляющие огибающей, которые поступают на модулирующие входы квадратурного фазового модулятора КФМ, на сигнальный вход которого поступает непрерывный сигнал с выхода 2 синтезатора частоты приёмника СЧ ПРМ. В результате на выходе квадратурного фазового модулятора КФМ образуется тестовый фазоманипулированный сигнал, код модуляции фазы которого соответствует тестовому коду фазы, поступившему с БУС на квадратурный фазовый модулятор передатчика КФМ-1. После прохождения тестового сигнала через входной полосно-пропускающий фильтр ППФ1, устройство защиты УЗ, малошумящий усилитель МШУ, полосно-пропускающий фильтр ППФ2 и фазового детектирования квадратурным смесителем приёмника КСМ-1 на выходах фильтров низкой частоты приёмника ФНЧ1-1, ФНЧ2-1 получаем кодовую последовательность манипуляции фазы, которая далее сравнивается с тестовой кодовой последовательностью манипуляции фазы, поступившей на модулирующие входы квадратурного фазового модулятора передатчика КФМ-1. При совпадении этих последовательностей принимается решение об исправности ретранслятора.

При практической реализации предлагаемой СВК в составе приёмопередатчика РБО, как показано на рис. 2, её основные устройства – КСМ и КФМ при их достаточной широкополосности могут быть унифицированы с КСМ-1, использованным в ПРМ, и с КФМ-1, использованным в ПРД. На данную СВК бортового ретранслятора подана заявка на изобретение (№ 2019129774 от 20.09.2019).

### **Заключение**

В результате проведённых исследований предложена СВК, являющаяся альтернативной СВК [4] с формированием тестовых сигналов сдвигом гетеродинированием частот передатчика в диапазон частот приёмника.

Отличительными особенностями предложенной СВК являются:

- отсутствует перестраиваемый по частоте синтезатор частоты;
- частота тестового сигнала всегда совпадает с частотой настройки приёмника;
- в связи с отсутствием синтезатора частоты исключены требования к БУС по формированию и хранению кодов управления его частотой;
- более высокая надёжность по сравнению с надёжностью контролируемых передатчика и приёмника, обусловленная отсутствием синтезатора частоты, как активного устройства с большим энергопотреблением.

Принцип построения предложенной СВК может быть использован в системах контроля работоспособности радиотехнических систем типа РЛС и бортовых приёмоответчиков, использующих фазоманипулированные сигналы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-06008.*

### **Библиографический список**

1. **Кантор, Л.Я.** Спутниковая связь и вещание. Справочник. / Под ред. Л.Я. Кантора – М.: «Радио и связь», 1988. – 345 с.
2. **Лосев, А.А.** Перспективные технологии построения бортовых ретрансляторов спутников связи и вещания. Бортовая обработка сигналов [Электронный ресурс] URL: <https://mipt.ru/drec/upload/3b2/losev-site-arpfsytlxq.pdf>.
3. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. [Электронный ресурс] URL: <http://siblec.ru/index.php?dn=html&way>.
4. **Гаранин, С.М.** Приёмопередающее устройство ретранслятора с бортовой обработкой сигналов. / С.М. Гаранин, С.В. Зозуля, И.А. Илларионов, А.Л. Кунилов // Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - 2019». – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. –2019. – С. 193-198.

**E.S. Balobanov, M.M. Ivoylova, V.A. Kozlov, A.L. Kunilov**

### **TRANSCEIVER INTEGRATED MONITORING SYSTEM OF ONBOARD REPEATER WITH PHASOMANIPULATED SIGNALS**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific research institute experimental physics" "Scientific research institute measuring systems named J.E. Sedakov", Nizhny Novgorod

The article considers the technical proposal for creating a system of integrated monitoring of a transceiver with a direct frequency conversion receiver, which is part of the onboard repeater. The features of the formation of the test signal and circuit design of its main components are considered. The functional scheme of the transceiver along with the proposed integrated monitoring system is given.

**Keywords:** satellite connection, onboard repeaters, receivers, transmitters, integrated monitoring

В.В. Бирюков<sup>1</sup>, В.Л. Вакс<sup>1,2</sup>, В.И. Кольчугин<sup>1</sup>, В.А. Малахов<sup>1</sup>, А.Н. Панин<sup>2</sup>,  
С.И. Приползин<sup>2</sup>, Ю.В. Раевская<sup>1</sup>, А.С. Раевский<sup>1</sup>, В.В. Щербаков<sup>1</sup>

## БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ В СУБТЕРАГЕРЦОВОМ ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
<sup>2</sup>Институт физики микроструктур - филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Субтерагерцовый (субТГц) и терагерцовый (ТГц) диапазоны частот перспективны для создания высокоскоростных беспроводных сетей связи из-за возможности получения полосы пропускания в несколько десятков ГГц, что обеспечивает высокую пропускную способность. Однако быстрое ослабление сигнала при распространении в атмосфере создает сложности в обеспечении работы сетей связи этих диапазонов. Применение фиксированных узконаправленных антенн с большим коэффициентом усиления позволяет обеспечить дальность прямой наземной связи на расстояние до нескольких километров. Ограничение на дальность связи можно частично снять понижением частоты до 200 ГГц и уменьшением ширины полосы пропускания канала до единиц ГГц. В работе описан макет приемопередающего устройства (200–220 ГГц) на основе современных полупроводниковых приборов. Экспериментально показана возможность передачи цифровых сигналов со скоростью до 1 ГГб/с на расстояние 1 км. Согласно расчётам, мощности на выходе передатчика в несколько сотен микроватт достаточно для передачи данных на расстояние до 1,5 км при коэффициенте усиления антенны не менее 50 дБ.

**Ключевые слова:** субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны частот, высокоскоростные беспроводные системы связи, широкополосное приемопередающее устройство, узконаправленная антенна, антенна Кассегрена

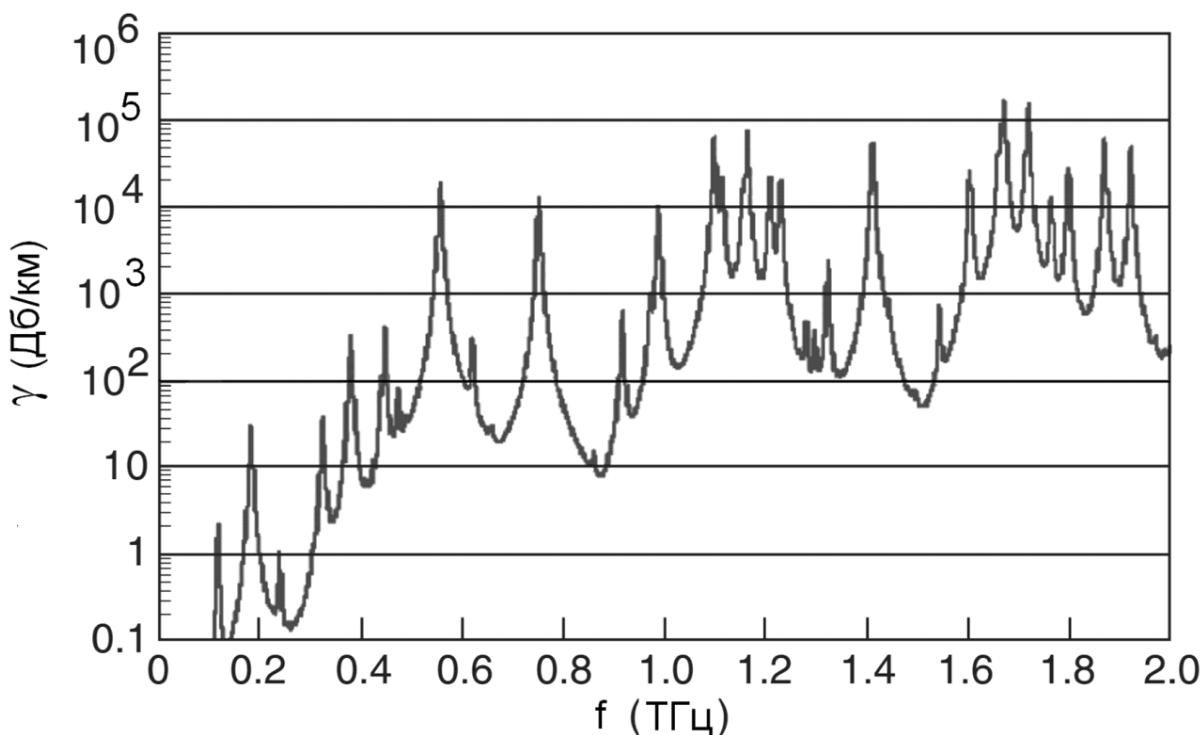
### Введение

Субтерагерцовый (субТГц) и терагерцовый (ТГц) диапазоны частот являются перспективными для построения высокоскоростных беспроводных сетей связи. Работа в субТГц и ТГц частотных диапазонах позволяет использовать полосу пропускания шириной в несколько десятков гигагерц, обеспечивая высокую пропускную способность сети связи. В то же время, использование субТГц и ТГц диапазонов частот вносит определенные сложности в работу сетей связи, в частности, связанные с необходимостью учитывать быстрое ослабление сигнала при распространении в атмосфере.

Из-за сравнительно большого поглощения в атмосфере волны субТГц и ТГц частотного диапазонов относятся к волнам ближнего действия. При распространении волн субТГц частотного диапазона возникает ослабление сигнала в атмосферных газах и гидрометеорах, а также деполяризация излучения, амплитудные и фазовые изменения. С повышением частоты ослабление сигнала в атмосфере возрастает и зависит от погодных условий. В атмосфере имеются и постоянные полосы интенсивного поглощения радиоволн, обусловленные наличием молекулярного кислорода и водяного пара: 22,2 ГГц (H<sub>2</sub>O), 60 ГГц (O<sub>2</sub>), 118,8 ГГц (O<sub>2</sub>)



и 180 ГГц (H<sub>2</sub>O) и т.д. В результате, зависимость от частоты ослабления волны в атмосфере имеет сложный вид, показанный на рис. 1 [1]. Практический интерес для связи представляют «окна прозрачности», в которых наблюдается минимальное затухание по сравнению с соседними участками субТГц частотного диапазона. Окна относительной прозрачности лежат в диапазонах: 70–100 ГГц, где атмосферное затухание составляет около 1,5 дБ/км, что близко к затуханию в традиционных СВЧ-диапазонах; в начале ТГц диапазона в интервале 200–300 ГГц, где атмосферное затухание составляет около 5-10 дБ/км. Ограничение на дальность связи может быть частично снято с помощью понижения частоты до нижней части ТГц спектра - в субТГц диапазон (в районе 0,2 ТГц), а также уменьшения ширины полосы пропускания канала с десятков до единиц гигагерц. Кроме того, для прямой наземной связи способом скомпенсировать большие потери является использование фиксированных узконаправленных антенн, при передаче на расстояние более 100 метров.



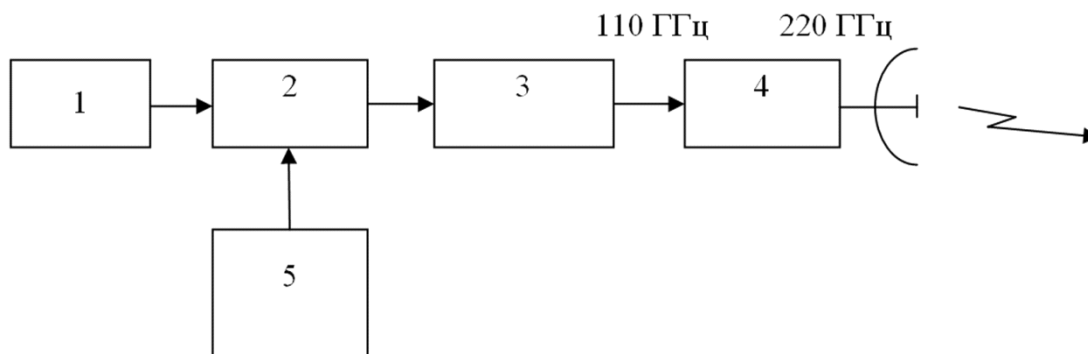
**Рисунок 1. Атмосферное ослабление в ТГц частотном диапазоне [1]**

В настоящее время наибольшая скорость передачи данных составляет 24 – 25 Гбит/с на расстоянии не более 10 м. Эти результаты представлены в работах [2,3]. Наибольшая дальность связи составляет 5,8 км при скорости передачи данных 10 Гбит/с на частоте 120 ГГц [4]. Наиболее эффективная система связи представлена в [5]. Она обеспечивает скорость передачи данных до 10 Гбит/с при ширине канала связи 3,6 ГГц и частоте несущей 140 ГГц на дальности до 1,5 км. В данной работе применена 16-QAM модуляция.

СубТГц и ТГц частотные диапазоны могут в будущем стать основой беспроводных коммуникационных систем, обеспечивающих в сотни раз большую скорость передачи данных, нежели нынешние сети мобильной связи. Развитие и внедрение систем различного назначения этих диапазонов находятся в прямой зависимости от появления и усовершенствования приборов современной электроники.

## Широкополосное приемопередающее устройство СУБТГц частотного диапазона

Группой исследователей из НГТУ им. Р.Е.Алексеева и ИФМ РАН был разработан подход к созданию широкополосного приемопередающего устройства и реализован лабораторный макет приемопередающего тракта на частоте 200 – 220 ГГц с применением современных полупроводниковых приборов. На рисунках 2 и 3 представлены схемы передатчика и приемника этого тракта.



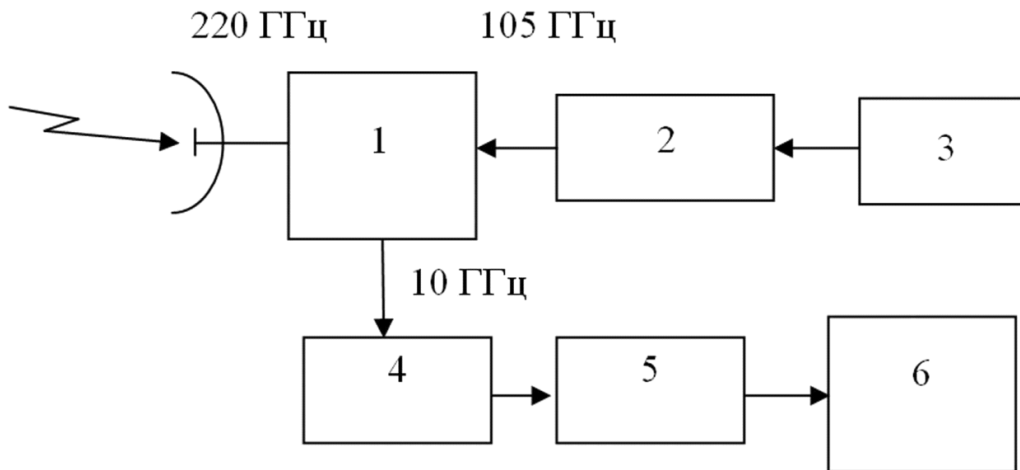
**Рисунок 2. Схема передатчика:** 1- генератор на диэлектрическом резонаторе (ГДР) (7,333 ГГц), 2- модулятор (амплитудная манипуляция) (АМн), 3-умножитель частоты на 15, 4 - удвоитель частоты, 5 – цифровой интерфейс до 1 ГГц/с

В качестве задающих генераторов как передатчика, так и гетеродина приемника применены генераторы на диэлектрических резонаторах (ГДР). Они обладают достаточно высокой стабильностью частоты и очень высокой спектральной чистотой сигнала. Далее сигналы от ГДР проходят через умножители частоты на 15. В передатчике этот сигнал предварительно модулируется по амплитуде. Выбрана амплитудная манипуляция (АМн), как наиболее простой способ и при данном построении схемы единственно возможный. Другие виды модуляции неизбежно были бы искажены при умножении частоты. Сигнал с частотой 110 ГГц в передатчике затем удваивается по частоте до 220 ГГц и поступает на антенну, имеющую высокий (порядка 50 дБ) коэффициент усиления.

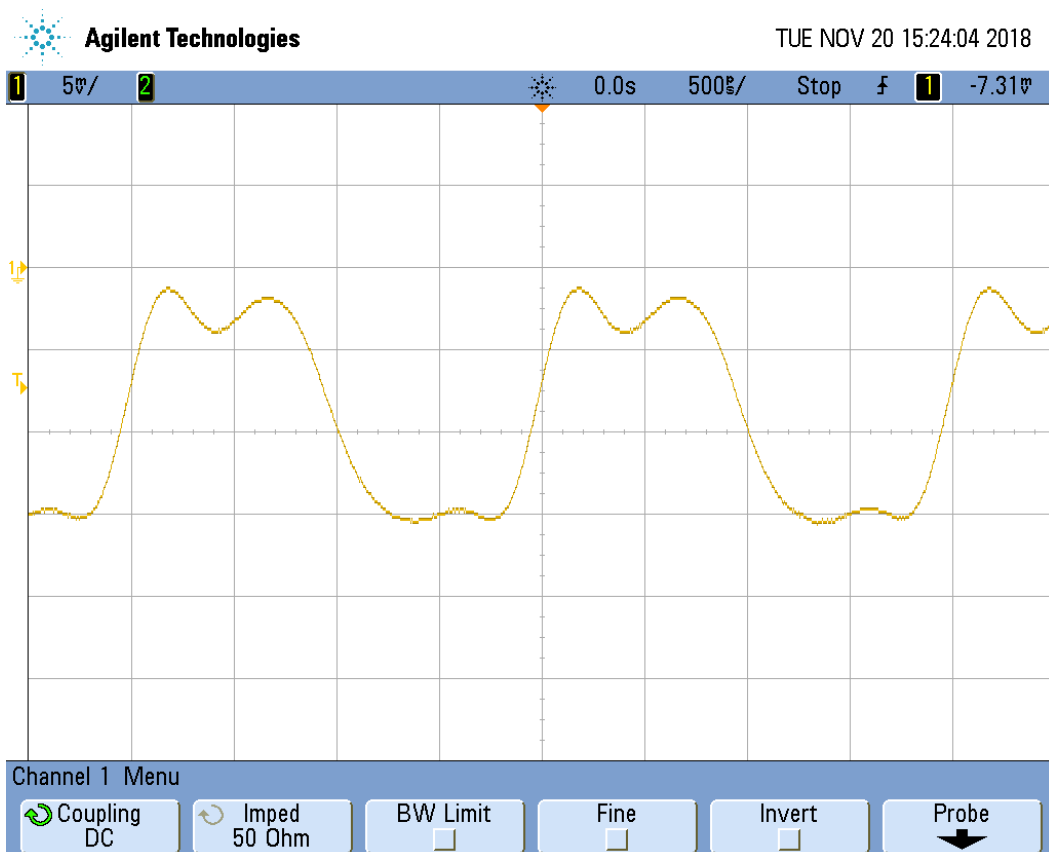
Осциллограммы амплитудно-манипулированных сигналов, прошедших умножитель частоты, фильтры и демодулятор, показаны на рис.4. Результаты данного эксперимента подтверждают возможность использования амплитудной манипуляции для построения систем терагерцовой связи.

Приемная антенна принимает сигнал 220 ГГц и передает его на входной субгармонический смеситель, на другой вход которого поступает сигнал от гетеродина 105 ГГц. С выхода смесителя сигнал ПЧ 10 ГГц усиливается и проходит демодуляцию. Расчеты показывают, что мощности на выходе передатчика в несколько сотен микроватт достаточно для передачи цифровых данных на расстояние до 1,5 км при коэффициенте усиления антенны не менее 50 дБ.

Одним из видов антенн, обеспечивающих такой высокий коэффициент усиления, является зеркальная антенна Кассегрена. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения, и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой размер, простота в изготовлении, при этом достигаются высокие значения коэффициента усиления и малые уровни боковых лепестков. Конструкция антенны представлена на рис. 5.



**Рисунок 3. Схема приемника:** 1 - субгармонический смеситель, 2 -умножитель частоты на 15, 3- генератор на диэлектрическом резонаторе (7 ГГц), 4- усилитель промежуточной частоты (УПЧ), 5 - демодулятор (амплитудная манипуляция), 6 - цифровой интерфейс до 1 ГГц/с



**Рисунок 4. Осциллограмма цифрового сигнала со скоростью передачи 1 Гбит/с, принятого быстродействующим детектором на выходе передатчика**

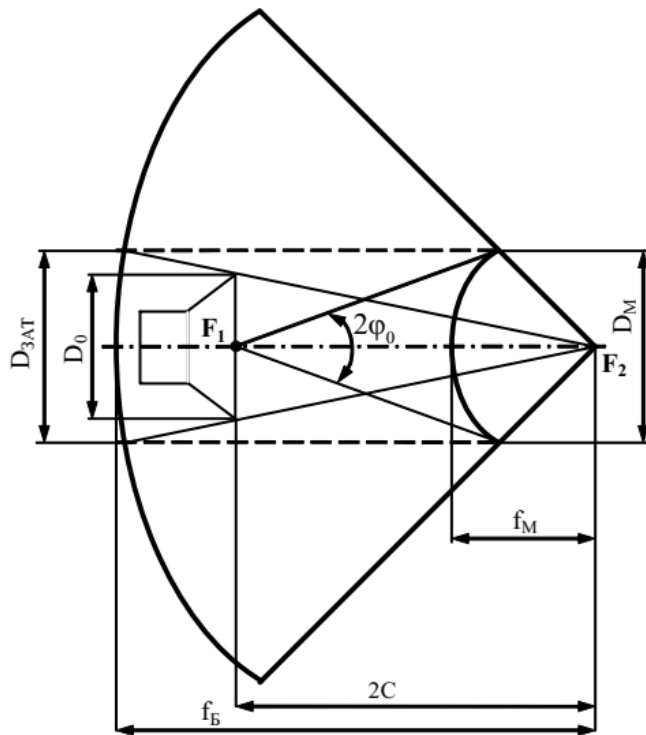


Рисунок 5. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена

Лучевой подход [6] позволяет в первом приближении найти основные параметры антенны:

- диаметр основного зеркала:

$$D_{\bar{\sigma}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_m}{v_{рез}}} \quad (1)$$

где  $v_{рез}$  – коэффициент использования поверхности (рекомендуемый 0,5...0,7),  $\lambda$ - длина волны,  $G_m$ - коэффициент усиления;

-фокусное расстояние:

$$f_{\bar{\sigma}} = (0,35..0,5) D_{\bar{\sigma}} \quad (2)$$

- половина угла раскрыва:

$$\psi_0 = 2 \arctg\left(\frac{D_{\bar{\sigma}}}{4f_{\bar{\sigma}}}\right) \quad (3)$$

-диаметр вспомогательного зеркала:

$$D_M = \sqrt{2\alpha\lambda f_{\bar{\sigma}}} \quad (4)$$

где  $\alpha$ - коэффициент, учитывающий амплитудное распределение поля враскрыве облучателя;

- эксцентриситет:

$$e_k = \frac{(4f_{\bar{\sigma}} + D_M)}{(4f_{\bar{\sigma}} - D_M)} \quad (5)$$

- половина угла раскрыва вспомогательного зеркала

$$\phi_0 = 2 \arctg\left[\left(\frac{\epsilon \chi - 1}{\epsilon \chi + 1}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\psi_0}{2}\right)\right] \quad (6)$$

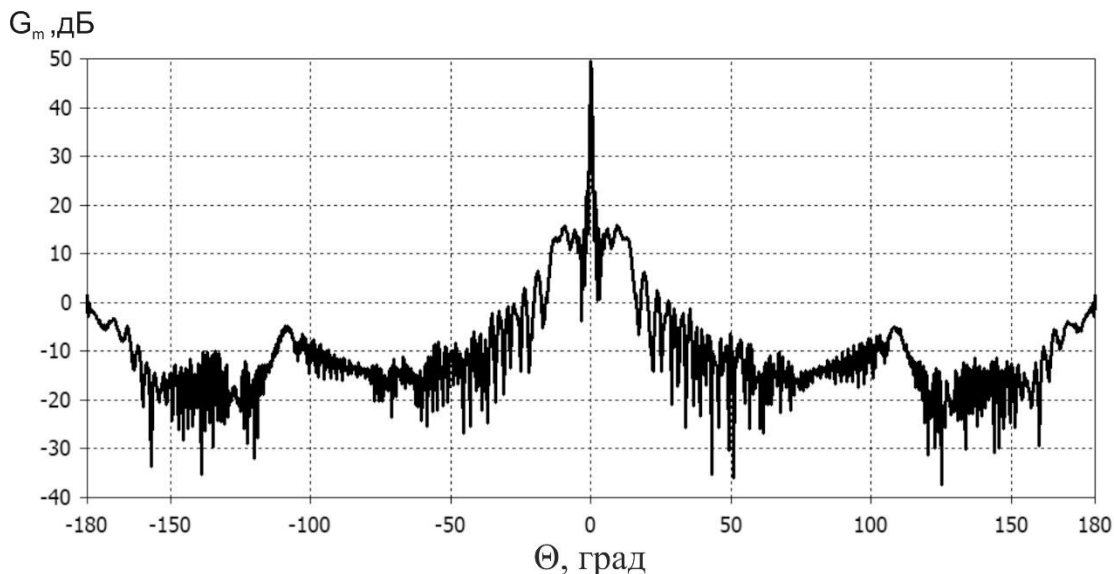
- расстояние между действительным и мнимым фокусами гиперболы

$$\phi_0 = 2 \arctg\left[\left(\frac{\epsilon \chi - 1}{\epsilon \chi + 1}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\psi_0}{2}\right)\right] \quad (7)$$

Рассчитанных параметров достаточно для построения модели антенны в системе автоматизированного проектирования (САПР) для точного расчета и анализа полученных характеристик.

Расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводился при помощи САПР с использованием метода интегральных уравнений, позволяющего выполнить расчет крупных (в длинах волн) структур.

На рис. 6 приведены результаты расчета диаграммы направленности (ДН) антенны Кассегрена.



**Рисунок 6. Диаграмма направленности антенны Кассегрена в E-плоскости**

Диаграмма направленности игловидной формы и полностью соответствует предъявляемым требованиям, при этом достигается хорошее согласование в полосе частот 219-221 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 1,3 в указанной полосе.

Дальнейшее развитие предложенной схемы предполагает применение усилителей в передатчике и приемнике для увеличения выходной мощности и уменьшения коэффициента шума приемника.

### Заключение

В работе представлен развитый авторами подход к созданию высокоскоростных беспроводных систем связи субТГц частотного диапазона на основе полупроводниковых приборов и фиксированных узконаправленных антенн. Представлен разработанный лабораторный макет широкополосного приемопередающего устройства субТГц частотного диапазона (200-220 ГГц). Приведены результаты предварительного тестирования лабораторного макета ши-

рокопосного приемопередающего устройства, показавшие возможность передачи цифровых сигналов со скоростью до 1 ГГб/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-19-01628).

### Библиографический список

1. Fitch M.J., Osiander R. Terahertz Waves for Communications and Sensing//Johns Hopkins APL Technical Digest, 2004, V. 25, N 4 p.348-355.
2. **Kallfass I., Antes J., Schneider T. et al.**All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz// IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 2011, V. 1, N 2, pp. 477–487.
3. **Song H. J., Ajito K., Muramoto Y., et al.**24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications// Electron. Lett., 2012, V. 48, pp. 953–954.
4. **Hirata A., Kosugi T., Takahashi H., et al.** 5.8-km 10-Gbps data transmission over a 120-GHz-band wireless link// 2010 IEEE Int. Wireless Inform. Technol. Syst. Conf.,2010, pp. 1–4
5. **Wang C., Lin C., Chen Q., et al.**A 10-Gbit/s Wireless Communication Link Using 16-QAM Modulation in 140-GHz Band// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, V.. 61, No. 7, p. 2737-2746,
6. **Заикин, И.П.** Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи / //Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. 90 с.

*V.V.Biryukov<sup>1</sup>, V.L.Vaks<sup>1,2</sup>, V.I. Kolchugin<sup>1</sup>, V.A.Malakhov<sup>1</sup>, A.N.Panin<sup>1,2</sup>, S.I.Pripolzin<sup>1,2</sup>, Yu.V. Raevskaya<sup>1</sup>, A.S. Raevsky<sup>1</sup>, V.V.Shcherbakov<sup>1</sup>*

### THE WIRELESS COMMUNICATIONS SYSTEMS IN SUBTERAHERTZ FREQUENCYRANGE

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603950, Nizhny Novgorod, <sup>2</sup> IPM RAS, 603950, Nizhny Novgorod, GSP-105

The subterahertz (subTHz) and terahertz (THz) frequency ranges are very promising for development of high speed wireless communications systems because of possibility to get the bandwidth about some tens of GHz, which provides the high channel capacity. However fast signal attenuation at its propagation in atmosphere complicate the operation of communications systems in these ranges. Use of fixed narrow-beam antennas with high antenna power gain allows to provide the direct surface communications distance to some kilometers. The communications distance limitation can be partially removed decreasing the frequency down to 200 GHz and narrowing the channel bandwidth down to some GHz. The model of transmitter-receiver system (200-220 GHz) based of modern semiconductor devices is described in the manuscript. The possibility of digital signals transmission with speed up to 1 GBit/s at the distance of 1 km is experimentally shown. According to calculations the output power of transmitter about some hundreds mW is enough for data transmission at the distance up to 1.5 km with antenna power gain of no less than 50 dB.

**Key words:** Subterahertz and terahertz frequency ranges, high speed wireless communications systems, wideband transmitter-receiver system, narrow-beam antenna, Cassegrain antenna

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород

Представлена экспериментальная установка, предназначенная для селективного возбуждения несобственных волн круглого открытого диэлектрического волновода. Приведены результаты моделирования исследуемой электродинамической структуры в САПР и результаты экспериментального исследования характеристик вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого диэлектрического волновода.

**Ключевые слова:** вытекающие волны, диэлектрический волновод, моделирование в САПР

### Введение

Круглый открытый диэлектрический волновод (ДВ) является одной из широко используемых открытых электродинамических направляющих структур СВЧ и КВЧ диапазонов волн. В большинстве работ, посвященных его исследованию, он рассматривался в основном как структура, направляющая поверхностные волны (основной тип волн, на которых осуществляется перенос энергии в ДВ), поля которых убывают в радиальном направлении [1]. Однако, в настоящее время проявляется значительный интерес к устройствам, работающим на вытекающих волнах [2-4].

Вытекающие волны – это быстрые волны, дисперсионные характеристики которых являются продолжениями характеристик поверхностных волн ДВ на частотах ниже критических. Вытекающие волны являются несобственными, они не удовлетворяют условию излучения и, поэтому, имеют нарастающее по радиальной координате поле [1].

Одной из проблем, стоящей перед исследователями, является проблема селективного возбуждения таких волн, так как они являются волнами высших типов и существуют совместно с поверхностными волнами, в частности, с основной волной  $HE_{11}$  круглого открытого ДВ. В данной работе представлена экспериментальная установка, предназначенная для возбуждения вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого ДВ, приведены результаты экспериментального исследования её характеристик и результаты моделирования исследуемой электродинамической структуры в САПР ANSYSHFSS.

### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 показана структурная схема экспериментальной установки, цифрами обозначены: 1 – персональный компьютер; 2 – векторный анализатор цепей OBZOR 804/1; 3 – исследуемая электродинамическая структура; 4 – держатель измерительного элемента с микрометром; 5 – петлевой зонд.

Для возбуждения вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого ДВ использовалась электродинамическая структура, показанная на рис. 1 в дополнительном окне, имеющая следующие составные части и параметры: 1 – металлический стержень длиной  $L_1 = 0,1$  м с радиусом  $a = 0,005$  м; 2 – круглый экранированный волновод длиной  $L_1 + L_2 = 0,15$  м с радиусом  $R = 0,03$  м; 3 – диэлектрический стержень длиной  $L_2 + L_3 = 0,24$  м с радиусом  $a = 0,005$  м (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2,1$ ).

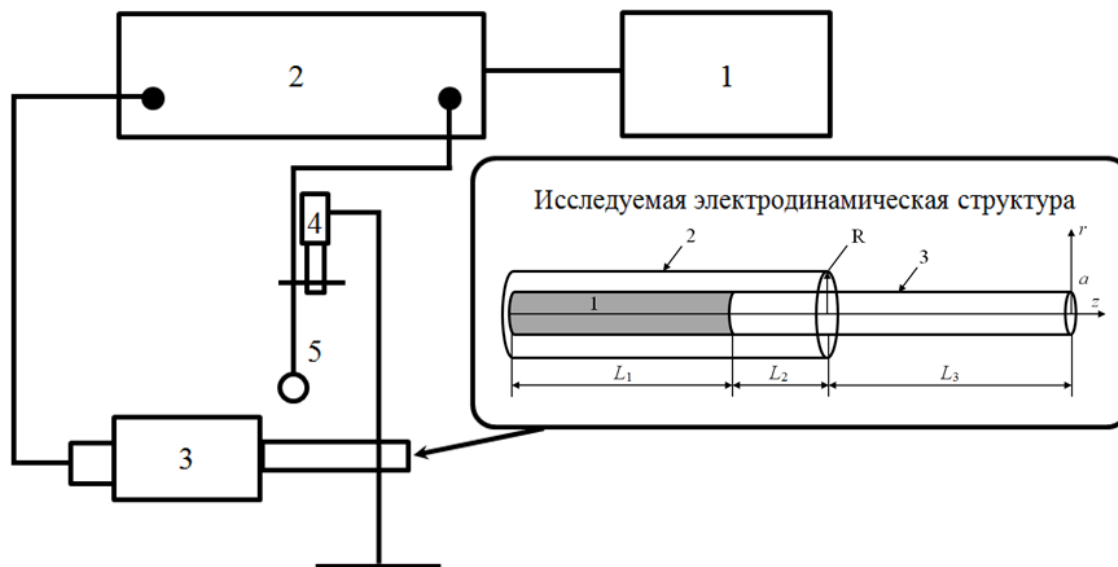


Рисунок 1. Структурная схема экспериментальной установки

В интервале  $L_1$  вдоль оси  $z$  электродинамическая структура представляет собой круглый коаксиальный волновод, в интервале  $L_2$  – круглый экранированный двухслойный волновод, а на участке  $L_3$  – круглый открытый ДВ.

Размеры элементов электродинамической структуры подобраны таким образом, чтобы в исследуемом частотном диапазоне (6 – 8 ГГц), выбор которого определяется используемым измерительным оборудованием, существовала вытекающая волна  $E_{01}$  круглого открытого ДВ, а влияние основной волны  $HE_{11}$  и других волн высших типов, также являющихся вытекающими, на структуру поля было минимальным: эффективный показатель преломления для волны  $HE_{11}$  примерно равен единице, и электродинамическая структура теряет направляющие свойства.

Для определения частотных диапазонов существования симметричной волны  $E_{01}$  круглого двухслойного экранированного волновода, поверхностной и вытекающей волны  $E_{01}$  круглого открытого ДВ, с использованием строгого электродинамического подхода, были решены дисперсионные задачи для круглого двухслойного экранированного волновода и круглого открытого ДВ[1].

Диапазон частот, в котором существует вытекающая волна круглого открытого ДВ – от 6 до 10 ГГц. Измерения проводились в диапазоне от 6 до 8 ГГц, так как верхний предел частотного диапазона определяется характеристиками анализатора цепей OBZOR 804/1.

В выбранном частотном диапазоне в круглом двухслойном экранированном волноводе могут существовать волны  $HE_{11}$ ,  $H_{01}$ ,  $E_{01}$ ,  $EH_{11}$ , в круглом открытом ДВ – волна  $HE_{11}$  и бесконечное множество несобственных волн, в том числе, вытекающая волна  $E_{01}$  (рис. 3). Исследуемая электродинамическая структура позволяет создать условия возбуждения, при кото-



рых в круглом открытом ДВ основной вклад в формирование суммарного электромагнитного поля будет вноситься вытекающей волной  $E_{01}$ .

### Моделирование в САПР

Модель исследуемой электродинамической структуры с учетом параметров составных частей была создана в САПР ANSYS HFSS (рис. 2) для дальнейшего расчета диаграмм направленности на различных частотах.

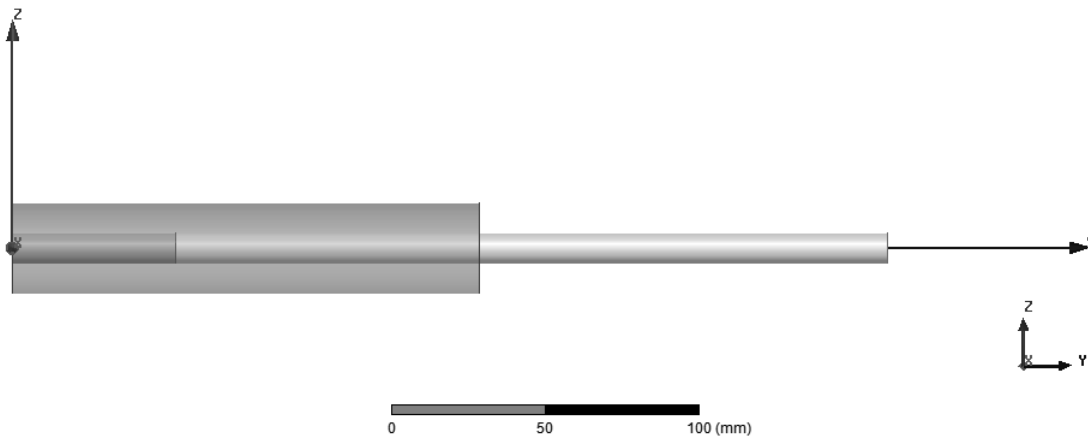


Рисунок 2. Модель исследуемой структуры в САПР

Полученные в ходе расчетов диаграммы направленности исследуемой электродинамической структуры, которую можно рассматривать как излучатель на вытекающей волне (на частоте 6,3 ГГц), приведены на рис.3-4.

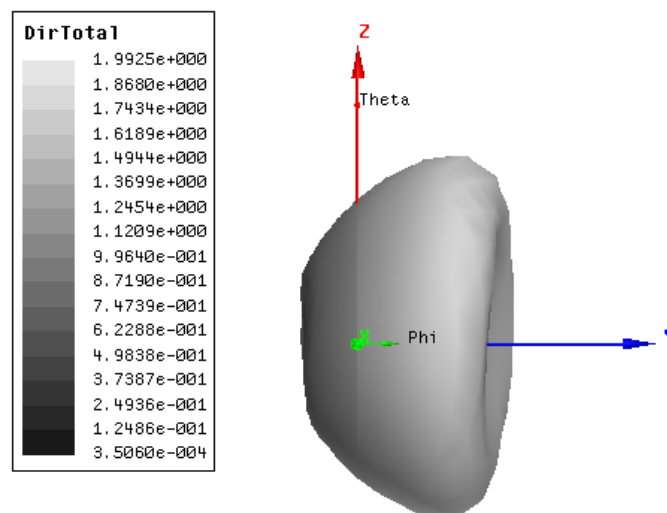
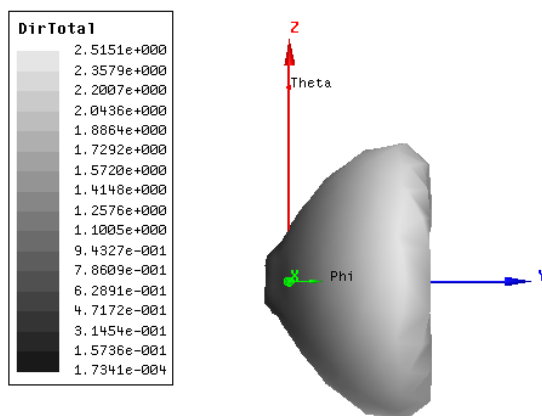


Рисунок 3. Диаграмма направленности исследуемой структуры на частоте 6,3 ГГц



**Рисунок 4. Диаграмма направленности исследуемой структуры на частоте 8 ГГц**

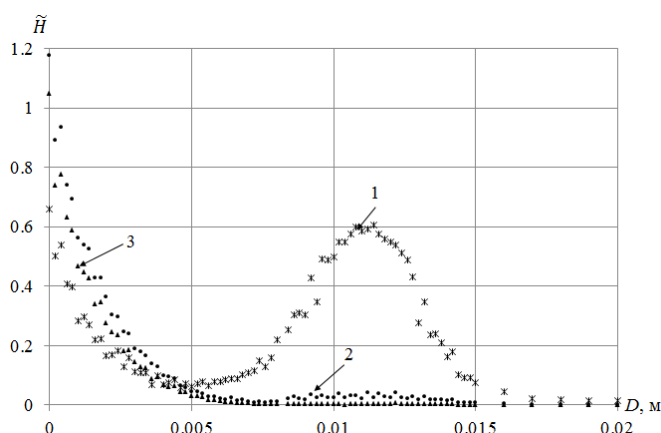
Из рисунков следует, что излучение на частоте 6,3 ГГц происходит как в продольном, так и в поперечном направлениях, а на большей частоте (8 ГГц) происходит в основном в поперечном направлении. Такое поведение определяется влиянием преимущественно вытекающей волны на структуру суммарного поля частоте 6,3 ГГц.

### **Результаты экспериментальных исследований**

Измерения характеристик вытекающих волн произведены при уровне мощности 1 мВт на входе коаксиального волновода, на расстоянии 3 мм от торца экранированного двухслойного волновода с помощью жесткого коаксиального кабеля с петлевым зондом. Коаксиальный кабель был закреплен на микрометре, с помощью которого осуществлялось перемещение петлевого зонда вдоль радиальной и продольной координат исследуемой структуры.

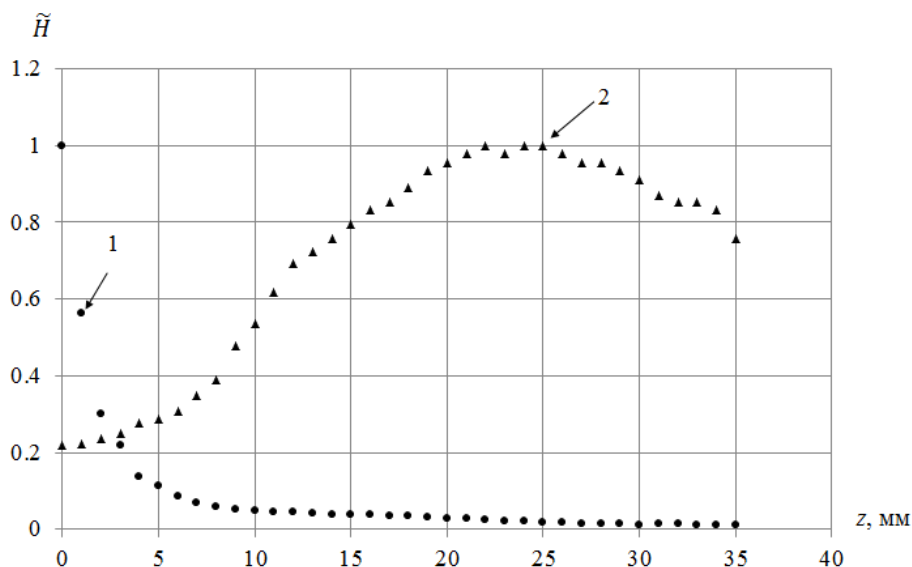
Результаты экспериментальных исследований влияния вытекающей волны  $E_{01}$  и основной волны  $HE_{11}$  на распределение суммарного поля приведены на рис.4–5.

На рис.5 приведены зависимости нормированной напряженности магнитного поля от радиальной координаты  $r$ , измеренные на различных частотах: 1 – 6,3 ГГц (круги), 2 – 7,5 ГГц (звезды), 3 – 8 ГГц (треугольники).



**Рисунок 5. Зависимость нормированной напряженности магнитного поля от радиальной координаты  $r$**

Из рис. 5 следует, что на частоте 6,3 ГГц структура суммарного поля определяется вытекающей волной  $E_{01}$ , так как наблюдается увеличение напряженности магнитного поля с увеличением расстояния от диэлектрического стержня вдоль радиальной координаты. Дальнейшее уменьшение напряженности магнитного поля с увеличением расстояния объясняется тем, что вытекание энергии происходит со стержня, имеющего конечную длину [5]. На больших частотах структура поля определяется поверхностной волной  $HE_{11}$ , так как происходит убывание поля вдоль радиальной координаты, что характерно для поверхностных волн. На рис.6 представлены зависимости нормированной напряженности магнитного поля от продольной координаты  $z$  на различных частотах: 1 – 6,3 ГГц (круги), 2 – 8 ГГц (треугольники).



**Рисунок 6. Зависимость нормированной напряженности магнитного поля от продольной координаты  $z$**

Из рис.6 следует, что на частоте 6,3 ГГц происходит уменьшение напряженности магнитного поля с увеличением  $z$ , что характерно для вытекающей волны (вследствие излучения энергии в поперечном направлении). На частоте 8 ГГц характеристика имеет максимумы и минимумы, что характерно для поверхностной волны, распространяющейся вдоль диэлектрического стержня и отражающейся от открытого конца в обратном направлении.

### Выводы

Результаты моделирования и экспериментальных исследований говорят о том, что на частоте 6,3 ГГц структура суммарного поля определяется вытекающей волной, а на больших частотах – поверхностной волной.

Кроме этого, были произведены измерения зависимости напряженности магнитного поля от угловой координаты на частоте 6,3 ГГц. Результаты исследований показали, что измеряемые напряженности при разных значениях угловой координаты численно совпадают. Следовательно, структура суммарного поля имеет симметричный характер, то есть определяется симметричной вытекающей волной  $E_{01}$  открытого ДВ.

Таким образом, моделирование исследуемой электродинамической структуры в САПР и проведенные экспериментальные исследования показали, что в рассматриваемой структуре на частоте 6,3 ГГц преимущественно возбуждается симметричная вытекающая волна  $E_{01}$ .

### Библиографический список

1. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 223 с.
2. **Fuscaldo, W.** Systematic design of thz leaky-wave antennas based on homogenized metasurfaces / W. Fuscaldo, S. Tofani, D. Zografopoulos, et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – V. 66 (3). – P. 1169-1178.
3. **Tierney, B.** Controlling leaky waves with 1-D cascaded metasurfaces / B. Tierney, A. Grbic // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – V. 66 (4). – P. 2143-2146.
4. **Sengupta, S.** Modal analysis and propagation characteristics of leaky-waves on a 2-D periodic leaky-wave antenna / S. Sengupta, D. Jackson, S. Long // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – V. 66 (3). – P. 1181-1191.
5. **Унгер, Х.Г.** Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.Г. Унгер. – М.: Мир, 1988. – 656 с.

**V.A. Malakhov, A.S. Nechaev**

### MODELING OF THE EXCITATION DEVICE OF A LEAKY WAVE OF A ROUND OPEN DIELECTRIC WAVEGUIDE

**Purpose:** Research of the electrodynamic structure for the selective excitation of a leaky wave of a round open dielectric waveguide.

**Design/methodology/approach:** The size of electrodynamic structure elements selected in such a way that in the researched frequency range the  $E_{01}$  leaky wave of a round open dielectric waveguide would exist and the influence of the  $HE_{11}$  main wave and the higher type waves on the electric field structure would be minimal.

**Findings:** Modeling of the researched electrodynamic structure in CAD and experimental studies have shown that in the structure under consideration at a frequency of 6.3 GHz the  $E_{01}$  symmetrical leaky wave is mostly excited.

**Research limitations/implications:** The presented research can help in the further creation of leaky wave antennas.

**Originality/value:** An experimental setup designed for the selective excitation of improper waves of a round open dielectric waveguide is presented.

**Key words:** leaky waves, dielectric waveguide, CAD modeling

Е.А. Михалицын

## О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ ЯВЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАЗБАЛАНСА МИКРОПОЛОСКОВОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МАРШАНДА

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,  
г. Нижний Новгород

Объектом исследования является микрополосковое симметрирующее устройство Маршанда. Статья посвящена математическому и феноменологическому описанию физической природы возникновения в таком СВЧ устройстве амплитудно-фазового разбаланса. Предложена методика экстракции ключевых параметров проектирования из данных моделирования в САПР. Даются рекомендации по топологическому проектированию симметрирующих устройств Маршанда с минимальными амплитудно-фазовыми ошибками.

**Ключевые слова:** симметрирующее устройство Маршанда, амплитудно-фазовый разбаланс, развязывающая цепь.

### Введение

Симметрирующее устройство (СУ) (на англ. «balun» – «balanced-unbalancedconverter») – пассивный элемент, осуществляющий преобразование небалансного сигнала на входе к двум противофазным балансным сигналам. Микрополосковые СУ Маршанда находят широкое применение в силу исключительных рабочих характеристик и простоты изготовления по гибридным [1] и микроэлектронным технологиям [2]. Добавка развязывающей цепи по выходам СУ Маршанда [3] позволяет осуществлять их согласование на заданную нагрузку и обеспечивает развязку. Такое устройство может найти применение в балансных усилителях мощности. Качество подавления четных гармоник определяется шириной полосы рабочих частот СУ и характеристиками амплитудно-фазового разбаланса. Нулевой амплитудный разбаланс и идеальный фазовый сдвиг на  $180^0$  для полностью симметричного СУ Маршанда с развязывающей цепью невозможно получить даже теоретически.

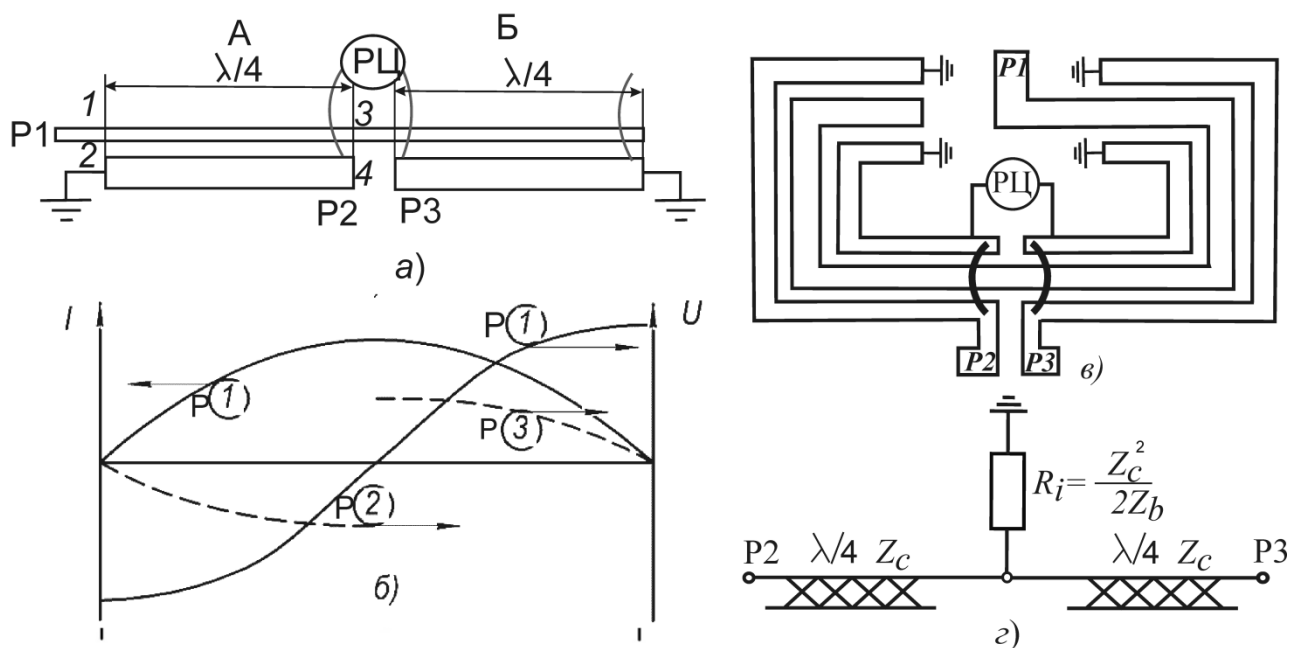
Цели настоящей работы заключаются в выявлении электродинамических свойств микрополоскового СУ Маршанда, оказывающих влияние на характеристики амплитудно-фазового разбаланса, и в формировании рекомендаций по топологическому проектированию.

### СУ Маршанда с развязывающей цепью. Феноменологическая модель

Блок схема топологии симметрирующего устройства Маршанда на двух ассиметричных связанных линиях показана на рис.1. На рисунке также показаны эпюры комплексных амплитуд волн тока и напряжения. СУ состоит из двух одинаковых секций связанных линий (А и Б), которые обеспечивают дифференциальный выходной сигнал. Феноменологически сдвиг фаз волн мощности на  $180^0$  образуется в результате того, что на первую и вторую секции связанных линий воздействуют волны входного напряжения противоположной полярности. Такая форма напряжения обусловлена режимом холостого хода на конце полуволновой входной (центральной) линии. Применение топологии с тремя, а не с двумя, как в традици-

онном варианте СУ Маршанда, связанных линий приводит к увеличению коэффициента связи и расширению полосы рабочих частот (рис.1, в).

Классическое СУ Маршанда невозможно согласовать на любые заданные нагрузки по всем портам. Введение в схему развязывающей цепи (РЦ) с активными потерями позволяет устранить указанный недостаток. При этом может быть достигнута развязка по выходам более 10-15 дБ. Развязка выходов улучшает стабильность балансных усилителей мощности. В качестве развязывающей цепи удобно выбрать схему рис.1, г. Габариты устройства могут быть уменьшены с переходом к свернутой топологии СУ рис.1, в. При этом влияние поворотов на характеристики амплитудно-фазового разбаланса требует отдельного рассмотрения.



**Рисунок 1.** СУ Маршанда: а – блок схема, б – эпюры распределения волн тока и напряжений на входной (P1) и выходных (P2, P3) линиях, в – Ω-образная свернутая топология, г – Т-образная схема РЦ

### Физическая и математическая модель СУ Маршанда

Математически амплитудно-фазовый разбаланс СУ Маршанда рис.1, а определяется отклонением разности фаз относительно  $90^0$  для сигналов на выходах 2 и 3 одной секции связанных линий (рис 1, а). Наилучшие характеристики достигаются при равенстве индуктивного и емкостного коэффициентов связи [4]. Строгое равенство для микрополосковых структур труднодостижимо без привлечения дополнительных диэлектрических элементов над связанными линиями, но может быть выполнено приближенно с малым значением разности  $|kL-kC| < 0.1$ . При малых отличиях коэффициентов связи связанных линий возможно введение корректирующих цепей, равномерно распределенных по их длине [5]. Такой метод идеализации характеристик направленных ответвителей весьма эффективен, но требует специальных программных продуктов для детального расчета топологии. Применение секций на трех асимметричных связанных линиях, как показывает расчет, позволяет сделать величину неуравновешенности связи меньше, чем для двойных связанных линий.

В [6] показано, что для асимметричных связанных линий (рис. 1, секция А) смалой неуравновешенностью электромагнитной связью, и согласованием по всем портам на терминальные нагрузки  $Z_1$  и  $Z_2$ , равные собственным волновым сопротивлениям соответствующих линий, матрица рассеяния на центральной частоте задается в форме:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & k & \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-j\pi(u+1)/2} & 0 \\ \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-j\pi(u+1)/2} & 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-j\pi(u+1)/2} \\ 0 & \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-j\pi(u+1)/2} & k & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $\theta = \frac{\theta_c + \theta_\pi}{2}$  – эффективная электрическая длина связанных линий,  $u = \frac{v_\pi - v_c}{v_\pi + v_c}$  – относительная разность фазовых скоростей собственных с- и  $\pi$ -мод,  $k = 2\sqrt{R_c R_\pi} / (R_c + R_\pi)$  – эффективный коэффициент связи, является действительной величиной при  $\text{Im}[(R_c R_\pi)^{0.5}] = 0$ , где  $R_c, R_\pi$  – отношения напряжений на второй и первой связанных линиях для соответствующих собственных возбуждений.

Обе собственные волны с- и  $\pi$ - типа в частном случае уравновешенной электромагнитной связи характеризуются синфазными напряжениями и противофазными токами. Мощность при каждом собственном возбуждении протекает по проводникам в противоположных направлениях. Эти свойства специфически выделяют такую систему топологических параметров связанных линий из общего случая асимметричных связанных линий и случая симметричных линий. Так, например, для симметричных линий четная мода характеризуется и синфазными напряжениями, и синфазными токами, нечетная – противофазными напряжениями и противофазными токами. Область параметров модели, в которой выполняется условие  $\text{Im}(R_c R_\pi) = 0$ , может быть небольшой, поскольку в окрестности  $k_c = k_L$  постоянные пространства быстро меняются, и значительно меняется структура поля собственных волн. Обеспечение неравенства  $R_c R_\pi > 0$  в инженерных расчетах может служить критерием выполнения условия  $k_c \approx k_L$ . Известно, что  $R_c R_\pi = -Z_{c2} / Z_{c1} = -Z_{\pi2} / Z_{\pi1}$  [4, формула 4.65] и, следовательно, при уравновешенной электромагнитной связи одно из сопротивлений в парах  $Z_{c2}, Z_{c1}$  и  $Z_{\pi2}, Z_{\pi1}$  отрицательно, что математически определяет синфазность напряжений и противофазность токов.

Физически условие равенства фазовых скоростей четной (+1,+1) и нечетной (+1,-1) мод для симметричных связанных линий означает, что при возбуждении первого порта секции А на рис.1а на выходы 3 и 4 четная и нечетная волны приходят одновременно. В результате на 3 порте они складываются (есть также запаздывание на  $\pi/2$ ), а на 4 порте вычитаются, и порт 4 является развязанным.

С учетом (1) коэффициенты передачи СУ Маршанда определяются в виде:

$$S_{21} = \frac{k\sqrt{1-k^2} \cdot e^{j\pi(u-1)/2}}{1+k^2} (1+k^2 + (1-k^2)e^{-j2\pi u}), \quad (2)$$

$$S_{31} = \frac{2k\sqrt{1-k^2} \cdot e^{-j\pi(u-1)/2}}{1+k^2};$$

Анализ соотношений (2) показывает, что при  $u=0$  сдвиг фаз равен  $180^\circ$  и разница амплитуд 0 дБ. Параметр  $u$  полностью определяет амплитудно-фазовый разбаланс:

$$\angle S_{21} - \angle S_{31} - \pi = \pi u - \arctg[(1-k^2) \sin(2\pi u) / (1+k^2 + (1-k^2) \cos(2\pi u))], \quad (3a)$$

$$|S_{21}| / |S_{31}| = \sqrt{[1+k^4 + (1-k^4) \cos(2\pi u)] / 2}. \quad (3b)$$

Из выражения (2) для  $|S_{31}|=s$  имеем:

$$k = \sqrt{\frac{2 - s^2 \pm 2\sqrt{1 - 2s^2}}{4 + s^2}}. \quad (4)$$

Тогда из (3б), если задаться  $|S_{21}|/|S_{31}|=dA$ , то

$$u = \frac{1}{2\pi} \arccos \left[ \frac{2dA^2 - 1 - k^4}{1 - k^4} \right]. \quad (5)$$

Таким образом, эквивалентные параметры СУ Маршанда:  $k$  и  $u$ , могут быть получены в результате экстракции из данных моделирования или эксперимента согласно (4) и (5). Активные потери при оценке величины  $s$  необходимо исключать. В выражении (4) знак выбирается с учетом предварительного расчета топологии. Корректность результатов экстракции определяется соответствием (3а).

### Результаты моделирования и расчета

Ключевые параметры проектирования связанных линий  $k$  и  $u$  получены на основе прямого расчета погонных параметров по приближенной методике [7] и на основе данных моделирования в САПР Sonnet. Для структуры на трех связанных линиях на подложке из поликора с толщиной  $h=1$  мм, шириной внутреннего проводника  $w_1=0.1$  мм и зазором  $s=0.05$  мм графики зависимости параметра  $u$  и мнимой части  $[(R_c R_\pi)^{0.5}]$  от ширины внешней микрополосковой линии  $w_2$  представлен на рис.2, где минимальное значение  $u=0.006$  достигается при  $w_2 \approx 0.3$  мм и, как показывает расчет по инженерной методике [7], величина коэффициента связи  $k=0.83$ . Результаты моделирования топологии в Sonnet:  $u=0.05$ ,  $\Delta k=0.007$ ,  $k=0.72$ ,  $Z_1=71.1$  Ом,  $Z_2=42.5$  Ом,  $Z_c=127.4$  Ом,  $Z_\pi=22.5$  Ом. Результат экстракции ключевых параметров проектирования из данных моделирования в САПР по формулам (4) и (5) следующий:  $k=0.72$ ,  $u=0.029$ , что полностью согласуется с расчетом ключевых параметров по определению из данных моделирования.

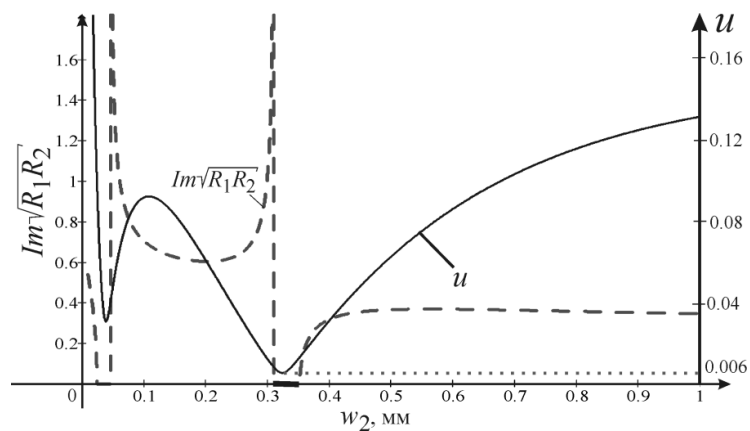
Свернутая топология СУ Маршанда с РЦ показана на рис.3. Для прямого поворота без соблюдения величины зазора и ширины линий в месте перегиба имеет место увеличение погонной емкости на землю и уменьшение погонной емкости связи. Это уменьшает коэффициент связи. То есть возникает неоднородность с другим значением параметра неуравновешенности электромагнитной связи и другими рассеивающими свойствами (для выбранной топологии расчетные значения  $u=0.024$ ,  $k=0.76$ ,  $\Delta k=0.009$ ). Помимо этого, присутствует паразитная емкость между смежными участками Г-образного поворота. С помощью моделирования в САПР Sonnet было выявлено, что негативное влияние поворота связанных линий на амплитудно-фазовую характеристику можно скомпенсировать изменением размера  $L$  и диаметра переходного заземляющего отверстия. Указанные параметры не влияют на другие характеристики.

Применение плавного поворота с соблюдением геометрии поперечного сечения связанных линий не избавляет от паразитной емкости между близко расположенными участками связанных линий в окрестности области поворота.

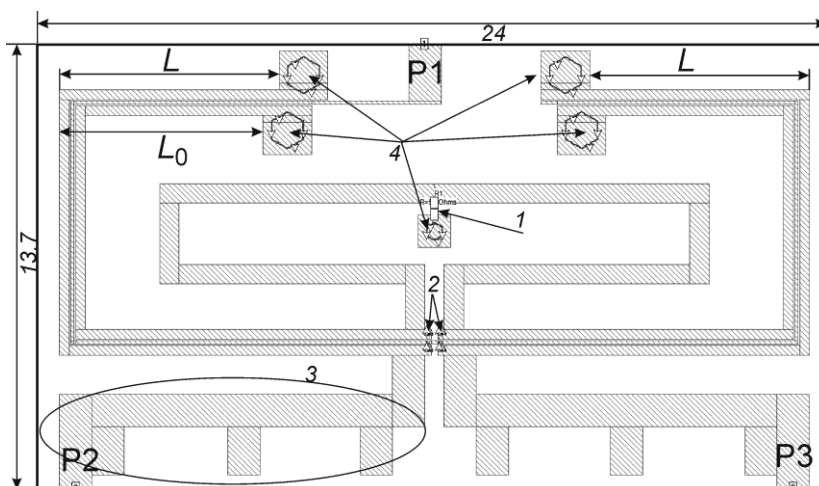
На рис.4 представлены результаты моделирования трех топологий СУ Маршанда: 1) – несвернутая топология без РЦ, 2) – несвернутая топология с РЦ, 3) – свернутая топология с РЦ



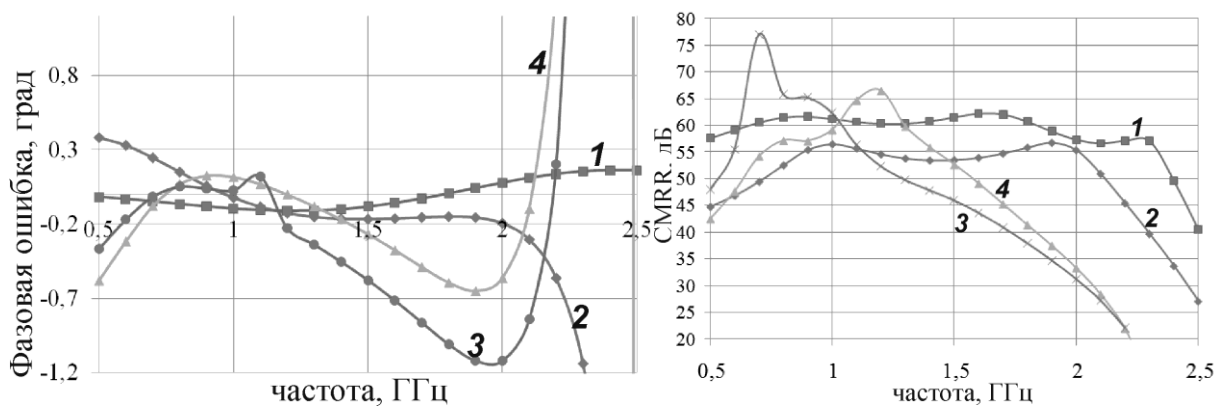
и неоптимизированным значением  $L < L_0$ , 4) – оптимизированная свернутая топология с  $RЦ > L_0$ . Диапазон рабочих частот, в котором проводилась оптимизация 0,9-1,6 ГГц,  $(L+L_0)/2 = \text{const}$ .



**Рисунок 2. Графические зависимости ключевых параметров проектирования топологии связанных линий**

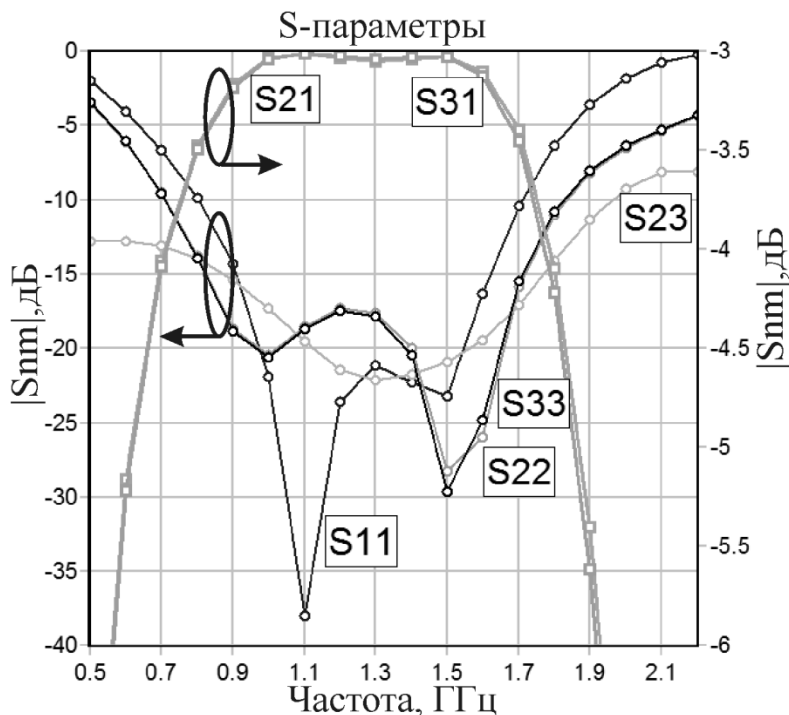


**Рисунок 3. Топология СВ Маршанда с РЦ: 1 – резистор РЦ, 2 – проволочные перемычки, 3 – согласующий четвертьволновой трансформатор, 4 – заземляющие отверстия**



**Рисунок 4. Частотная зависимость фазовой ошибки (а) и уровня синфазной составляющей (б)**

Как следует из представленных данных на рис. 4, наиболее широкая полоса с малым уровнем фазовой ошибки, не более 0,4 град, и уровнем подавления синфазной составляющей  $CMRR=20\lg|(S_{21}-S_{31})/(S_{21}+S_{31})|$  более 55 дБ имеет место для несвернутой топологии без РЦ. Переход от несвернутой к свернутой топологии с РЦ существенно сужает полосу по заданному уровню CMRR, но позволяет достичь более высоких пиковых значений. Оптимизированное значение размера L позволяет максимизировать полосу. На рис. 5 представлены характеристики частотной зависимости модулей S-параметров оптимизированной топологии СУ Маршанда с РЦ. В выбранном частотном диапазоне уровень возвратных потерь и развязок не хуже 15 дБ.



**Рисунок 5. Амплитудно-частотные характеристики передачи и отражения свернутой оптимизированной топологии СУ Маршанда с РЦ**

### Выводы

В заключение можно сформулировать следующие рекомендации по проектированию СУ Маршанда с жесткими требованиями к амплитудно-фазовому разбалансу, например, в случае применения в балансных усилителях мощности с необходимостью подавления второй гармоники:

- емкостной и индуктивный коэффициенты связи должны быть приближенно равными;
- относительную разность фазовых скоростей собственных волн структуры связанных линий следует выбирать минимально возможной;
- элементы развязывающей цепи необходимо размещать как можно дальше от структуры связанных линий;
- при переходе к свернутой топологии СУ Маршанда ухудшение амплитудно-фазового разбаланса возможно компенсировать изменением геометрии заземления внешней микрополосковой линии.

### **Библиографический список**

1. C. M. Montiel. Folded Planar Marchand Balun With Improved Isolation for Radio Frequency Automated Test Equipment Applications // 80th ARFTG Microwave Measurement Symposium, Automatic RF Techniques Group, San Diego, California, Nov. 27-30, 2012.
2. S. Chakraborty, L. E. Milner, A. Parker, M. Heimlich. A Folded Edge-coupled Transformer Balun in GaAs with Excellent Balance from 9 to 20 GHz // 978-2-87487-051-4 © 2018 EuMA 25–27 Sept 2018, Madrid, Spain. pp.1101-1104.
3. H. Ahn, T. Itoh. New Isolation Circuits of Compact Impedance-Transforming 3-dB Baluns for Theoretically Perfect Isolation and Matching // IEEE Transactions on MTT, 2010, Vol. 58, No. 12, pp.3892-3902.
4. R. K. Mongia I. J. Bahl P. Bhartia J. Hong «RF and Microwave Coupled-Line Circuits» Second Edition 2007 Artech House inc., 574 p.
5. S. Gruszczynski, K. Wincza. Generalized Methods for the Design of Quasi-Ideal Symmetric and Asymmetric Coupled-Line Sections and Directional Couplers // IEEE Transactions on MTT, Vol. 59, No. 7, July 2011. pp.1709-1718.
6. Sachse, K., The Scattering Parameters and Directional Coupler Analysis of Characteristically Terminated Asymmetric Coupled Transmission Lines in an Inhomogeneous Medium, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-38, April 1990, pp. 417–425.
7. Ikalainen, P. K., and G. L. Matthaei. Wideband, Forward-Coupling Microstrip Hybrids with High Directivity / IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-35, August 1987, pp. 719–725.

**E.A. Mihalitsyn**

### **PHYSICS OF PLANAR MARCHAND BALUN'S AMPLITUDE AND PHASE IMBALANCE**

Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics» «Federal Research and Production Center Scientific-Research Institute of Measuring Systems named after Yu.E. Sedakov»

*Nizhny Novgorod*

The research object is a microstrip Marchand balun. The article is concerned to mathematical and phenomenological description of physics of amplitude and phase imbalance in such devices. The extraction method of key design parameters from CAD simulation results is proposed here. The recommendations to concern topology design of Marchand balun being characterized with minimum amplitude and phase imbalance are demonstrated in the article.

**Key words:** Marchand balun, amplitude and phase imbalance, isolation circuit.

К.В. Муравьева, Р.В. Соколовская

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ ВИЛКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С НИЗКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
г. Нижний Новгород

В работе рассмотрены результаты исследования технологии изготовления изоляторов из керамического материала с низким значением диэлектрической проницаемости. Внедрение технологии изготовления изоляторов металлокерамической вилки из материала кордиеритового состава для работы в составе антенно-фидерных систем в диапазоне частот 10 ГГц и выше. Стабильность диэлектрической проницаемости позволяет создавать условия повторяемости выходных электрических характеристик сверхвысокочастотных устройств.

**Ключевые слова:** керамика кордиеритового состава; сверхвысокочастотные устройства; электрофизические параметры; антенно-фидерные системы.

Область применения радиоэлектронных средств непрерывно расширяется, комплексы радиосистем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона становятся все более сложными. Условия эксплуатации диэлектрических материалов определяются эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к радиоэлектронной аппаратуре. Металлокерамические СВЧ-соединители (вводы, вилки) предназначены для работы в составе антенно-фидерных систем (АФС) для согласования трактов в диапазоне частот 10 ГГц и выше. Стабильность диэлектрической проницаемости создает условия повторяемости выходных электрических характеристик СВЧ устройств. Так, для устройств, работающих в диапазоне выше 10 ГГц необходимо использовать диэлектрические материалы с относительной диэлектрической проницаемостью менее 7,0, что позволяет снизить величину волнового сопротивления, коэффициента затухания сигнала и коэффициента стоячей волны (КСВ).

Новые составы керамических материалов, используемые для изготовления диэлектрических изоляторов, по своим электрофизическим свойствам существенно отличаются от прежних составов, в том числе и от лучших сортов электровакуумных стекол. Основными преимуществами этих материалов являются: низкие диэлектрические потери при высокой температуре; относительно высокие значения механической и электрической прочности, термостойкости; вакуумная плотность при толщине изолятора 0,25-0,3 мм; способность образовывать вакуум-плотные соединения с различными металлами [1].

До настоящего времени в производстве при изготовлении герметичных СВЧ-соединителей конструктивно было невозможно получить у соединителя значение волнового сопротивления 50 Ом, используя стеатитовую керамику с диэлектрической проницаемостью 7,0. Реально значение волнового сопротивления составляло 35 Ом, что существенно ухудшало согласование в тракте «блок ВЧ – АФС». Для получения соединителя с волновым сопротивлением близким к 50 Ом, для изготовления изолятора следует использовать

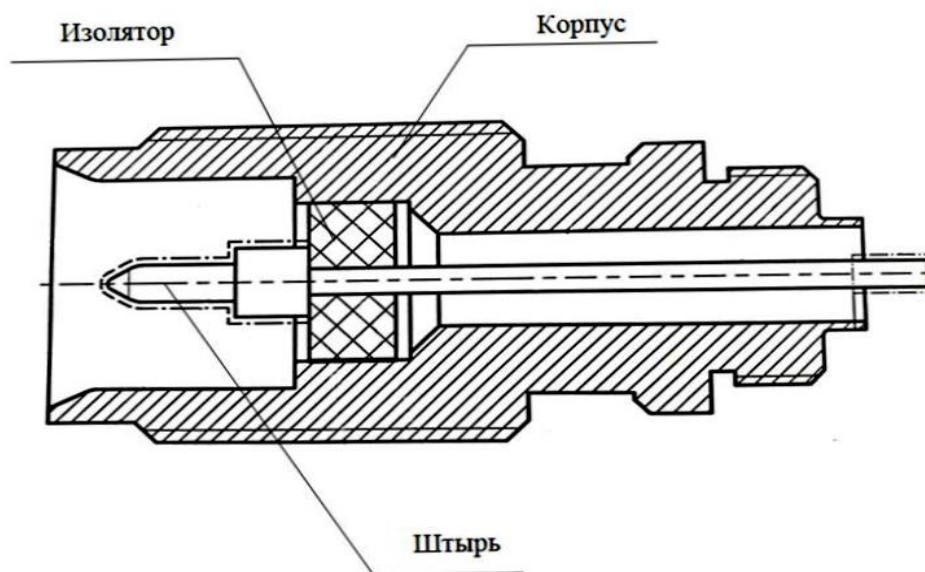
керамический материал, имеющий диэлектрическую проницаемость менее 5 и пригодный для вакуумной пайки.

Для выполнения научно-исследовательской работы в филиале «РФЯЦ-ВНИИИЭФ» «НИИИС им. Седакова» был поставлен ряд задач:

- отработать режимы изготовления изоляторов из керамического материала с низким значением диэлектрической проницаемости;
- изготовить образцы и проконтролировать электрофизические параметры экспериментальной партии материала с низким значением диэлектрической проницаемости;
- исследовать технологию вакуумной пайки металлокерамической вилки с использованием изолятора с низким значением диэлектрической проницаемости;
- разработать маршрут изготовления металлокерамической вилки;
- изготовить экспериментальную партию образцов металлокерамической вилки и измерить параметры.

Металлокерамическая вилка (рис. 1) должна удовлетворять следующим техническим требованиям:

- показатель герметичности по скорости натекания гелия должен составлять не более  $1 \cdot 10^{-5}$  л·мкм рт.ст./с;
- сопротивление изоляции между корпусом и контактом должно быть не менее 50 МОм при постоянном напряжении 500 В.



**Рисунок 1. Эскиз металлокерамической вилки**

В ходе мониторинга отечественных производителей керамических материалов установлен керамический материал «Кордиерит» по ОСТ 11 0309 – 86 [2], изготавливаемый предприятием ООО «Керамика» (г. С-Петербург), который в дальнейшем использовался для проведения экспериментальных работ.

Основными параметрами керамического порошка, оказывающими существенное влияние на процесс изготовления изоляторов вне зависимости от технологии изготовления (горячее литье под давлением или прессование), являются чистота исходного сырья, микроструктура и гранулометрический состав порошка, величина удельной поверхности.

Значение удельной поверхности  $S_{уд}$  исходного керамического порошка с условным названием «Кордиерит» после сушки и просева составляло  $14900 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Экспериментально установлено, что удельная поверхность исходного керамического порошка для изготовления качественного пресс-порошка или шликера при изготовлении керамических изоляторов должна составлять от  $7000$  до  $10000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Для снижения величины удельной поверхности керамического материала «Кордиерит» до требуемого значения выполнено «огрубливание» (термообработка порошка при температуре  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $4 \text{ ч}$ ) порошка.

Первоначально отработка технологии изготовления изолятора из керамического материала «Кордиерит» выполнялась методом полусухого прессования. Прессование заготовок и образцов-свидетелей выполнялось на гидравлическом прессе. Расчет рабочего усилия прессования  $P$  производился по формуле:

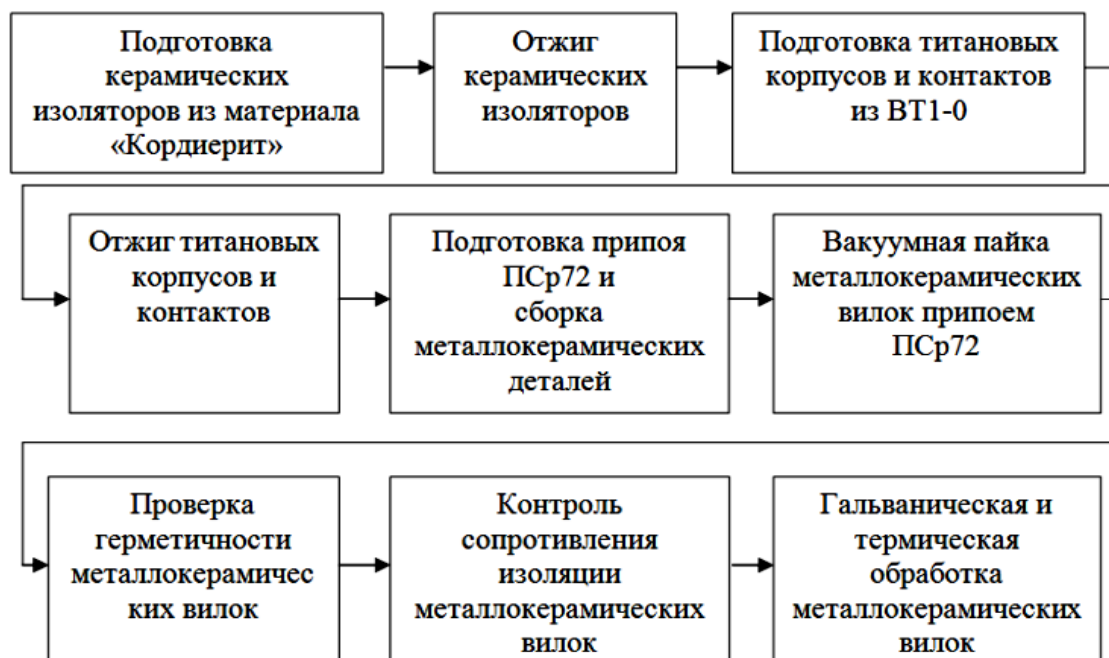
$$P = S \cdot P_{уд}, \quad (1)$$

где  $P_{уд}$  - удельное давление прессования,  $\text{т}/\text{см}^2$ ;  $S$  - площадь заготовки,  $\text{см}^2$ .

В данной работе удельное давление составляло  $1,5 \text{ т}/\text{см}^2$ .

При рассчитанном усилии прессования наблюдалась перепрессовка заготовок с частичным разрушением при извлечении из пресс-формы. При снижении удельного давления до  $P_{уд} = 1,0 \text{ т}/\text{см}^2$  и последующем прессовании на рассчитанном усилии прослеживалась плотная упаковка частиц с равномерной структурой заготовки изоляторов. Для заготовок изоляторов применялось одностороннее прессование.

На рис. 2 приведена схема технологического маршрута изготовления металлокерамической вилки с использованием изоляторов из керамического материала «Кордиерит».



**Рисунок 2. Технологический маршрут изготовления металлокерамической вилки с изолятором из материала «Кордиерит»**

Вакуумная пайка проводилась припоем ПСр 72 при температуре 820 °С. Время выдержки на конечной температуре составляло 1 минуту.

В результате установлено, что метод высокотемпературной вакуумной пайки обеспечивает получение качественных паяных соединений. Степень герметичности изготовленных металлокерамических вилок по потоку гелия составила не более  $1 \cdot 10^{-5}$  л.мкм.рт.ст./с., что соответствует установленным требованиям.

Величина сопротивления изоляции между корпусом и контактом металлокерамических вилок составила около 1000 МОм, что существенно превышает требования – не менее 50 МОм. Визуальный контроль качества паяного шва партии металлокерамических вилок с изолятором из материала «Кордиерит» показал на полное соответствие предъявляемым требованиям. Для выявления скрытых дефектов паяных соединений металлокерамических вилок проведен рентгеновский контроль.

Дополнительно специалистами выполнен расчет и сравнение волнового сопротивления и КСВ металлокерамических вилок при использовании изоляторов из различных керамических материалов. Расчетные значения волнового сопротивления  $Z$  вилки (соотношение размеров коаксиального тракта  $D/d = 6$ , где  $D$  – наружный диаметр изолятора;  $d$  - внутренний диаметр изолятора):

для керамики ВК-94 ( $\epsilon=10,3$ ) -	33,5 Ом
для стеатитовой керамики ( $\epsilon =7,0$ ) -	40,6 Ом
для кордиеритовой керамики ( $\epsilon =4,8$ ) -	49,1 Ом.

Значение волнового сопротивление СВЧ-соединителя волноводного тракта должно быть близким к 50 Ом.

Теоретическое (идеализированное) значение КСВ, вычисленное по отражению в коаксиальной линии от скачка волнового сопротивления, образованного соединителем с волновым сопротивлением  $Z$ :

для керамики ВК-94 ( $\epsilon =10,3$ ) -	1,5
для стеатитовой керамики ( $\epsilon =7,0$ ) -	1,25
для кордиеритовой керамики ( $\epsilon =4,8$ ) -	1,02

### Выводы

Разработанная технология изготовления металлокерамической вилки с применением керамики с диэлектрической проницаемостью менее 5 полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к изделиям данного вида.

Стабильность диэлектрической проницаемости изолятора из керамического материала «Кордиерит» металлокерамической вилки позволяет создавать условия повторяемости (согласование в тракте «блок ВЧ – АФС») выходных электрических характеристик сверхвысокочастотных устройств.

### Библиографический список

1. Кулик, В.И. Пайка металлокерамических узлов / В.И. Кулик, В.В. Степанов, Л.Л. Благутина, С.Е. Цветков // ФГУП «НПО «Техномаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [ritm-magazine.ru](http://ritm-magazine.ru) / (дата обращения 20.03.2019).
2. ОСТ 11 0309–86. Материалы керамические для изделий электронной техники – введ. 1987-01-01. - М.: Научно-исследовательский институт «Гирikonд», 1986.

**K.V. Muravyova, R.V Sokolovskaya**

**INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGY OF MAKING CERAMIC METAL  
FORK INSULATORS FROM CERAMIC MATERIAL  
WITH LOW PERMITTIVITY VALUE**

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov”, Nizhny Novgorod

The results of research of technology of making insulators from ceramic material with low value of dielectric constant are considered. Implementation of the technology of making metal ceramic fork insulators from material of cordierite composition for operation as part of antenna-feeder systems in the frequency range of 10 GHz and higher. Stability of dielectric constant makes it possible to create conditions of repeatability of output electric characteristics of ultra-high-frequency devices.

**Keywords:** ceramics of cordierite composition, microwave devices, electrophysical parameters, antenna-feeder systems.



## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ УСТРОЙСТВ С ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ

<sup>1</sup>Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова,

<sup>2</sup>Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Н. Новгород

В работе исследуется влияние шероховатости поверхности подложек на стабильность параметров высокоомных тонкопленочных резистивных элементов. Определена шероховатость поверхности подложек методами оптической и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Разработана технология получения сглаживающего поверхность покрытия на основе тонких пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с аморфной когерентной структурой, применение которого уменьшает высоту микронеровностей профиля поверхности R<sub>z</sub> до значений 12 нм и менее. Покрытие позволяет формировать на его поверхности тонкие наноразмерные пленки, снижает температурный коэффициент сопротивления ~ в 2 раза и повышает стабильность тонкопленочных резисторов.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, микрошероховатость поверхности, тонкие наноразмерные пленки, тонкопленочные резистивные элементы

Прогресс современной микроэлектроники во многом определяется развитием тонкопленочных технологий, позволяющих формировать новые структуры с уникальными свойствами для создания СВЧ устройств.

Состояние поверхности подложки оказывает существенное влияние на структуру наносимых пленок и параметры тонкопленочных элементов. Большая шероховатость поверхности подложки уменьшают толщину тонких пленок, что тем самым вызывает локальное изменение электрофизических свойств пленок и снижение воспроизводимости параметров тонкопленочных элементов и их надежность [1, 2].

При формировании тонкопленочных резистивных пленок толщиной менее 30 нм поверхность подложек должна соответствовать как минимум 14-му классу чистоты поверхности, то есть допустимая высота микронеровностей не должна превышать 20 нм, что не всегда реализуется, вследствие наличия пор и царапин, которые снижают показатели шероховатости.

С целью минимизации высоты и сглаживания краев микронеровностей целесообразно нанесение грунтующего слоя из материала, обладающего хорошими диэлектрическими и адгезионными свойствами, а также однородной структурой [3].

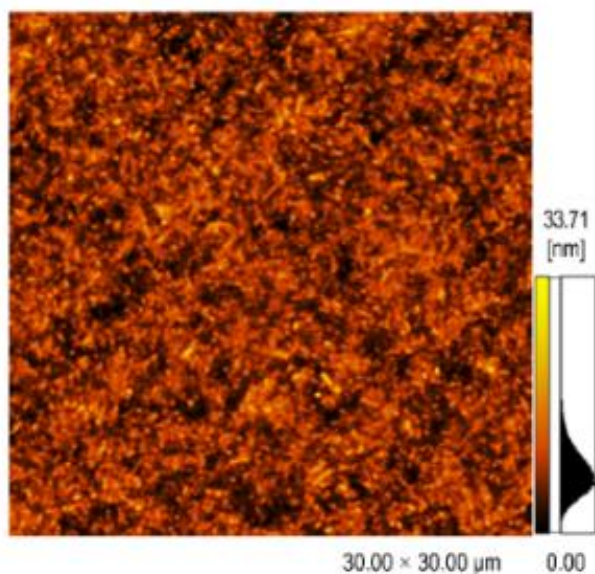
Известно, что в качестве грунтующих материалов подложек применяют эмаль толщиной 25-100 мкм, монооксид кремния (SiO) толщиной ~ 1 мкм. Пленки монооксида кремния, как правило, имеют высокую напряженность и, следовательно, низкую адгезию, а на слоях глазури наблюдается цек, то есть волосяные трещины.

Перспективным грунтующим материалом поверхности подложек является оксид тантала (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), сформированный на поверхности в виде тонкой пленки. Существует большое количество методов получения пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, основные из них: химические методы (химическое

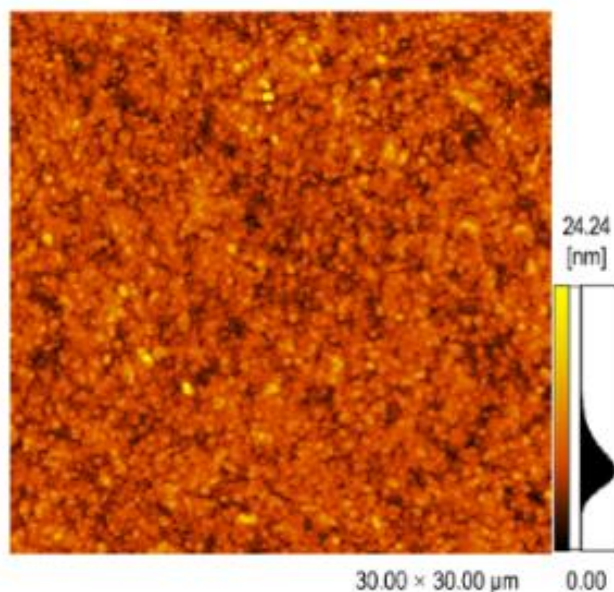
газофазное осаждение, анодное оксидирование, золь-гель метод) и методы вакуумного напыления (электронно-лучевое испарение, катодное распыление).

В настоящей работе для получения пленок  $Ta_2O_5$  применен метод ионно-плазменного распыления тантала [4, 5] с последующим его термическим окислением на подложке. Метод обеспечивает высокую скорость осаждения пленок, позволяет получать пленки с аморфной когерентной структурой, высокой плотностью и адгезией.

Исследование шероховатости поверхности подложек проводилось методом АСМ на сканирующем зондовом микроскопе SPM-9700 (Shimadzu, Япония) и для сопоставления результатов на большей площади сканирования на оптическом анализаторе микросистем MSA-500 (PolytecGmbH, Германия) со сканирующим виброметром Polytec на базе микроскопа, функционирующего по принципу лазерной интерферометрии. Результаты измерений параметров шероховатости поверхности подложки приведены на рис. 1, 2.

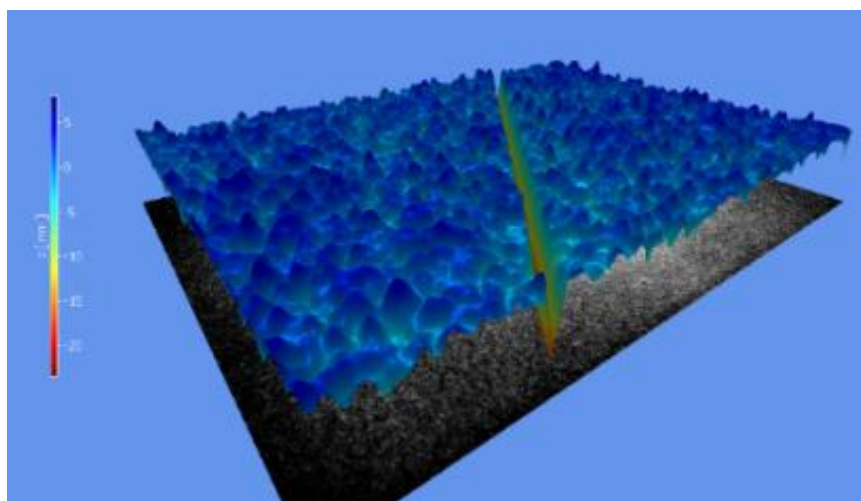


a)

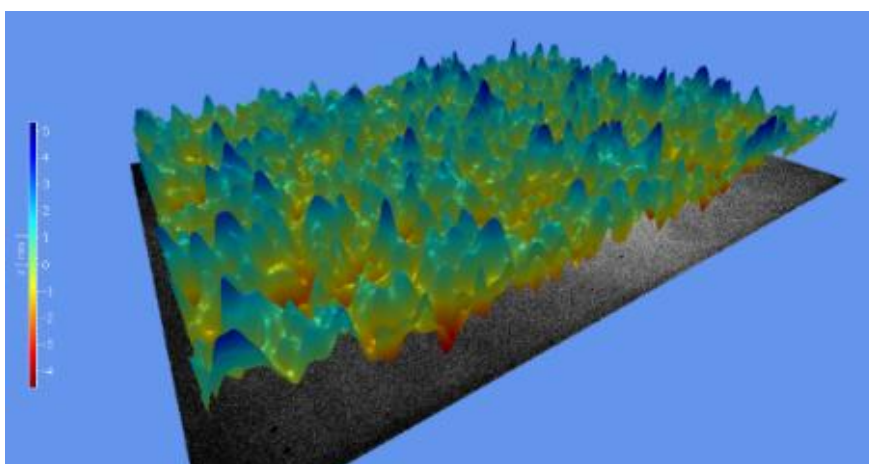


б)

**Рисунок 1. АСМ-изображения поверхности подложки без покрытия (а) и с покрытием  $Ta_2O_5$ (б)**



а)



б)

**Рисунок 2. Изображения поверхности подложки без покрытия (а) и с покрытием  $Ta_2O_5$ (б),полученный с помощью оптического анализатора микросистем MSA-500**

Результаты данных исследований показывают, что нанесенное покрытие изменяет параметры шероховатости, а именно:

- среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  уменьшается ~ в 2 раза;
- высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  уменьшается ~ в 2,7 раза;
- соотношение приведенных высот увеличивается ~ в 2 раза – что свидетельствует о росте равномерности поверхности образцов.

Изменение характеристик шероховатости после нанесения покрытия, обусловлено поверхностной диффузией и миграцией атомов при столкновении с подложкой, которая приводит к заполнению впадин и выравниванию выступов.

Также следует отметить, что согласно микрореологической теории, которая заключается в том, что в процессе формирования покрытия происходит заполнение впадин шероховатости поверхности, а также трещин и пор подложки, увеличивается площадь фактического контакта. Следовательно, увеличивается число связей между покрытием и подложкой, что в свою очередь приводит к увеличению адгезии.

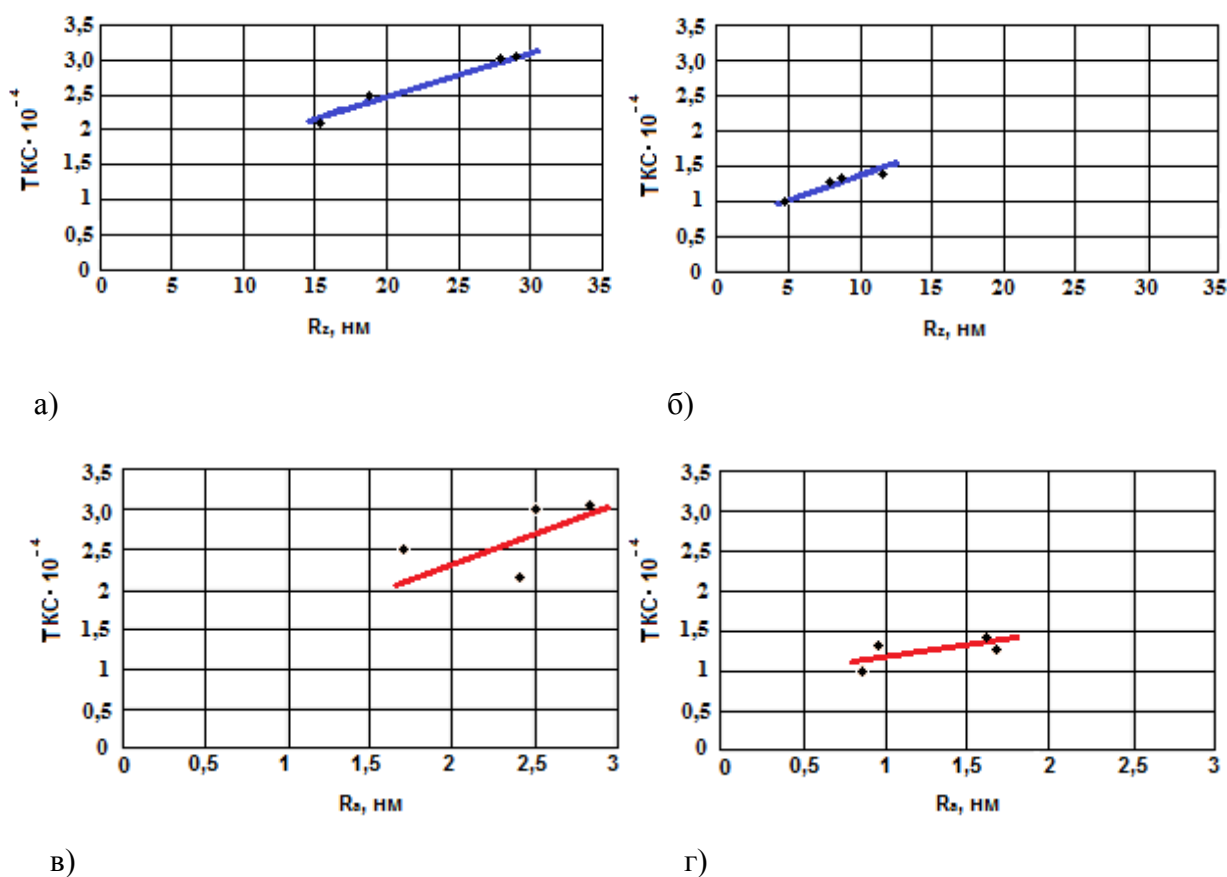
Согласно общепринятым представлениям, формирование тонких пленок происходит в результате образования зародышей, роста и слияния островков. Однако на шероховатой поверхности подложек могут происходить специфические механизмы роста, не требующие начального образования зародышей. Пленки на шероховатых поверхностях характеризуются,

как правило, неравномерной толщиной, значительно различающимися размерами зерен, большими межзеренными напряжениями, что существенно влияет на их температурную и временную стабильность.

Одним из основных параметров резистора является температурный коэффициент сопротивления (ТКС), который характеризует обратимое изменение сопротивления под действием температуры или тока, протекающего через резистор.

В работе [6] установлено, что температурный коэффициент сопротивления является структурно-чувствительным параметром резистивной пленки, по величине которого можно прогнозировать поведение резистора на длительные сроки хранения или эксплуатации.

Зависимость ТКС резистивных тонкопленочных элементов на основе сплава РС-3710 с удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s$  1000 Ом/квadrat с контактами ванадий-алюминий от шероховатости поверхности подложки из ситалла марки СТ 50-1 с грунтовым покрытием  $Ta_2O_5$  и без него приведена на рис. 3.



**Рисунок 3. Зависимость ТКС от шероховатости поверхности подложки:**  
без покрытия (а, в) и с покрытием (б, г)

Проанализировав результаты, можно заключить, что резистивные элементы, сформированные на поверхности подложки с большей шероховатостью имеют большие значения ТКС вследствие того, что микронеровности уменьшают толщину пленок, вызывают локальное изменение электрофизических свойств пленок и повышают сопротивление, ухудшая стабильность резистивных элементов.

Для резистивных элементов величина ТКС должна быть менее  $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , следовательно, шероховатость поверхности в отношении  $R_z$  для формирования тонких резистивных слоев

должна быть не более 16 нм, что обеспечивает применение сглаживающего покрытие на основе Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, обладающего хорошими диэлектрическими и адгезионными свойствами.

Таким образом, тонкопленочные резистивные элементы, сформированные на сглаженной поверхности подложки, имеют ~ в 2 раза меньший температурный коэффициент сопротивления. Следовательно, применение сглаживающего покрытие на основе Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> позволяет формировать на поверхности тонкие наноразмерные пленки и повышает стабильность тонкопленочных резисторов.

### Библиографический список

1. Данилина, Т.И. Технология тонкопленочных микросхем: Учебное пособие // Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования. - 2006. -164 с.
2. Уткин, В.Н. Исследование морфологии поверхности керамических подложек компонентов электронной техники/ В.Н. Уткин, М.А. Исаков, О.Е. Хапугин // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 11. – С. 38–41.
3. Невлюдов, И.Ш. Анализ методов контроля шероховатости подложек для электронной техники / И.Ш. Невлюдов, И.В. Жарикова, И.Д. Перепелица, А.Г. Резниченко //Прикладная физика. - №2/5. - 2014.
4. Исмаилов, Т.А. Способ получения тонких пленок (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) для интегральных схем / Т.А. Исмаилов, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. Науки. - № 1. - 2006.
5. Смирнова, К.И. Тонкие пленки в микроэлектронике: Учебное пособие. / К.И. Смирнова // Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники - 2007.
6. Смолин, В.К. ТКС как характеристика стабильности тонкопленочного резистора // Новые промышленные технологии. - Вып. 2-3. –2001. - С. 17-19.

V.E. Sergeev<sup>1,2</sup>

### THE TECHNOLOGY OF SMOOTHING THE SURFACE OF SUBSTRATES FOR THE MANUFACTURE OF THIN-FILM RESISTIVE ELEMENTS OF UHF DEVICES WITH INCREASED STABILITY OF PARAMETERS

Branch of FSUE RFNC-VNIIEF «NIIS named after Yu.E. Sedakova», N. Novgorod<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, N. Novgorod<sup>2</sup>

The effect of the surface roughness of the substrates on the stability of the parameters of high-resistance thin-film resistive elements is studied. The surface roughness of the substrates was determined by optical and atomic force microscopy (AFM). A technology has been developed for producing a surface-smoothing coating based on thin Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films with an amorphous coherent structure, the use of which reduces the height of the microroughness of the surface profile Rz to values of 12 nm or less. The coating allows the formation of thin nanoscale films on its surface, reduces the temperature coefficient of resistance by a factor of 2 and increases the stability of thin-film resistors.

**Keywords:** atomic force microscopy, surface microroughness, thin nanoscale films, thin-film resistive elements.

Г.А. Углов, Ю.Л. Сорокин, А.А. Караков

## РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА СМЕСИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С ПОДАВЛЕНИЕМ ЗЕРКАЛЬНОГО КАНАЛА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 9 – 27 ГГц

АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород.

В статье приводятся технические характеристики и результаты разработки двух типов смесителей с подавлением зеркального канала в диапазоне до 27 ГГц. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований на основе отечественной элементной и технологической базы.

**Ключевые слова:** смеситель частоты, монолитная интегральная схема, SMD корпус.

### Введение

Смесители являются неотъемлемой частью различных радиоприемных устройств. Благодаря широкому рабочему частотному диапазону, их использование становится возможным не только в военной технике, но и в гражданских сферах жизни, например, в оборудовании мобильной связи или сети Интернет. Отвечая вызовам времени, современные радиоэлектронные компоненты отечественного производства должны удовлетворять требованиям надежности, быть экономически привлекательными и конкурентоспособными по отношению к зарубежным аналогам. Удовлетворить данные требования к разрабатываемым изделиям возможно за счет применения интегральных технологий с целью уменьшения габаритных размеров, количества операций настройки и упрощением монтажа.

Анализ результатов полученных при разработке СВЧ смесителей подтверждает актуальность выбранного направления в серийном производстве монолитных интегральных схем.

### Проектирование функциональных узлов

На ранних этапах разработки проводится анализ ближайших зарубежных аналогов с целью их замещения. По итогам проведенных исследований определены схемные решения:

- тип 1: смеситель частоты (преобразование вверх) и выходной усилитель мощности;
- тип 2: усилитель мощности гетеродина, смеситель частоты (преобразование вниз), малошумящий усилитель.

Ставя задачу по унификации для расширения области применения и обеспечения конструктивной прочности, габаритные размеры топологий узлов рассчитываются под монтаж в герметичный керамический корпус типа SMD.

Проектирование всех узлов схемы на одном кристалле затруднительно ввиду резко возрастающего времени расчета электрических параметров модели при проектировании, поэтому каждый узел разрабатывается отдельно, с последующим применением в едином проекте.

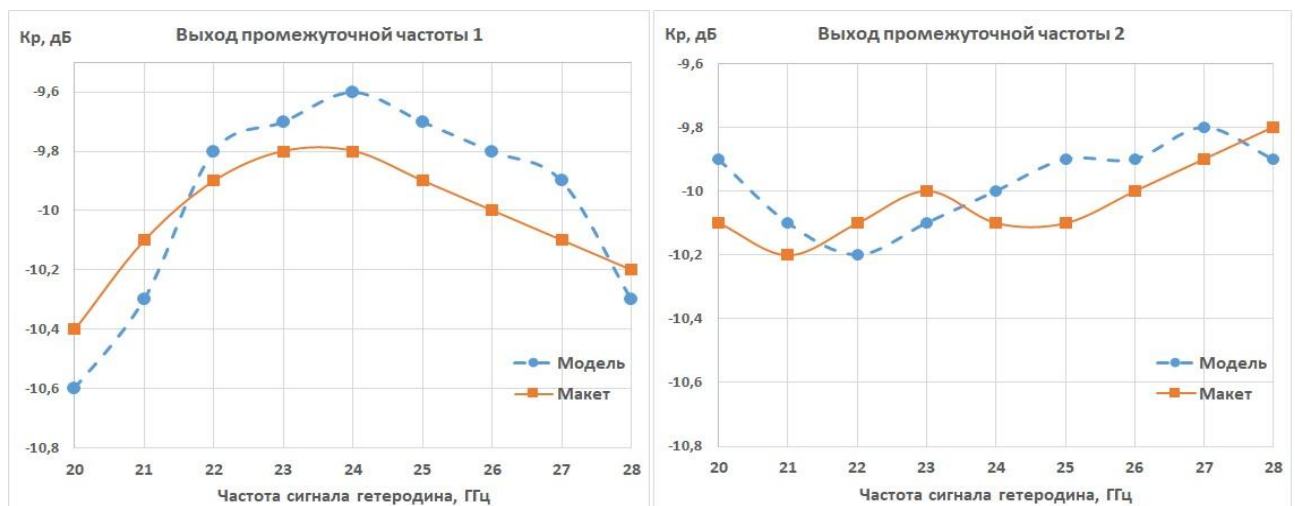
Для функционального узла смесителя предпочтительно использовать двойную балансную схему. Применение такой схемы позволит добиться следующих результатов:

- низкий уровень коэффициента шума благодаря фазовому подавлению шумов гетеродина;
- высокое подавление четных гармоник гетеродина, что ведет к снижению уровня побочных продуктов преобразования и, следовательно, к повышению помехоустойчивости и расширению динамического диапазона;
- потери сигнала в цепи гетеродина незначительны благодаря высокой развязке мостовых схем.

Реализация двойного балансного смесителя так же позволяет осуществить фазовое подавление приема по зеркальному каналу на частоте  $f_{3K}$  и восстановление энергии колебаний зеркальной частоты  $f_3$  на промежуточной частоте  $f_{ПЧ}$  без применения входного фильтра, что в свою очередь исключает вносимые им потери и обеспечивает более широкую полосу рабочих частот [1].

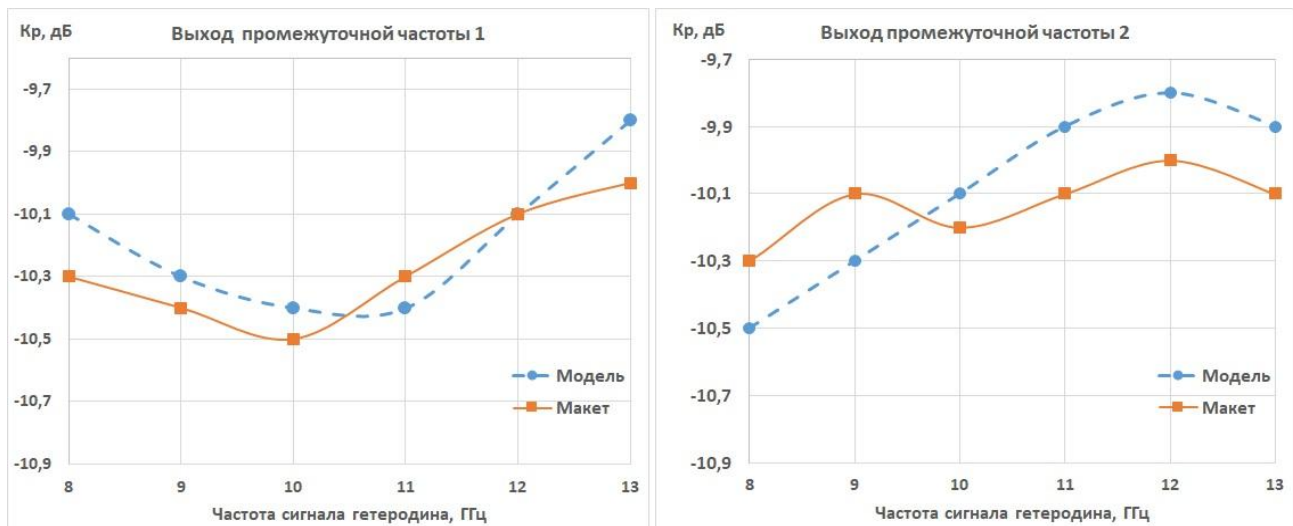
В качестве нелинейных элементов используются полевые транзисторы с барьером Шоттки с шириной затвора 60 мкм в диодном включении, изготовленные по базовой рНЕМТ технологии АО «НПП «Салют»[2]. Выбранные транзисторы применяются в качестве переключаемых сопротивлений, управление состояниями которых осуществляется посредством подачи сигнала гетеродина на их затворы. Выбранное схемное решение, при разработке смесителя, позволяет добиться высокого значения величины точки пересечения интермодуляции третьего порядка (IP<sub>3</sub>), определить коэффициент шума только потерями преобразования и исключить потребление тока[3]. К недостаткам такого решения стоит отнести повышенные потери преобразования и требование к высокому уровню сигнала гетеродина, которые частично можно скомпенсировать за счет использования усилителя мощности.

Электромагнитное моделирование проводится на GaAs подложке с толщиной 80 мкм. Ниже на рисунках 1, 2 представлены расчетные характеристики моделей смесителей в сравнении с параметрами с изготовленных макетов.



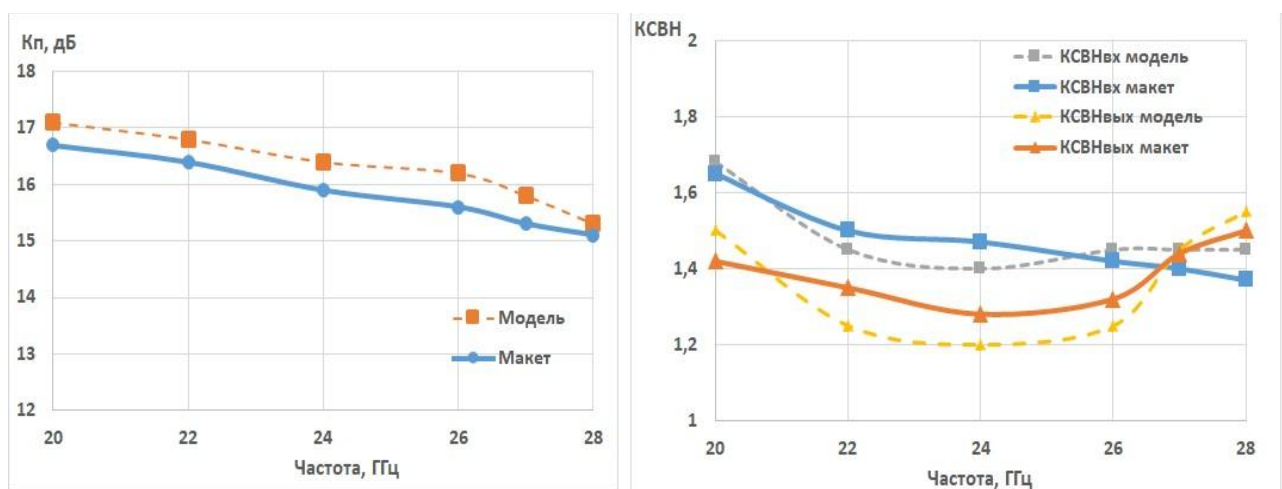
**Рисунок 1. Потери преобразования функционального узла смесителя 21 – 27 ГГц ( $f_{ПЧ}=100$  МГц,  $P_{гет}=17$  дБм)**





**Рисунок 2. Потери преобразования функционального узла смесителя 9 – 12 ГГц ( $f_{ПЧ}=100$  МГц,  $P_{рег}=3$  дБм)**

По особенностям построения усилители мощности можно разделить на три основных типа: балансные усилители, многокаскадные усилители с непосредственными связями и усилители с распределенным усилением. В данной работе была выбрана многокаскадная схема усилителя, обладающая следующими преимуществами: широкая полоса рабочих частот, согласование входа и выхода, малая неравномерность АЧХ. Недостатком такой схемы является низкий КПД. Усилители с реактивным согласованием, в том числе многокаскадные, являются самыми распространенными представителями ГИС и МИС усилителей мощности, в том числе с шириной полосы более одной октавы [4]. Электрические характеристики такой схемы достигаются совершенствованием выходной согласующей цепи, трансформирующей стандартное волновое сопротивление тракта 50 Ом к оптимальному нагружающему импедансу транзистора (или линейки синфазно возбуждаемых транзисторных структур), обеспечивающему на всех частотах диапазона максимальную выходную мощность, или максимальный КПД, либо компромисс между этими параметрами. Сравнение результатов моделирования с реализованными макетами приведены на рис. 3-5.



а)

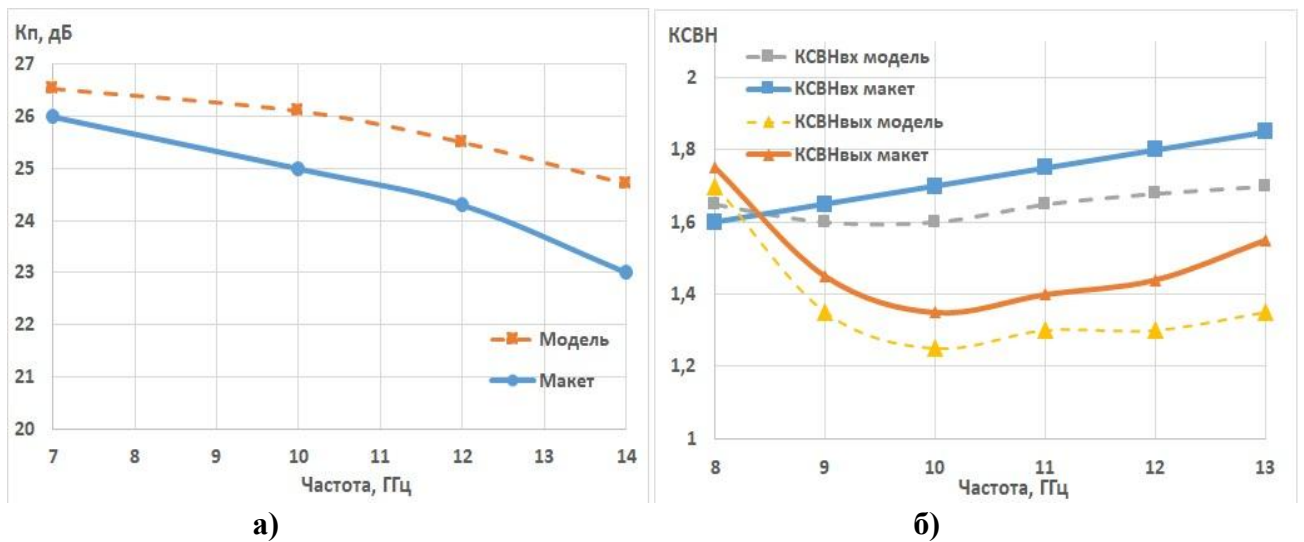
б)

**Рисунок 3. Характеристики усилителя мощности:**

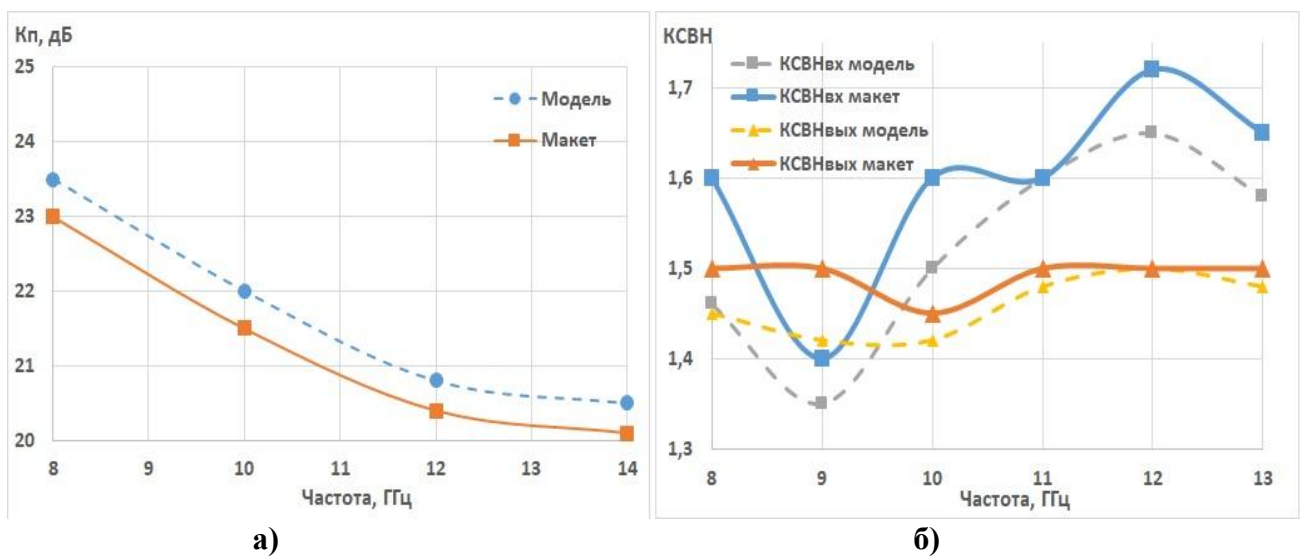
а) зависимость коэффициента усиления от частоты;

б) зависимость КСВН по входу и выходу от частоты





**Рисунок 4. Характеристики малошумящего усилителя:**  
 а) зависимость коэффициента усиления от частоты;  
 б) зависимость КСВН по входу и выходу от частоты



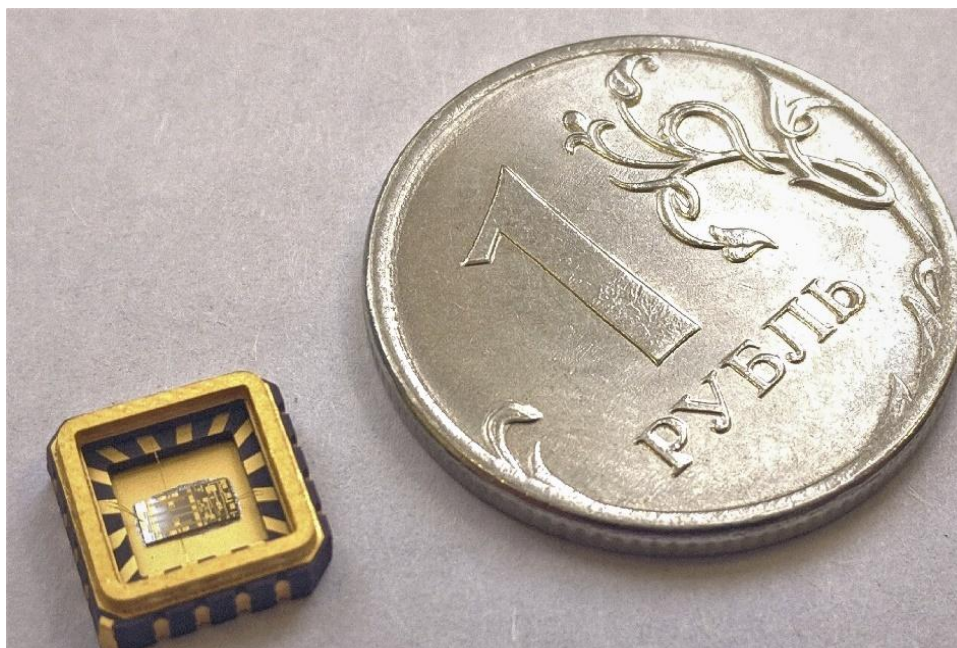
**Рисунок 5. Характеристики усилителя гетеродина:**  
 а) зависимость коэффициента усиления от частоты;  
 б) зависимость КСВН по входу и выходу от частоты

### Результаты изготовления смесителя

Разработанные смесители изготовлены по монолитно-интегральной технологии на основе GaAs. Конструктивно изделие представляет собой герметичный металлокерамический корпус типа SMD, способный выдержать нагрузки линейного ускорения до  $5000 \text{ м}^2/\text{с}$ , пониженное атмосферное давление до  $10^{-6}$  мм рт. ст. и воздействие специальных сред, имеющих в своем составе гелий и аргон в течении 60 часов.

Проверка электрических параметров проводится с использованием комплекса зондовой станции типа MPITS 150 и подключаемых к ней скалярных анализаторов цепей производства

АО «НПФ «Микран» Р2М-40А и внешних генераторов СВЧ сигнала Rohde&Schwarz SMF 100 А. На рис. 6 изображен внешний вид изделия в корпусе без крышки.



**Рисунок 6. Общий вид изделия**

Сравнение электрических параметров разработанных изделий с ближайшими зарубежными аналогами приведено в таблице.

Электрические параметры разработанных изделий в сравнении с аналогами

Наименование параметра, единица измерения	Тип изделия			
	тип 1	HMC815LC5	тип 2	HMC568
Диапазон рабочих частот высокочастотного сигнала и сигнала гетеродина, ГГц	21 – 27	21 – 27	9 – 12	9 – 12
Диапазон рабочих частот сигнала промежуточной частоты, ГГц	0,01 – 3,75	0,01 – 3,75	0,01 – 3,5	0,01 – 3,5
Коэффициент преобразования, дБ, не менее	4	7	10	10
Развязка гетеродин-сигнал, дБ, не менее	10	10	40	40
Развязка гетеродин-ПЧ, дБ, не менее	15	15	20	20
Подавление зеркального канала, дБс, не менее	18	20	20	20
Точка пересечения интермодуляции 3-го порядка, дБм, не менее	по выходу		по входу	
	19	27	-5	-1
Коэффициент шума, дБ, не более	–	–	3	2

### **Заключение**

Полученные в результате разработки СВЧ смесители близки по своим характеристикам к зарубежным аналогам HMC815LC5 и HMC568 фирмы Analog Devices, что подтверждает правильность выбора схемного решения.

### Библиографический список

1. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г. Гассанов, А.А. Липатов, В.В. Марков, Н.А. Могильченко. – М: Радио и связь, 1988 г., – 288 с.
2. Разработка преобразователей частоты в монолитном исполнении на основе базовой технологии создания GaAs монолитных интегральных схем с диодами Шоттки вертикальной конструкции / Д.И. Дюков, Ю.И. Чеченин, Н.С. Крицкий //XVIII Координационный научно-технический семинар по СВЧ технике: материалы. – Нижегородская обл., п. Хахалы, 2013г., - С.52
3. МИС двойного балансного смесителя для К-, К<sub>A</sub>- диапазонов частот на основе диодов Шоттки вертикальной конструкции / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков, А.И. Иващенко // Материалы Крымской конференции КриМиКо – Украина, Крым, г. Севастополь, 2012 г.
4. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ диапазона: Схемотехника, конструкции, технологии. Электроника и микроэлектроника СВЧ. / А.А. Кищинский // Сборник статей VII Всероссийской конференции. С/Пб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018 г., С. 4-13.

G.A. Uglov, Yu. L. Sorokin, A.A. Karakov

#### DEVELOPMENT AND STARTING OF SERIAL PRODUCTION OF FREQUENCY MIXERS WITH SUPPRESSION OF THE MIRROR CHANNEL IN THE FREQUENCY RANGE 9 – 27 GHz

JSCSIE «Salyut», Nizhny Novgorod

The article shows the technical characteristics and results of the development of two types of frequency mixers with suppression of the mirror channel in the frequency range up to 27 GHz. The results of modeling and experimental studies based on national electronic and technological base are presented.

**Keywords:** frequency mixer, monolithic integrated circuit, SMD package.

А.А. Чиликов, А.М. Щитов

**БАЛАНСНЫЙ ГАРМОНИКОВЫЙ СМЕСИТЕЛЬ  
НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТ 3-55 ГГц**

НФ АО «НПФ «Техноякс»

Рассмотрен вариант конструктивного исполнения диодного балансного гармоникового смесителя СВЧ, в основе которого лежит СВЧ-диплексер для разделения входного СВЧ-сигнала и сигнала промежуточной частоты (ПЧ). Для обеспечения баланса схемы в тракте сигнала гетеродина применен симметрирующий трансформатор в виде компланарно-щелевого перехода. Основная сложность при проектировании данного устройства заключается в разработке широкополосного ФНЧ, входящего в состав диплексера. Выполнено полное трехмерное электромагнитное моделирование конструкции, результаты которого были использованы для расчета характеристик смесителя методом гармонического баланса. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментального обследования. Смеситель имеет диапазон частот сигнала гетеродина 3-30 ГГц, ПЧ – 0-1 ГГц, а общий диапазон входного информационного сигнала в режиме преобразования по первой, второй и третьей гармоникам гетеродина составляет 3-55 ГГц. Устройство предназначено для расширения диапазона частот анализатора спектра СК4-105 (9 кГц – 20 ГГц).

**Ключевые слова:** гармониковый балансный смеситель, сверхширокополосный диодный смеситель, трехмерное моделирование, электродинамический расчет, нелинейный анализ.

**Введение**

Одной из наиболее актуальных задач при разработке современных радиоизмерительных приборов и приемопередающей аппаратуры является расширение частотного диапазона. В настоящий момент цифровая обработка сигналов осуществляется в диапазоне частот до нескольких гигагерц, поэтому для обеспечения работы на более высоких частотах применяют различные аналоговые преобразователи частоты, такие как умножители, смесители и другие.

Диодные балансные смесители СВЧ широко используются в радиоизмерительной аппаратуре (приемники, анализаторы спектра, анализаторы цепей, амплифазометры и др.). Благодаря возможности работы на любых номерах гармоник сигнала гетеродина они способны осуществлять перекрытие многооктавного диапазона частот информационного сигнала при относительно небольшом диапазоне сигнала гетеродина. Гармониковые смесители имеют приемлемые потери преобразования, сравнительно простое конструктивное исполнение и требуют небольшую мощность сигнала гетеродина вследствие наличия всего двух диодов.

Современные методы проектирования смесителей включают в себя моделирование с использованием САПР, что позволяет значительно сократить время на разработку изделия и исключить или свести к минимуму регулировку.

Целью данной работы является проектирование диодного балансного гармоникового смесителя с максимально возможным диапазоном частот по входу СВЧ-сигнала. Смеситель предназначен для расширения диапазона частот анализатора спектра СК4-105 (9кГц-20ГГц) в область верхних частот (до 53,57 ГГц в коаксиальном исполнении). Анализатор спектра

для работы с внешним (выносным) смесителем имеет источник сигнала гетеродина 10-20 ГГц с мощностью 20-40 мВт и вход приемника промежуточной частоты  $f_{пч} \approx 320$  МГц. Одним из требований к проектируемому смесителю является обеспечение минимальной неравномерности АЧХ и работа при одинаковой фиксированной мощности сигнала гетеродина для каждого номера гармоники.

### Описание конструкции

Типовая структурная схема смесителя балансного относительно сигнала гетеродина представлена на рис. 1. В основе схемы лежит диплексер и симметрирующий трансформатор. Диплексер предназначен для разделения тракта входного СВЧ-сигнала и тракта ПЧ, а симметрирующий трансформатор – для формирования противофазного сигнала гетеродина и обеспечения баланса схемы. В состав диплексера входит ФВЧ, предназначенный для отделения сигнала ПЧ, и ФНЧ для предотвращения прохождения СВЧ-сигнала. Таким образом, полоса рабочих частот и изоляция тракта гетеродина определяется конструкцией симметрирующего трансформатора, широкополосность тракта СВЧ-сигнала задается ФВЧ диплексера, а диапазон и изоляция тракта ПЧ определяется ФНЧ диплексера.

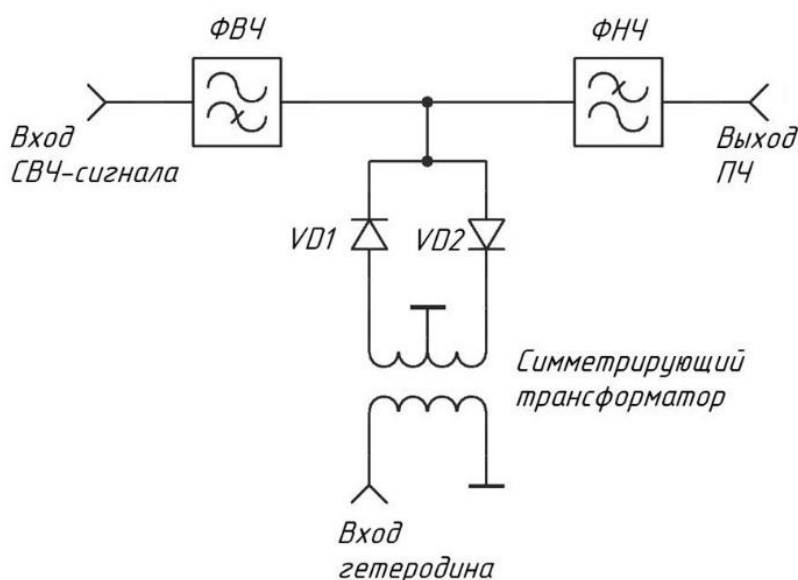
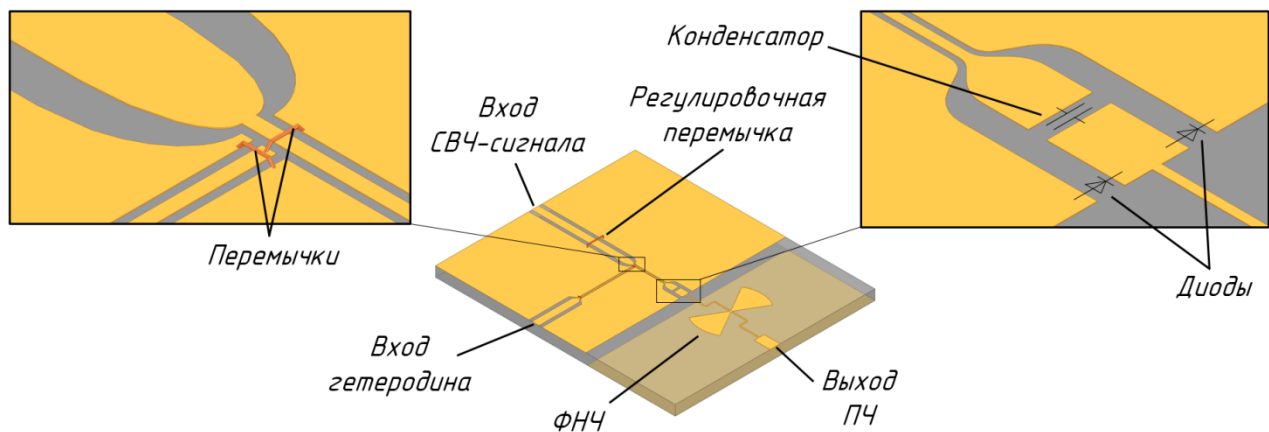


Рисунок 1. Структурная схема балансного смесителя

Известны многочисленные варианты конструктивного исполнения балансных гармонических смесителей в виде гибридных интегральных схем (ГИС) СВЧ. Например, смеситель с формированием противофазного сигнала гетеродина щелевым резонатором, расположенным под микрополосковой линией СВЧ-сигнала [1], смеситель на комбинации копланарной линии входного СВЧ-сигнала и щелевой линии тракта гетеродина [2] и другие.

Представленная на рис. 2. конструкция имеет одну печатную плату из поликора толщиной 0,5 мм и монтаж производится с одной стороны, поэтому является наиболее предпочтительной в плане удобства сборки и регулировки.



**Рисунок 2. Эскиз конструкции гармонического смесителя**

Входной сигнал передается по копланарной линии, а сигнал гетеродина возбуждает щелевую линию, образованную земляными обкладками копланарной линии входного сигнала. По обе стороны с центрального проводника на земляные обкладки копланарной линии разнополярно устанавливаются смесительные диоды А91147-3 производства «НПП «САЛЮТ», параметры которых оптимальны для данного частотного диапазона. Роль входного ФВЧ выполняет конденсатор К10-71 емкостью 1 пФ. Сигнал ПЧ снимается с точки подключения диодов через микроплатформный ФНЧ, поэтому нижняя сторона платы смесителя имеет металлизацию в области фильтра ПЧ.

Основная сложность связана с разработкой широкополосного ФНЧ без паразитных полос пропускания и его стыковкой с ФВЧ диплексера. Проблема заключается в том, что в интервалах частот, на которых имеются резкие перепады фазочастотной характеристики коэффициента отражения ФНЧ, наблюдаются ухудшения передачи входного СВЧ-сигнала на диоды. Указанные провалы напрямую влияют на эффективность преобразования смесителя, поэтому должны быть устранены.

Еще одной проблемой представленной конструкции является наличие паразитной связи земляных обкладок копланарной линии с обратной металлизацией микрополоскового ФНЧ. Следствием этой паразитной связи является наличие провалов в частотной характеристике симметрирующего трансформатора тракта гетеродина. Данный эффект устраняется внесением в область связи небольших (около  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ ) кусочков поглощающего материала по краям обратной металлизации ФНЧ.

Рабочая полоса частот сигнала гетеродина определяется расстоянием регулировочной перемычки (рис. 2) относительно места соединения центрального проводника копланарной линии гетеродина с земляной обкладкой копланарной линии входного СВЧ-сигнала. Это расстояние должно равняться четверти длины волны на центральной частоте диапазона гетеродина. При этом перекрытие по частоте получается около 10:1.

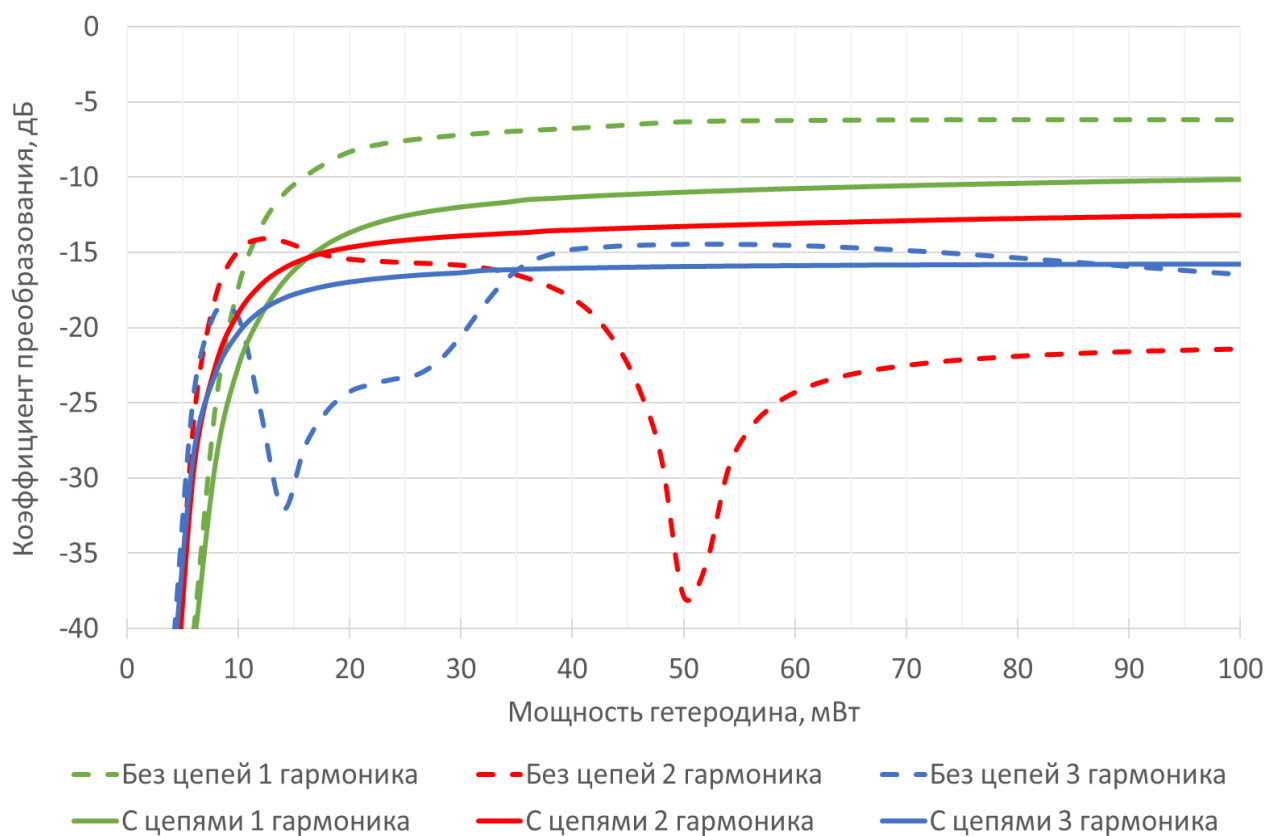
### **Моделирование и экспериментальное обследование**

Моделирование смесителей выполнялось с использованием САПР. Сначала производился трехмерный электродинамический анализ конструкции методом конечных элементов с учетом влияния стенок корпуса и коаксиально-микрополосковых переходов. Далее полученные характеристики экспортировались в программу для моделирования схемы, где осуществлялся расчет параметров смесителя методом гармонического баланса [3].

На этапе моделирования производилась оптимизация топологии платы смесителя. Критериями оптимизации выступали обеспечение минимальных потерь преобразования и расширение рабочей полосы частот по первой, второй и третьей гармонике гетеродина.

В ходе моделирования было обнаружено, что смеситель имеет нелинейные немонотонные зависимости от мощности сигнала гетеродина, причем оптимальные значения мощности различаются для преобразований по первой, второй и третьей гармоникам. Поскольку мощность сигнала всегда имеет неравномерность в широкой полосе частот, то это может привести к нежелательной неравномерности потерь преобразования в диапазоне частот. Чтобы исключить влияние неравномерности мощности гетеродина диоды подключаются через резистивно-емкостные цепи автосмещения, которые устанавливаются на земляные обкладки копланарной линии входного СВЧ-сигнала и представляют из себя параллельное соединение сопротивления и емкости.

Расчетные зависимости потерь преобразования от мощности сигнала гетеродина по первой, второй и третьей гармонике, а также влияние цепей автосмещения представлены на рис. 3. Данные получены при следующих параметрах:  $F_c=20$  ГГц,  $F_{пч}=300$  МГц, параметры цепей автосмещения  $R=1$  кОм,  $C=50$  пФ.



**Рисунок 3. Влияние цепей автосмещения на зависимости коэффициента преобразования от мощности гетеродина по первой, второй и третьей гармоникам**

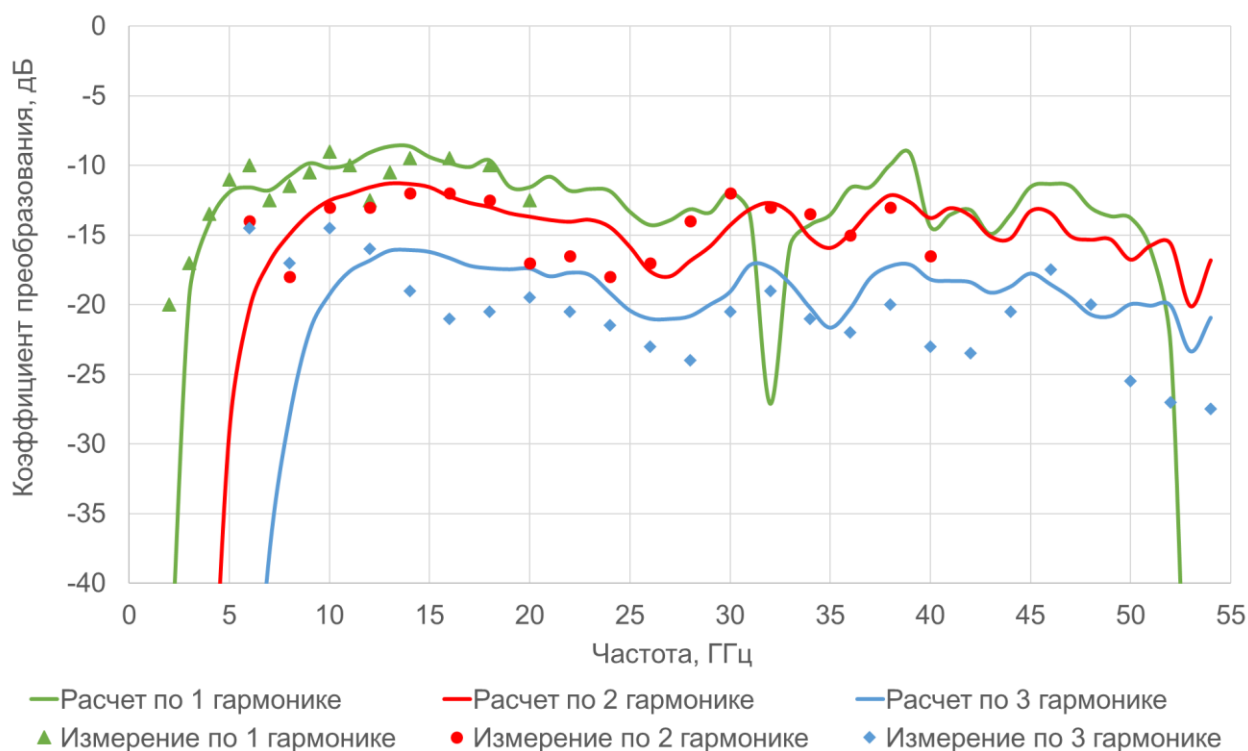
В виду сложности проявления нелинейных свойств диода на рис.3 можно наблюдать немонотонные зависимости коэффициента преобразования от мощности сигнала гетеродина в отсутствие цепей автосмещения. Формирование гармоник сигнала гетеродина осуществляется на диодах, за счет нелинейных ВАХ и ВФХ. В зависимости от мощности сигнала превагирует то один, то другой фактор, причем для различных гармоник оптимальными являются различные условия. Это проявляется в наличии нескольких экстремумов зависимости потерь



преобразования от мощности на разных гармониках гетеродина. Использование цепей авто-смещения устраняет указанные особенности и сглаживает характеристики.

Однако для различных гармоник гетеродина оптимальными являются различные значения номиналов цепей автосмещения. Номинал емкости не дает существенного влияния, поэтому, чтобы не препятствовать прохождению СВЧ-сигналов (входного и гетеродина) через диоды, следует взять как можно большую емкость, например, 50 пФ. Величина сопротивления оказывает различный эффект на разных гармониках. Так, для первой гармоники оптимальным является значение 0 Ом, то есть отсутствие цепей автосмещения, для второй гармоники – 200 Ом, а для третьей – 2 кОм. Поскольку смеситель должен работать по всем трем номерам гармоник, были выбраны наиболее предпочтительные с точки зрения универсальности значения 1 кОм для резистора и 50 пФ для конденсатора.

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные частотные зависимости потерь преобразования по первой, второй и третьей гармоникам сигнала гетеродина. Данные получены при следующих параметрах:  $P_{\text{гет}} = 40$  мВт,  $F_{\text{пч}} = 300$  МГц, параметры цепей автосмещения  $R = 1$  кОм,  $C = 50$  пФ.



**Рисунок 4. Расчетные и экспериментальные частотные зависимости потерь преобразования по первой, второй и третьей гармоникам сигнала гетеродина**

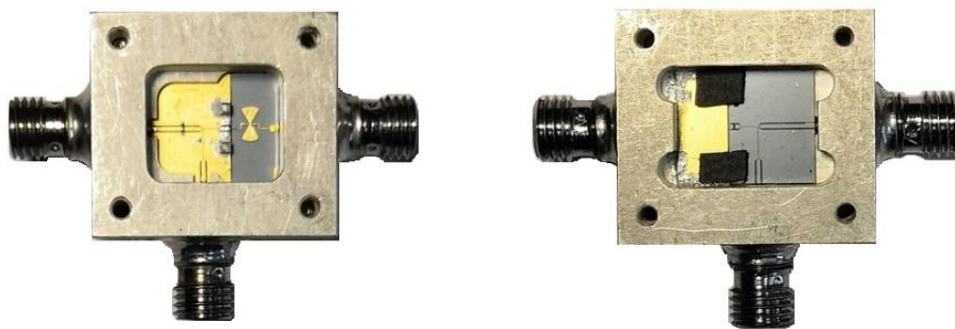
Измерения характеристик смесителей проводились с использованием анализатора спектра Agilent Technologies N9030A PXA Signal Analyzer 3Hz – 50GHz, синтезатора частоты Agilent Technologies E8257DPSG Analog Signal Generator 250kHz – 67 GHz в качестве источника входного СВЧ-сигнала, Г4-230 в качестве источника сигнала гетеродина.

Наблюдается хорошее совпадение результатов компьютерного моделирования с характеристиками, полученными в ходе эксперимента.

Потери преобразования по первой гармонике гетеродина составляют  $11 \pm 2$  дБ, по второй гармонике –  $15 \pm 3$  дБ; по третьей гармонике –  $19 \pm 4$  дБ.

На рис. 5 представлен внешний вид макета гармоникового смесителя.





**Рисунок 5. Внешний вид смесителя**

### **Библиографический список**

1. **Щитов, А.М.** Широкополосные преобразователи частоты для радиоизмерительных приборов СВЧ: диссертация ... докт. техн. наук / Щитов А.М. – ННИПИ «Кварц», Нижний Новгород, 2004. – 257 с.
2. **Щитов, А.М.** Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов: монография / А.М. Щитов [и др.]; под ред. А.М. Щитова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2016. – 196 с.
3. **Березин, В.В.** Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов // Физика волноводных процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Вып. 4. – Т. 18. – с. 11-17.

**А.А. Chilikov, А.М. Shchitov**

### **BALANCE HARMONIC MIXER 3-55 GHz FREQUENCY RANGE**

Joint Stock Company "Scientific and Production Firm" Tekhnoyaks "

A design version of a diode balanced harmonic microwave mixer is proposed. Separation of the input microwave signal and the intermediate frequency signal (IF) in this design is realized by microwave diplexer. The balance of the circuit is ensured by the use of a balun in the LO path signal employing a coplanar-slot transition. The main difficulty in the design of this device is the development of a broadband low-pass filter, which is part of the diplexer. Full three-dimensional electromagnetic design simulation is performed. The calculation of the characteristics of the mixer by the harmonic balance method used the results of 3D modeling. Comparison of the results of computer simulation and measurement is presented. The mixer has a LO frequency range from 3 to 30 GHz, IF bandwidth of DC to 1 GHz, and the total RF range when converting from the first, second and third harmonics of the LO from 3 to 55 GHz. The device is designed to expand the frequency range of the spectrum analyzer SK4-105 (9 kHz - 20 GHz).

**Keywords:** harmonic balanced mixer, ultra-wideband diode mixer, three-dimensional modeling, electrodynamic calculation, nonlinear analysis.