МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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

XXIV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ» ИСТ–2018

посвященная 100-летию Нижегородской радиолаборатории

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

НИЖНИЙ НОВГОРОД 2018

УДК 621:681

ББК 32.97

И648

Конференция посвящается 100-летию Нижегородской радиолаборатории

В сборнике представлены материалы докладов XXIV Международной научно-технической конференции, проведенной 20 апреля 2018 г. дирекцией Института радиоэлектроники и информационных технологий при поддержке, оказанной ректоратом НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Публикуемые материалы представляют тематику, круг научных интересов и состояние исследований представителей научных и высших учебных заведений Белоруссии, Украины, Австрии, и 18 городов России - преподавателей, научных сотрудников, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов-участников НИРС, а также сотрудников МИРЭА, МЭИ, МГТУ «СТАНКИН», МГЭУ, Московского авиационного института (национального исследовательского университета), РУДН, Севастопольского государственного университета, Владимирского государственного университета, Ижевского государственного технического университета, Липецкого государственного технического университета, Национального исследовательского Томского государственного политехнического университета, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Волжского государственного университета водного транспорта, Нижегородской государственной консерватории, Нижегородского филиала ГУ ВШЭ, Волго-Вятского филиала МТУСИ, ИПУ РАН, ИПФ РАН, НИИИС им. Ю.Е. Седакова, НИФТИ, НПП «Полет», ОАО «Гипрогазцентр», РФЯЦ-ВНИИЭФ, АПЗ им. П.И. Пландина, АПКБ, ПАО «Сбербанк» и представителей других организаций.

Организационный комитет:

А.В. Мякиньков (председатель), В.П. Хранилов (зам. председателя), М.В. Ширяев, Н.Ю. Бабанов, В.Г. Баранов, Ю.Г. Белов, О.Г. Берестнева, В.В. Кондратьев, О.В. Крюков, А.А. Куркин, И.Н. Мерзляков, В.Р. Милов, С.Л. Моругин, А.С. Раевский, С.Б. Раевский, А.Г. Рындык, Э.С. Соколова, Ю.М. Туляков, М.В. Ульянов, В.А. Утробин, А.Д. Филинских, В.Л. Ягодкин

ISBN 978-5-502-01017-7

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ страницы

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ……..1196

СЕКЦИЯ 1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА..... ……...4

СЕКЦИЯ 2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ВЧ И СВЧ ДИАПАЗОНОВ…..……..……..230

СЕКЦИЯ 3

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ……..……..459

СЕКЦИЯ 4.1

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ..... ……654

СЕКЦИЯ 4.2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ)……..739

СЕКЦИЯ 5.1

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ)……..867

СЕКЦИЯ 5.2

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ)……964

СЕКЦИЯ 5.3

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ)……..……1055

СЕКЦИЯ 6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ……..……1132

УДК 621.317

О.В. Анисимов, В.А. Курчидис, А.В. Ященко

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИВ ФОРМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ О РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

Ярославское высшее военное училище ПВО

Рассматривается формализованное представление радиоэлектронной аппаратуры в виде совокупности свойств ее элементов предметно ориентированное на выполнение операций процесса технического диагностирования с участием обслуживающего персонала. Предлагается структура метода формирования диагностической информации по дескриптивной модели радиоэлектронной аппаратуры на основе онтологий,обеспечивающего согласование содержания свойств элементов аппаратуры, выражаемых в предметных терминах и понятиях, с условиями, определяющими требования к диагностической информации характеристического типа в конструкциях естественного языка.

Ключевые слова: техническое диагностирование, концептуальное формализованное представление, дескриптивная модель, онтологии, радиоэлектронная аппаратура.

Особенность использования предметных терминов и понятий естественного языка при техническом диагностировании состоит в том, что признаки отказов, признаки неисправностей и признаки диагностической информации определяются через различные свойства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Термин «свойства» является многозначным [3, 1, 2], и в статье он определяется как совокупность фактов, отражающих признаки характеризующие радиоэлектронную аппаратуру в работоспособном, либо в неработоспособном состоянии. Свойства РЭА могут быть получены посредством как наблюдения или измерения, так и логических умозаключений на основании наблюдений, измерений или посредством изучения эксплуатационной и нормативной документации.

Таким образом, РЭА с точки зрения формирования диагностической информации может быть представлена определенной совокупностью номинальных свойств, которые определяются в соответствии с комплектом эксплуатационных и нормативных документов $\breve{D}$. Это позволяет представить отказ Λ как событие, состоящее в нарушении некоторой совокупности номинальных свойств, которые определяют факты, характеризующие диагностические признаки отказа. При этом всякое состояние также может быть представлено в виде совокупности свойств, причем для неработоспособных состояний имеет место нарушение некоторых номинальных свойств.

При таком подходе диагностическую информацию можно представлять как совокупность свойств элементов РЭА, отражающих ее различные аспекты(структурный, функциональный, параметрический и т. д.). Эти свойства характеризуют связанные с элементами РЭА названия, маркировки, структуры, функциональность, конструктивные особенности и т.п. При этом параметры РЭА и их значения также целесообразно представлять в виде свойств этих элементов. Таким образом, представление аппаратуры в виде совокупности свойств элементов РЭА позволяет отразить особенности формирования диагностической информации в процессе технического диагностирования.

Для описания всех свойств РЭА предлагается формализация в виде пространства свойств, характеризующих эту аппаратуру. Для этого всякое свойство РЭА формально определяется, как отношение, связывающее некоторое число его элементов. Примерами отношений являются: «индикатор А светится» («индикатор светит себя»), «функция F не выполняется» («функция не выполняет себя»). Отношение «ячейка А входит в блок Б» является примером бинарного отношения, в котором отношение «входит» связывает два элемента – ячейку А и блок Б. Аналогично отношение «цепь соединяет разъем А и разъем Б» является примером тернарного отношения «соединяет», которое связывает три элемента – цепь (электрическая), разъем А и разъем Б.

Следует отметить, что одно и то же свойство можно представить разными отношениями. Например, представление того, что блок А имеет маркировку, в пространстве свойств с использо-

ванием отношений можно описать и как «блок имеет маркировку А», и как «маркировка блока есть А».

Поскольку отношения должны отражать различные аспекты представления РЭА (структурный, функциональный, параметрический и т. п.), то множество отношений целесообразно определенным образом структурировать. Например, для описания структурного аспекта в качестве элементов РЭА могут выступать элементы структурной иерархии изделия: блоки, ячейки, платы, разъемы, контакты и т. п. Для описания функционального аспекта в качестве элементов РЭА могут использоваться обозначения, аббревиатуры либо названия выполняемых функций. Для описания параметрического аспекта в качестве элементов РЭА могут выступать значения параметров и сигналов.Таким образом, с прикладной точки зрения пространство свойств можно рассматривать как некоторое интегрированное формальное представление РЭА, которое обеспечивает многоаспектное представление РЭА и по уровню детализации хорошо согласуется со структурным, функциональным и параметрическим представлением РЭА.

Поскольку всякое свойство РЭА при таком представлении может быть выражено с помощью высказывания, то следует отметить, что предлагаемое формальное представление РЭА предметно ориентировано на выполнение операций процесса технического диагностирования с участием обслуживающего персонала. Для интегрирования предлагаемого представления в процесс технического диагностирования РЭА необходимо использовать определенные средства сопряжения, обеспечивающие согласование содержания свойств РЭА, выражаемых в предметных терминах и понятиях, с выполняемыми технологическими действиями.

Такое сопряжение предлагается осуществлять на основе концептуального формализованного представления РЭА (КФП), которое обеспечивает формализованное описание этой аппаратуры с использованием понятий и терминов естественного языка. В настоящее время концептуальное формализованное представление используется в ряде предметных областей (медицина, архитектура, программные системы) [4, 5, 6, 7]. Однако сведения о наличии концептуального формализованного представления РЭА и использование такого представления для формирования диагностической информации, необходимой при выполнении операций процесса диагностирования, в литературе отсутствует.

Использование КФП в процессе диагностирования направлено на определение свойств требуемой диагностической информации в условиях, выражаемых через свойства РЭА в предметных терминах и понятиях естественного языка. Это позволяет согласовывать в рамках единого информационного пространства процесса диагностирования представление диагностической информации в виде свойств РЭА с представлением диагностической информации на основе параметров аппаратуры и признаков отказа Λ.

С точки зрения формирования диагностической информации разрабатываемый метод формирования диагностической информации должен учитывать следующее:

1) используется формапредоставления диагностической информации в форме перечисления элементов диагностических данных;

2) диагностическая информация по своему содержанию соотвествует описанию и представлению РЭА в нормативных и эксплуатационных документах;

3) условия, определяющие требования к диагностической информации, определяются в языковых конструкциях естественно-подобного языка;

4) обеспечиваетсяпредметное согласование с формальными моделями РЭА, которые используются в существующих системах информационной поддержки технического диагностирования и описаны в [8].

Поскольку в нормативных и эксплуатационных документах описания РЭА представлены в понятиях и терминах предметной области в виде фактов и сведений о характеристиках, структуре, выполняемых функциях, состояниях аппаратуры, это обосновывает целесообразность использования класса дескриптивных моделей для формирования концептуального формализованного представления радиоэлектронной аппаратуры. Это означает, что в качестве основы метода целесообразно использовать дескриптивную модель РЭА на основе онтологий (*ДМО*), которая содержит

множество описаний аппаратуры, представленное в нормативных и эксплуатационных документах, в виде взаимосвязанной совокупности предметных понятий, отношений и аксиом. При этом дескриптивная модель *ДМО* ориентирована на предоставление диагностической информации в форме перечисления совокупности элементов диагностических данных.

Условия, определяющие требования к диагностической информации, целесообразно представлять в конструкциях естетственно-подобного языка. Для этого целесообразно использовать модифицировать способ [], который основан на сочетании предикатной модели ПМ, представляющей условия запроса, и схемно-ориентированного языка запросов.

Для формирования $ДИ_{\Lambda}$ в виде перечисления элементов диагностических данных, удовлетворяющих условиям $\hat{Y}_{\Lambda}$, целесообразно разработать соответствующий способ, который обеспечивает автоматическое формирование диагностической информации для последующей визуализации средствами систем информационной поддержки (СИП) технического диагностирования. В этом способе осуществляется интеграция моделей, предложенных для языкового описания условий $\hat{Y}_{\Lambda}$, а также для концептуального представления РЭА на основе дескриптивной модели *ДМО*. Разнообразие используемых средств позволяет за счет интерпретации условий $\hat{Y}_{\Lambda}$ отделить предметный аспект от аспекта, связанного с представлением элементов диагностических данных средствами визуализации СИП.

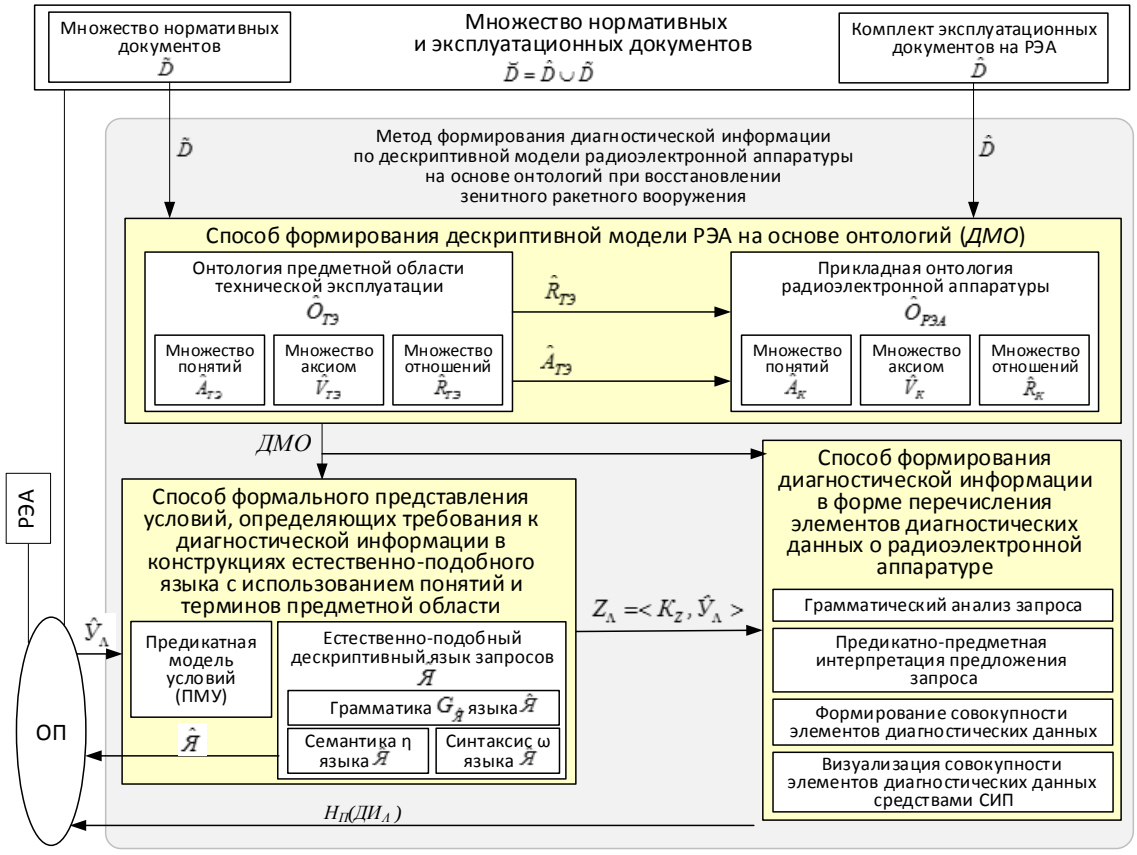


Рисунок 1— Общая структура метода формирования диагностической информации на основе дескриптивной модели радиоэлектронной аппаратуры

Предлагаемый метод целесообразно представить в виде совокупности способов и процедур. В соответствии с этим в структуре предлагаемого метода формирования диагностической информации ДИ (Рисунок 1) целесообразно выделить три компоненты, каждая из которых реализована в виде соответствующего способа: способ формирования дескриптивной модели РЭА на основе онтологий; способа формального представления условий, определяющих требования к диагностической информации в конструкциях естетствеенно-подобного языка с использованием понятий и терминов предметной области определенных в дескриптивной модели радиоэлектронной аппарату-

ры на основе онтологий; способ формирования совокупности элементов диагностических данных о радиоэлектронной аппаратуре ЗРВ, на основе предметной интерпретации условий, определяющих требования к необходимой диагностической информации.

В качестве исходного информационного ресурса в методе используется: комплект эксплуатационных документов (эксплуатационная документация) $\hat{D} \subset \breve{D}$ на радиоэлектронную аппаратуру; нормативная документация,связанная с описанием стадий и этапов жизненного цикла изделия, конструктивных и функциональных особенностей радиоэлектронной аппаратуры, описанием структуры и содержания эксплуатационных документов.

Основной компонентой метода выступает способ формирования дескриптивной модели РЭА на основе онтологий. Этот способ обеспечивает согласование всех терминов и понятий предметной области технической эксплуатации, которые используются для описания свойств РЭА,являющихся существенными с точки зрения выполнения операций технического диагностирования. Дескриптивная модель *ДМО* в формализованном виде позволяет представлять диагностическую информацию, содержащуюся в комплекте эксплуатационных документов в виде конструкций естественного языка.

Формирование дескриптивной модели *ДМО* осуществляется посредством объединения всех прикладных онтологий $\hat{O}_{РЭА}$, используемых для описания компонентов радиоэлектронной аппаратуры по комплекту эксплуатационных документов, с онтологиями предметной области $\hat{O}_{ТЭ}$ технической эксплуатации, которые разрабатываются по совокупности нормативных документов для рассматриваемой прендметной области: $ДМО = \hat{O}_{ТЭ} \cup \hat{O}_{РЭА}$. При этом необходимо отметить, что в работе прикладные онтологии $\hat{O}_{РЭА}$ формируются для типовых элементов замены РЭА ЗРВ, к которым относятся ячейки и блоки.

В модели *ДМО* предлагается рассматривать РЭА в виде взаимосвязанной совокупности самостоятельных понятийных единиц (понятий), отражающихразличные аспекты аппаратуры (структурный, функциональный, параметрический и т.п.). При этомсовокупность понятий $\hat{A}_K$, участвующих в описании компонента РЭА и связанных между собой с помощью отношений $\hat{R}_K$ и аксиом$\hat{V}_K$, позволяет определить каждыйкомпонентаппаратуры в понятиях и терминах предметной области.При этом в качестве исходных данных выступают элементы $\hat{O}_{ТЭ}$, которые формируются в результате концептуального анализа сведений, содержащихся в нормативных документах $\breve{D}$ для предметной области технической эксплуатации и связанных с формированием диагностической информации.

Использование в дескриптивной модели *ДМО* двух видов онтологического представления обеспечивает согласованное использование понятий предметной области при описании различных свойств радиоэлектронной аппаратуры, интересующих обслуживающий персонал с точки зрения поиска возможного места и причины отказа.Однако модель *ДМО*, обеспечивая высокоуровневое описание РЭА в понятиях предметной области, не содержит средств, позволяющих определять требования к диагностической информации в форме условий на естественно-подобном языке, и средств предоставления диагностической информации в советующей форме.

Для использования предметных понятий и отношений естественного языка определяется и формализуется структура условий,определяющих требования к необходимой для поиска вероятного места и причины отказа диагностической информации. Эта структура предоставляет возможностьопределять условия $\hat{У}_{\Lambda}$ в рамках конструкций естественно-подобного языка. В качестве основы для формирования условий $\hat{У}_{\Lambda}$ целесообразно использовать подходописанный в [9] и основанный на совместном использовании предикатной модели запросов ПМ и языка схемно-ориентированных запросов (СОЯЗ). Предлагаемый в работе способ формирования условий усовершенствует указанный в [9] подход для определения требований к диагностической информа-

ции в конструкциях естественно-подобного языка с использованием понятий и терминов предметной области определенных в дескриптивной модели радиоэлектронной аппаратуры на основе онтологий.

Формирование $ДИ_{\Lambda}$ в виде совокупности элементов диагностических данных, удовлетворяющих условиям $\hat{У}_{\Lambda}$ осуществляется в соответствующем способе на основе предметной интерпретации условий, определяющих требования к необходимой диагностической информации. Предлагаемый способ обеспечивает автоматическое формирование $ДИ_{\Lambda}$ и предоставление в форме перечисления $Н_{П}(ДИ_{\Lambda})$ для последующей визуализации средствами СИП. В этом способе осуществляется интеграция моделей, обеспечивающих формирование дескриптивной модели ДМО, а также условий $\hat{У}_{\Lambda}$ в конструкциях естественно-подобного языка. Разнообразие используемых моделей в предлагаемом способе за счет интерпретации языка естественно-подобного языка позволяет отделить предметный аспект описания РЭА от аспекта, связанного спредставлением $ДИ_{\Lambda}$ в совокупности элементов диагностических данных на средствах визуализации СИП.

Предлагаемая структура метода формирования диагностической информации обеспечивает согласование концептуального представления РЭА и представления условий, определяющих требования к диагностической информации в конструкциях естественно-подобного языка. Таким образом, разрабатываемый метод формирования диагностической информации по дескриптивной модели радиоэлектронной аппаратуры на основе онтологий способствует сокращению времени восстановления ЗРВ на счет уменьшения времени формирования необходимой диагностической информации.

Библиографичесий список

1. Ожегов С.И. Толковый словарь русского языка: около 100 000 слов, терминов и фразеологических выражений / под ред. Л. И. Скворцова. - 26-е изд., испр. и доп. – М.: Оникс, 2009. – 1359 с.

2. Ефремова Т.Ф. Словарь грамматических трудностей русского языка: более 2 500 слов / Т. Ф. Ефремова, В. Г. Костомаров. - М.: Астрель, 2009. – 379 с.

3. ГОСТ Р ИСО 17359-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство по организации контроля состояния и диагностирования. Дата введения 1.1.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.

4. Швецов А.Н. Метод формирования концептуальной модели предметной области в задачах проектирования распределенных интеллектуальных информационных систем [Текст] / Интеллектуальные системы // Тр. Пятого Международ. Симпозиума. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002. – С. 49-51.

5. Ромашкин М.А., Мошев Е.Р. Разработка концептуальной модели поршневого компрессора для автоматизации информационной поддержки динамического оборудования [Текст] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. №10. – М., 2013. – С.28-31.

6. Концептуальная модель развития городов спутников Минска [Текст] / Т.С. Вертинская [и др.]; под общей редакцией Т.С. Вертинской; Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т экономики. - Минск: БеларусНаука, 2013 .- 196 с. ISBN 978-985-08-1604-7.

7. Воронин В.В. Разработка и исследование концептуальной диагностической модели технических объектов [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Хабаровск, 2006. – 333 с.

8. Анисимов О.В. Направления совершенствования систем информационной поддержки обслуживающего персонала при технической эксплуатации систем специального назначения // НаукоемкиетехнологиивкосмическихисследованияхЗемли. 2014. № 5. С. 44–52.

9. Анисимов О.В., Курчидис В.А., Попов Т.А. Концептуальное представление электрических схем радиоэлектронной аппаратуры на основе фреймовой модели [Текст] // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2015. — № 2. — С. 20 — 28.

O.V.Anisimov, V.A. Kurchidis, A.V. Yaschenko

FORMATION OF DIAGNOSTIC INFORMATION IN THE FORM OF ELEMENTS OF DIAGNOSTIC DATA ON THE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

Yaroslavl higher military college of anti-aircraft defense

Radio electronic equipment formalized representation in the form of properties set of its elements oriented to the technical diagnosis process execution by service staff is considered. Radio electronic equipment descriptive model based on the ontologies diagnostic information formation method structure providing the expressed in subject terms and concepts content of the equipment elements properties accordance with the conditions defining requirements for the characteristic type diagnostic information in constructions of natural language is proposed.

Key words: technical diagnosis, conceptual formalized representation, descriptive model, ontologies, radio electronic equipment.

УДК 534.782

М.В. Артамонов, А.В. Гришин, Н.А. Чащина, Е.Р. Штейн

СПОСОБ ОЦЕНКИ ОГИБАЮЩЕЙ КРАТКОВРЕМЕННОГО СПЕКТРА РЕЧЕВОГО ФРЕЙМА

ФНПЦ АО "НПП "Полет"

Предлагается способ улучшения оценки фильтра линейного предсказателя вокодера.
Ключевые слова: вокодер, линейное предсказание.

Для снижения скорости кодирования при приемлемом качестве восприятия восстановленной речи широко используются вокодеры с линейным предсказанием (рис. 1) [1, 2].

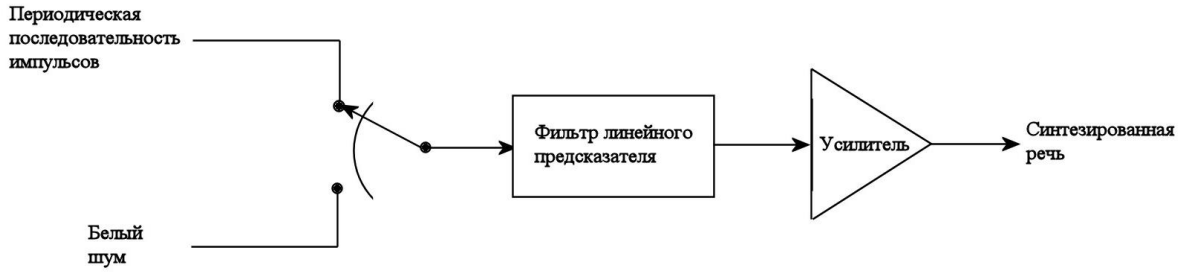


Рис. 1. Синтезатор речи вокодера с линейным предсказателем

В качестве сигналов возбуждения выступают: периодическая последовательность импульсов для вокализованных участков речи, белый шум – для невокализованных. Основным элементом, влияющим на восприятие и разборчивость синтезированной вокодером речи, является фильтр линейного предсказателя. В качестве фильтра линейного предсказателя обычно используется полюсная модель фильтра. Амплитудно - частотная характеристика (АЧХ) фильтра линейного предсказателя должна как можно точнее моделировать спектральную огибающую речевого фрейма.

Нередко при нахождении фильтра линейного предсказателя точность моделирования страдает. Особенно часто это происходит на вокализаванных фреймах с высоким основным тоном (рис. 2). Для линейного предсказателя здесь использован полюсной фильтр пятого порядка. Видно, что при синтезе речи первая гармоника основного тона окажется существенно подчеркнутой на фоне других гармоник.

Для оценки фильтра линейного предсказателя используются несколько центральных отсчетов автокорреляционной функции речевого фрейма или несколько первых коэффициентов обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) квадрата АЧХ речевого фрейма. Хорошее качество оценки основного тона удается получить ведя обработку в частотной области [3]. При обработке в частотной области оказывается удобным использовать первые N коэффициентов обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) квадрата АЧХ речевого фрейма. Например, для фильтра пятого порядка N=6. На основе этих коэффициентов составляется система уравнений, которая решается методом Левинсона-Дурбина [1]. Исходя из этого перед вычислением ОБПФ можно провести определенную обработку спектра речевого фрейма, т.н. сглаживание. Хорошие результаты достигаются при применении кепстрального сглаживания [4]. Можно предложить вычислительно более простой способ сглаживания.

Из радиотехники известно устройство – амплитудный детектор [5], который оценивает амплитудную огибающую некоторого сигнала (рис. 3).

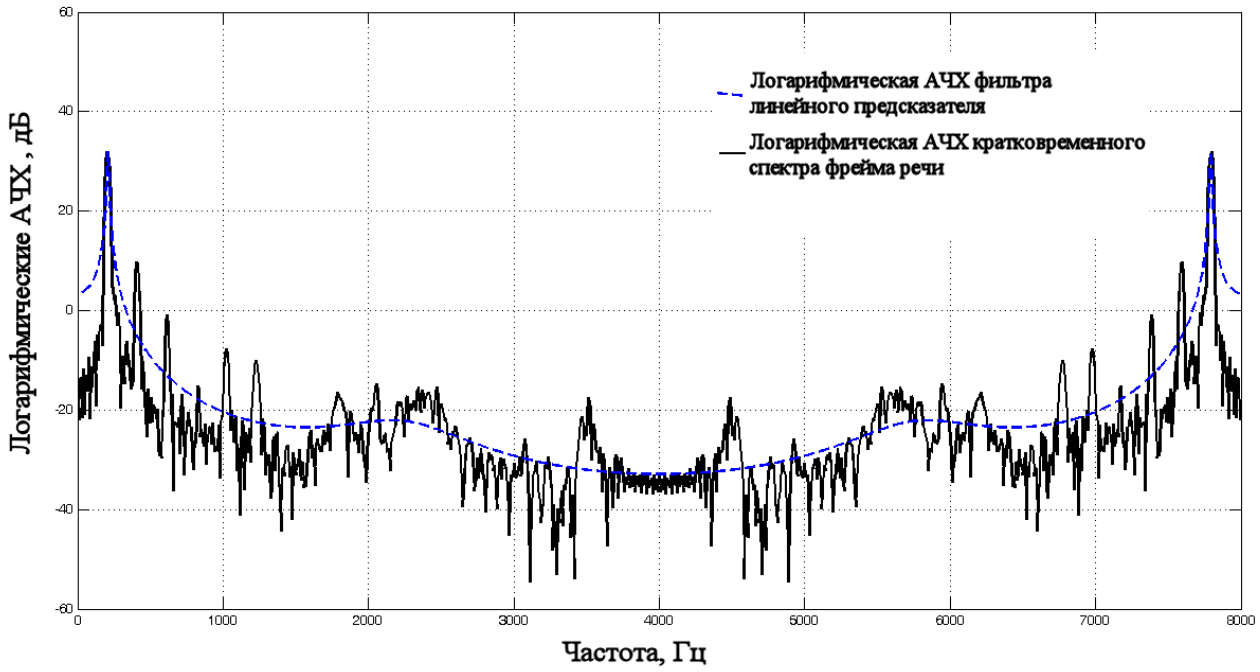


Рис. 2. Логарифмические АЧХ кратковременного спектра фрейма речи и фильтра линейного предсказателя

Математическая модель идеального амплитудного детектора достаточно проста. При превышении входным сигналом выходного, идеальный амплитудный детектор мгновенно доводит свой выходной сигнал до уровня входного. Когда же входной сигнал ниже выходного, уровень сигнала на выходе детектора опускается с заданной скоростью.

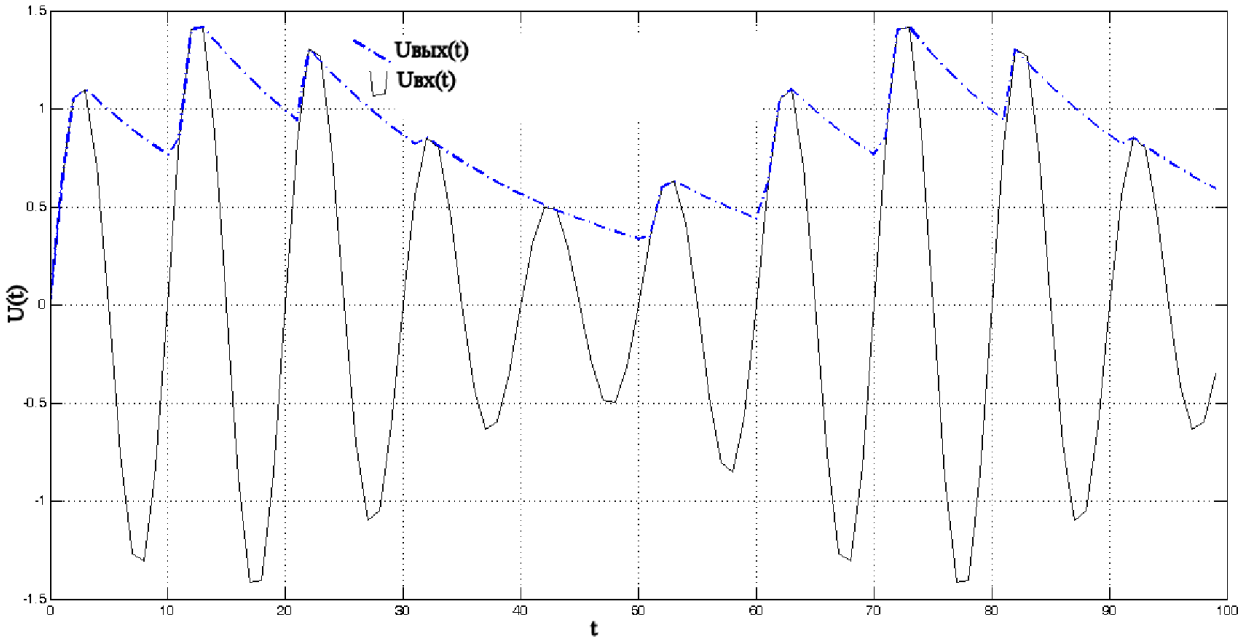


Рис. 3. Пример входного и выходного напряжений амплитудного детектора

Фактически для оценки фильтра линейного предсказателя желательно провести амплитудное детектирование, но в частотной области. Применим амплитудный детектор к кратковременному спектру речевого фрейма (рис. 4).

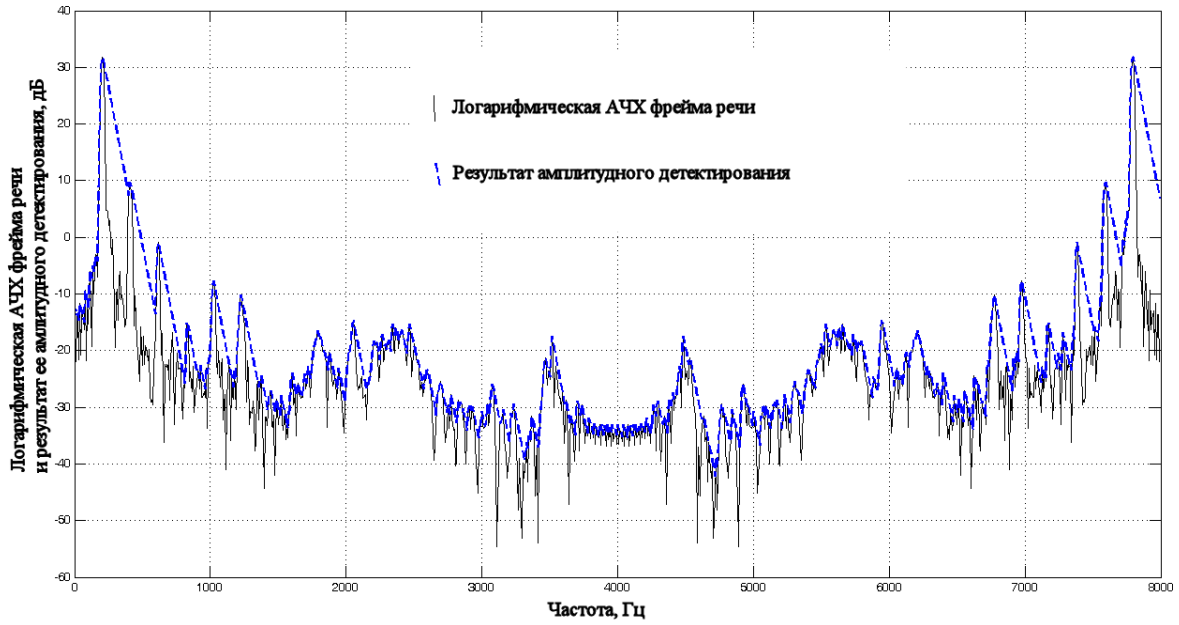


Рис. 4. Логарифмическая АЧХ фрейма речи и результат ее амплитудного детектирования

Из рисунка видно, что провалы между пиками на частотах, кратных частоте основного тона, в существенной мере убраны. Однако результат детектора асимметричен относительно оси ординат. Для устранения асимметрии в результате детектирования логарифмической АЧХ речевого фрейма предлагается дополнительно пройти по этой характеристике амплитудным детектором в противоположном направлении, и из результатов прохождения по логарифмической АЧХ амплитудным детектором в каждом отсчете по частоте выбрать максимальное значение из двух проходов (рис. 5).

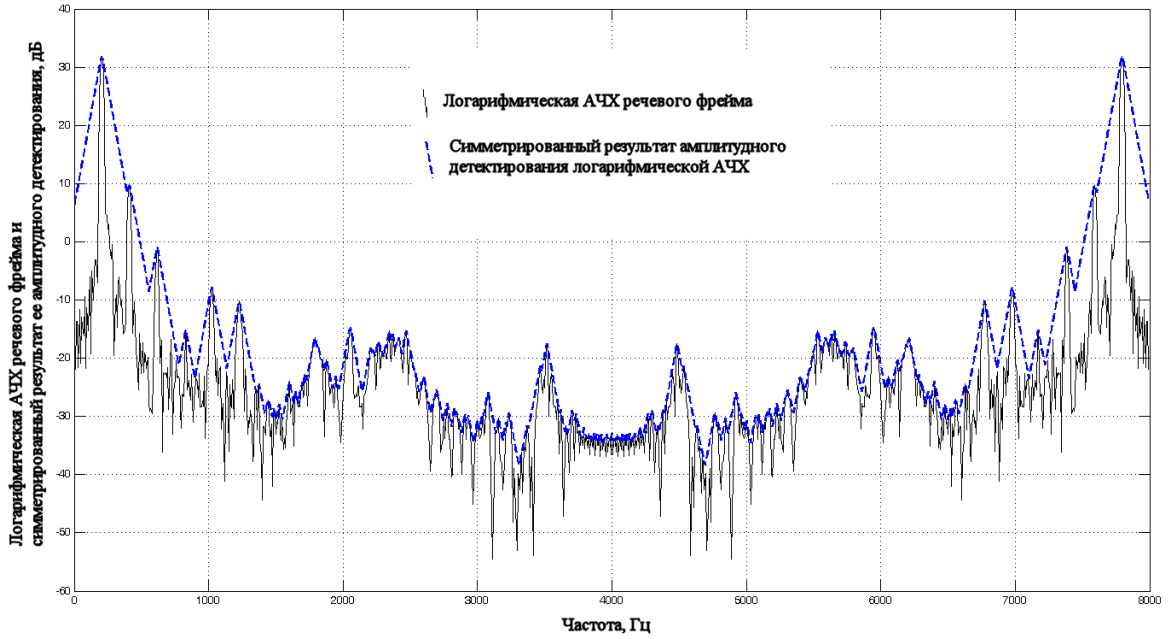


Рис. 5. Логарифмическая АЧХ фрейма речи и симметрированный результат ее амплитудного детектирования

При амплитудном детектировании логарифмической АЧХ, использован линейный спад выхода амплитудного детектора, что эквивалентно экспоненциальному спаду в линейной области.

Если использовать для нахождения фильтра линейного предсказателя первые коэффициенты ОБПФ от симметрированного результата амплитудного детектирования АЧХ, то найденный таким образом фильтр линейного предсказателя будет точнее моделировать огибающую кратковременного спектра фрейма речи (рис. 6).

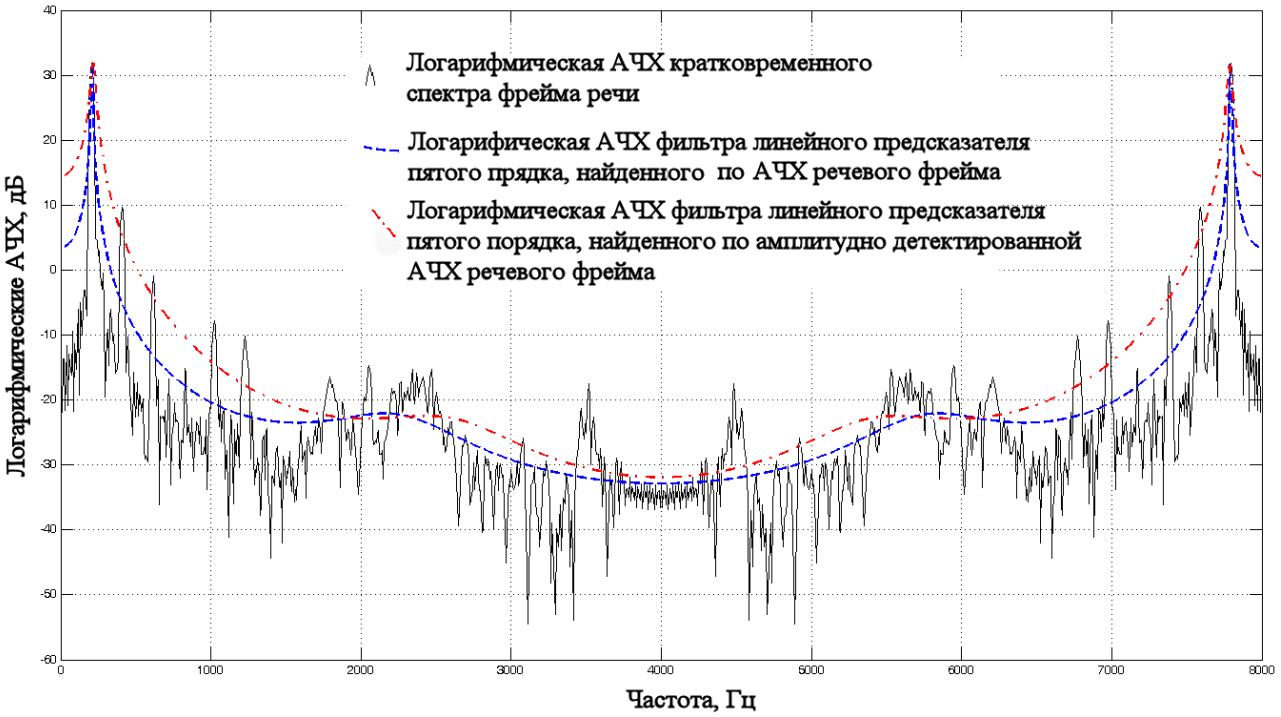


Рис. 6. Логарифмические АЧХ кратковременного спектра фрейма речи и логарифмические АЧХ двух фильтров линейного предсказателя

Результат амплитудного детектирования АЧХ кратковременного спектра речевого фрейма может быть дополнительно сглажен, например, путем фильтрации. Даже свертка с обычным прямоугольным фильтром небольшого порядка существенно сглаживает оставшиеся неровности.

Полученная таким способом огибающая кратковременного спектра фрейма речи может быть использована для его выравнивания и дальнейшего использования уже выравненной АЧХ кратковременного спектра фрейма речи для определения частоты основного тона в спектральной области.

Коллективом НПП "Полет" проведены исследования данного метода, и получен результат улучшения оценки субъективного восприятия (PESQ) восстановленной синтезированной речи при использовании для оценки фильтра линейного предсказателя результата амплитудного детектирования кратковременного спектра речевого фрейма.

Библиографический список

1. Jacob Benesty, M. Mohan Sondhi, Yiteng Huang (Eds.). Springer Handbook of Speech Processing. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
2. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов: пер. с англ. –М.: Радио и связь, 1981.

3. Kondos A.M. Digital Speech. Coding for Low Bit Rate Communications Systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2004.
4. Demio Schwarz, Xavier Robert. Spectral Envelope Estimation and Representation for Sound Analysis-Synthesis. – Universitat Stuttgart,Fakultat Informatik, Stuttgart, Germany.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1977.

M.V. Artamonov, A.V. Grishin, N.A. Chashina, E.R. Stein

SHORT-TIME SPECTRUM ENVELOPE ESTIMATION METHOD FOR SPEECH FRAME

Suggested one method of improving preprocessing for linear predictor filter estimation.

Key words: Vocoder, linear predictor, LPC synthesis filter.

УДК 629.7.054.7

Д.А. Быстров

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРИМЕТРА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Описан принцип формирования информационных сигналов лазерного гироскопа и способы их обработки. Разработана методика оценки параметров, влияющих на регулировку напряжений,подаваемых на пьезопреобразователи лазерного гироскопа. Предложен алгоритм стабилизации, обеспечивающий сохранение периметра резонатора за счет применения рассчитанных параметров.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, стабилизация, резонатор, пьезопреобразователь, коэффициент чувствительности.

Введение

Одним из параметров, влияющим на работу лазерного гироскопа (ЛГ), является частота генерации кольцевого лазера (КЛ) [2]. Частота генерации определяется длиной резонатора ЛГ и соответствующей собственной частотой резонатора. Поддержание стабильной частоты генерации возможно за счет компенсации изменения периметра резонатора с помощью управляемого элемента. Для этих целей в конструкции ЛГ применяются пьезокерамичические преобразователи, изменяющие свою форму при подаче на них напряжения. На них крепятся зеркала резонатора КЛ, которые, перемещаясь вместе с преобразователями, изменяют длину периметра оптического контура.

При испытанияхс целью оценкиточностных характеристик генератора ЛГ с тремя пьезопреобразователями (ППр) необходимо обеспечить сохранение периметра резонатора при изменении величин подаваемых напряжений.

В процессе проведения испытаний были выявлены значительные отклонения величины мощности излучения в контуре от максимума, что приводит к некорректности получаемых измерений. Было сделано предположение о несоответствии характера движения оптических зеркал резонатора и подаваемых на ППр с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) напряжений (при одном и том же подаваемом напряжении разные керамики изгибаются по-разному).

Основная часть

При проведении испытаний ЛГ информационные сигналы, полученные с фотоприемника, после усиления поступают на входы АЦП персонального компьютера. По информационным сигналам проводится расчет угловой скорости, величины зоны захвата[1], а также величины мощности излучения в оптическом контуре вследствие отсутствия в конструкции генератора мощностного фотоприемника.

Результаты испытаний показали, что при работе алгоритма изменения подаваемых на ППр напряжений, рассчитанные значения мощности изменяются в 2 раза – от 0.7 до 1.4 абсолютных единиц (рисунки 1-2).

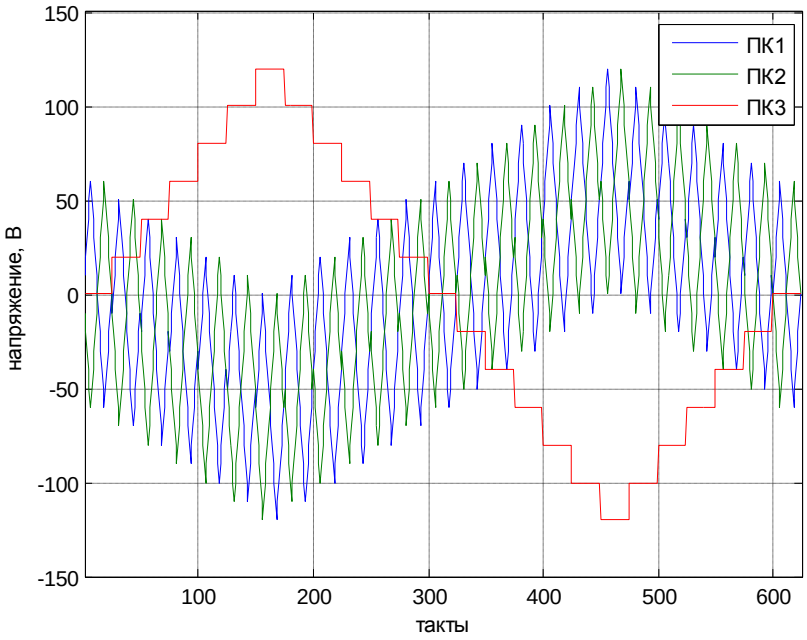


Рисунок 1. Изменение напряжений на трех ППр в процессе проведения испытаний

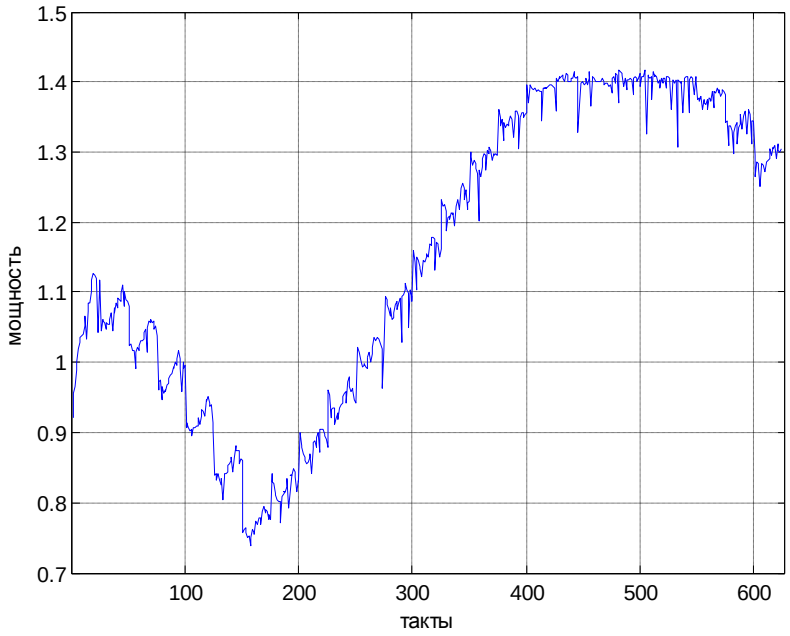


Рисунок 2. Рассчитанная величина мощности при изменении напряжений

Управление периметром осуществляется тремя независимыми цепями, формирующими высоковольтные сигналы на каждое пьезозеркало. Подача напряжений на пьезокорректоры(ПК) генератора ЛГ осуществляется с помощью СПО пульта управления (рисунок 3).

Выходные напряжения (*U*1′, *U*2′, *U*3′) могут иметь отличные от заданных (*U*1, *U*2, *U*3) значения вследствие того, что коэффициенты преобразования напряженийпульта (*k*1, *k*2, *k*3) имеют непостоянный и нелинейный характер изменения при сканировании напряжений в диапазоне -150 В...+150 В. Также следует учитывать различие коэффициентов преобразования для каждого ППр, которое напрямую влияет на работу алгоритмов стабилизации периметра резонатора.

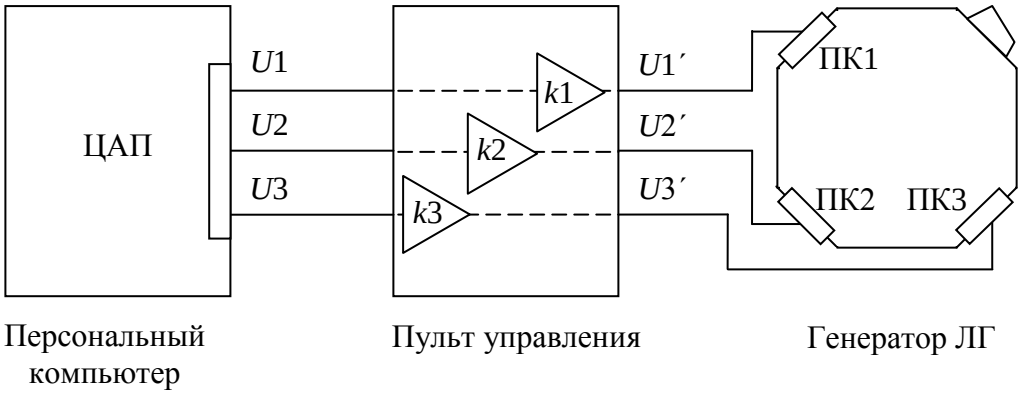


Рисунок 3. Схема рабочего места проведения испытаний генератора ЛГ с тремя пьезокорректорами

Для корректной работы алгоритмов необходимо учитывать коэффициенты преобразования пульта при формировании подаваемых на ППр напряжений.

Проведены испытания с целью оценки коэффициентов преобразования. В результате был получен массив измерений, содержащий:

- столбец с данными о входном напряжении, изменяющимися в диапазоне -4В…+4В с фиксированным шагом (одинаковый для всех ППр);
- 3 столбца с соответствующими выходными напряжениями ($U1'$, $U2'$, $U3'$), изменяющимися в диапазоне -125В…+125В с фиксированным шагом.

Коэффициенты преобразования $k1$, $k2$, $k3$ для каждого ППррассчитывались по формулам:

$$k1 = \frac{U1'}{U1}; \quad k2 = \frac{U2'}{U2}; \quad k3 = \frac{U3'}{U3}.$$

Проведенные расчеты на основе результатов испытаний показали, что коэффициенты различны для каждого пьезокорректора и имеют нелинейный характер изменения в диапазоне входных напряжений -1В…+1В. Для получения необходимого выходного напряжения нужно ввести коррекцию в алгоритм формирования управляющих напряжений с учетом коэффициентов преобразования.

Для крайних диапазонов сканирования -4В…-1В и +1В…+4В коэффициенты преобразования рассчитаны путем осреднения на каждом из участков.

Для определения коэффициентов преобразований в диапазоне -1В…+1В были рассчитаны аппроксимирующие полиномы 3-й степени на основе массивов измерений входного и выходного напряжений каждого ППр.

Таким образом, используя полученные соотношения, можно определить, какое необходимо задать входное напряжение $U1, U2, U3$ на ЦАП для получения необходимого управляющего напряжения $U1', U2', U3'$ на ППр генератора:

- для крайних участков: $U1 = \frac{U1'}{k1}; \quad U2 = \frac{U2'}{k2}; \quad U3 = \frac{U3'}{k3};$

$$U1 = p_{11}U1'^3 + p_{12}U1'^2 + p_{13}U1' + p_{14},$$

- для начальных участков: $U2 = p_{21}U2'^3 + p_{22}U2'^2 + p_{23}U2' + p_{24},$

$$U3 = p_{31}U3'^3 + p_{32}U3'^2 + p_{33}U3' + p_{34},$$

где p_{ij} - коэффициенты полиномов, $i = 1,2,3, \; j = 1,2,3,4.$

Введение коррекции задаваемого на ЦАП напряжения обеспечило его соответствие подаваемому на ППр напряжению. Однако, для сохранения периметра резонатора необходимо синхронное изменение положений трех зеркал, следовательно, управление напряжениями должно также осуществляться синхронно для трех ППр.

Для корректной работы алгоритма управления напряжениями на ППр необходимо оценить так называемые коэффициенты чувствительности каждого пьезокорректора, чтобы впоследствии учитывать их при формировании управляющих напряжений.

Проведены испытания, при которых задавалось изменение подаваемого напряжения на один из трех ППр в диапазоне -140В…+140В, при этом на два других подается фиксированное значение напряжения (0 В). Данная операция повторяется отдельно для каждого ППр. По полученным информационным сигналам проводился расчет величины мощности.

Далее для полученных массивов необходимо определить значения напряжений, при которых величина мощности достигает максимума. Количество вольт, отделяющее одну такую точку от другой, определяет так называемое межмодовое расстояние. Для данного генератора с тремя ППр расстояние для ПК1 составляет R_1 = 170,85 В, для ПК2 R_2 = 181,49 В, для ПК3 R_3 = 134,65 В.

Длина волны λ генерируемого излучения в резонаторе – фиксированная величина (0,633 мкм), что дает возможность провести оценки коэффициентов чувствительности на основе величины межмодового расстояния. Возьмем за базовое межмодовое расстояние R_1 и примем коэффициент чувствительности ПК1 равным единице: $K_1 = \frac{R_1}{R_1} = 1.$ Коэффициенты для других ППр рассчитываем на основе R_1: $K_2 = \frac{R_2}{R_1} = 1.0623;\quad K_3 = \frac{R_3}{R_1} = 0.7881.$

Полученные коэффициенты применяются при расчете входного напряжения на ЦАП:

$$U1 = K_1 \cdot U1;\quad U2 = K_2 \cdot U2;\quad U3 = K_3 \cdot U3.$$

Таким образом, при расчете входных напряжений учитываются коэффициенты чувствительности трех ППр, что позволит обеспечить синхронное управление положениями всех трех зеркал.

В процессе функционирования алгоритмов измерения точностных характеристик ЛГ при изменении подаваемых на ППр напряжений необходимо обеспечить поддержание определенного оптического периметра резонатора.

Кроме поддержания среднего значения напряжения $U_{sr} = (U1 + U2 + U3)/3$, необходимо реализовать коррекцию подаваемого напряжения на основе информации о текущей мощности излучения в резонаторе.

Была проведена доработка ПО рабочего места в части работы алгоритма стабилизации периметра. Разработанный алгоритм стабилизации периметра ЛГ включает в себя следующие операции:

1. Выход на одну из точек максимума мощности с помощью задания соответствующих напряжений $U1 = U2 = U3$.
2. Расчет текущего значения мощности $W_{\text{тек}}$.
3. Оценка величин мощности при изменении напряжения *U3* на величину ±Δ В. Сравнение полученных значений мощности и $W_{тек}$, определение наибольшего– $W_{\text{макс}}$.
4. Замена $W_{\text{тек}}$ на $W_{\text{макс}}$: $W_{\text{тек}} = W_{\text{макс}}$.
5. Повтор пунктов 3-4 до достижения условия $W_{\text{макс}} == W_{\text{тек}}$.

При значении Δ=0,5 В процесс поиска локального экстремума мощности на одном «холме» занимает не более 1-2 секунд, изменение значения напряжения проводится только по истечении данного времени, после окончания работы алгоритма стабилизации периметра. Рассмотренный алгоритм стабилизации был введен в процесс регулировки напряжений на ППр (рисунок 1). Результаты измерения мощности излучения представлены на рисунке 4.

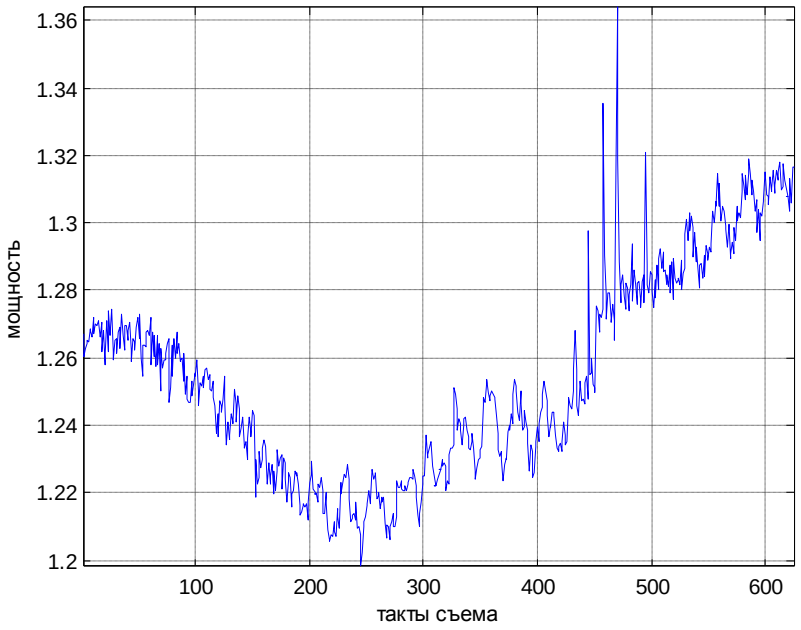


Рисунок 4. Рассчитанная величина мощности при изменении напряжений на трех ППр

Согласно рисунку 4, применение рассчитанных коэффициентов вместе с реализацией алгоритма стабилизации позволяет существенно уменьшить нестабильность величины мощности при проведении испытаний – менее 10% от измеренной величины.

Выводы

Проведено исследование параметров регулировки напряжений, подаваемых на пьезопреобразователи ЛГ, и их влияния на точность стабилизации периметра КЛ. Разработаны методики оценки параметров, таких как коэффициенты преобразования пульта управления генератором ЛГ и коэффициентов чувствительности пьезокорректоров резонатора.

В результате применения полученных коэффициентов при расчете управляющих напряжений и реализации алгоритма стабилизации периметра была повышена устойчивость величины мощности излучения в периметре при изменении напряжений на ППр, что позволяет говорить о корректности получаемых измерений ЛГ.

Описанные работы найдут применение при реализации системы управления зоной нечувствительности генератора, что в итоге приведет к улучшению точностных характеристик ЛГкак прибора в инерциальной системе ориентации и навигации.

Библиографический список

1. Федоров А.Е., Зборовский В.А., Рекунов Д.А. Оценка точностных параметров резонатора лазерного гироскопа в производстве // СПб: Материалы конференции МКИНС-2014, 2014.
2. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы / Филатов Ю.В. // СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2005.

D.A. Bystrov

DEVELOPMENTOFSTABILIZATIONALGORITHMFORLASERGYROSCOPEOPTICPERIMETERUSINGPARAMETERS OF VOLTAGECONVERTING

Arzamas Polytechnical Institute a branch of Nizhniy Novgorod State technical university n. a. R.E. Alekseev

The principle of information signals formation in a laser gyroscope and methods of their processing are described. A technique for estimating the parameters that affect the adjustment of the voltages applied to the laser gyroscope piezoelectric converters is developed. A stabilization algorithm is proposed that ensures the preservation of the perimeter of the resonator by using the calculated parameters.

Keywords: lasergyroscope, stabilization, resonator, piezoelectricconverter, sensitivity coefficient.

УДК 621.396

А.А. Виноградов, И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов

ПРИМЕНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПИСАРЕНКО В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ С OFDM-МОДУЛЯЦИЕЙ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В работе рассмотрена модификация метода оценки взаимной временной задержки сигналов с OFDM-модуляцией на основе нелинейного фильтра, построенного на подходе гармонического разложения Писаренко. Выполнен анализ работы данного метода в условиях низкого отношения сигнал/шум, а также при наличии эффекта Доплера в системе связи, что приводит к сдвигу несущей частоты и масштабированию спектра OFDM-сигнала по причине его широкой спектральной полосы. Получена зависимость вероятности верной оценки временной задержки от значения отношения сигнал/шум для данного метода и для метода на основе квадратичной фильтрации.

Ключевые слова: временная задержка, OFDM-сигнал, нелинейная фильтрация.

В современных спутниковых системах связи одной из наиболее актуальных проблем является решение задачи определения местоположения источника радиоизлучения методами пассивной пеленгации. Данная задача актуальна, к примеру, для осуществления коммутации и установления сеанса связи космическими аппаратами спутниковых систем связи. При этом для установления сеанса связи необходимо сформировать диаграмму направленности при помощи находящейся на борту космического аппарата фазированной антенной решётки, а для задания направления луча необходимо знать местоположение объекта, и определять его в реальном масштабе времени. Другим примером применения методов пассивной пеленгации является задача проектирования спутниковых поисково-спасательных систем. Одним из наиболее распространенных методов определения местоположения объекта является разностно-дальномерный метод, при реализации которого возникает задача оценки взаимных временных задержек между искаженными копиями излученного сигнала, распространяющимися по разным каналам в условиях низкого отношения сигнал/шум (ОСШ).

Современные системы связи используют широкополосные сигналы, которые позволяют повысить устойчивость к шумам, а также улучшают надежность каналов передачи информации в сложных условиях распространения сигналов. Одним из видов расширения спектра, который используется в сетях мобильной радиосвязи с множественным доступом, является технология ортогонального частотного мультиплексирования большого количества частотных составляющих (поднесущих) сигнала (OFDM-модуляция). OFDM-модуляция является цифровой схемой модуляции, использующей большое количество близко расположенных ортогональных поднесущих. Основным преимуществом данного вида модуляции является его возможность противостоять сложным условиям распространения сигнала. Сигнал с OFDM-модуляцией описывается следующим выражением [1]:

$$S[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} Z_k \exp[2j\pi nk/N], \quad (1)$$

где N – количество поднесущих, n – индекс временного отсчета, k – индекс поднесущей, Z_k – комплексный элемент сигнального созвездия, соответствующий передаваемой битовой последовательности.

Классический метод оценки временной задержки широкополосных сигналов, основанный на максимизации функционала правдоподобия и сводящийся к вычислению взаимной функции неопределённости сигналов [2], в условиях существенного влияния масштабирования спектра вследствие эффекта Доплера, не дает состоятельных оценок.

Для определения взаимной временной задержки OFDM-сигналов предлагается метод, основанный на разбиении широкополосных сигналов на M частотных каналов с помощью

набора полосовых фильтров с последующим применением цифровой нелинейной фильтрации к сигналам в этих каналах [3,4]. Общая схема алгоритма представлена на рисунке 1. $s(t)$ и $\tilde{s}(t)$ – входные сигналы, между которыми необходимо определить задержку, H_i – линейный полосовой фильтр, G_i – нелинейный фильтр, R_i – взаимная корреляционная функция одной пары выходов нелинейного фильтра, R – главная взаимная корреляционная функция, получающаяся в результате сложения функций R_i, $0<i<M$, M – количество выделенных каналов.

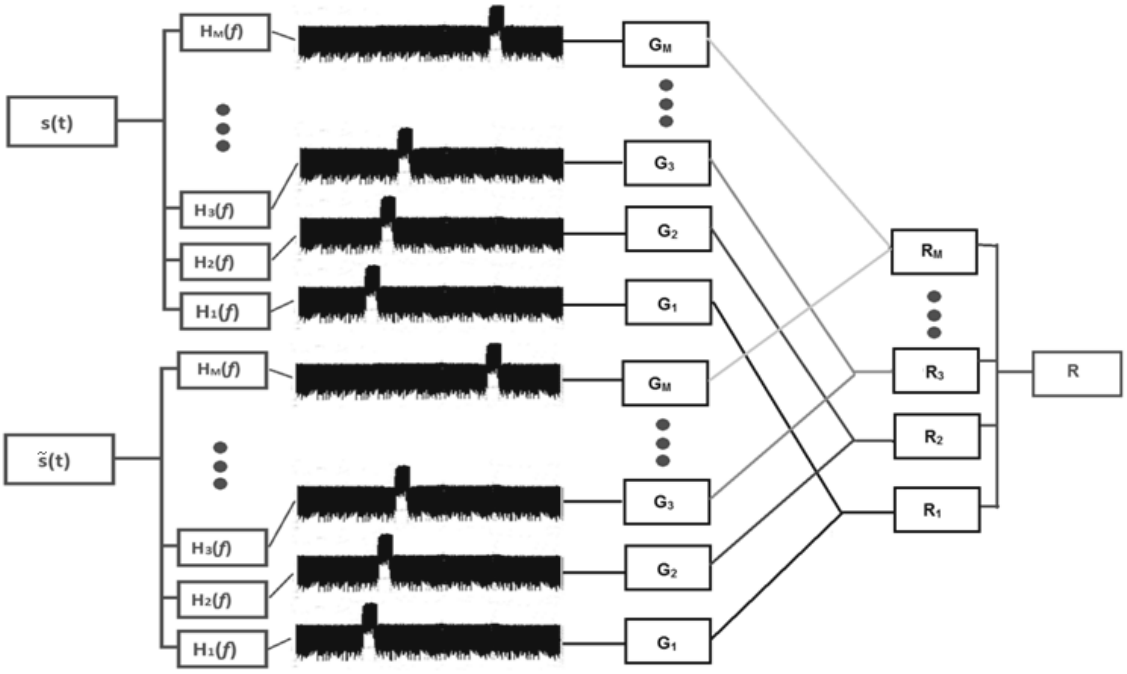


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки взаимной временной задержки OFDM-сигналов

Ширина и центральная частота каждого канала задаются на начальном этапе работы алгоритма и являются параметрами полосовых фильтров. Увеличение вычислительной эффективности метода и экономия требуемой памяти может достигаться за счет выбора оптимального количества M выделяемых каналов.

Для двух наборов из M узкополосных сигналов, полученных от опорного и исследуемого сигналов, предлагается применить алгоритм нелинейной фильтрации [3]. В качестве фильтра предлагается использовать цифровой адаптивный фильтр на основе гармонического разложения Писаренко.

Данный метод сводится к обработке исходных сигналов адаптивным цифровым фильтром (исходным сигналом для адаптивного цифрового фильтра является выход полосового фильтра, обозначенного на рисунке 1 как H_i), который заменяет отсчеты сигнала отсчетами другой функции, будем называть ее «функция текущей частоты». Для формирования данной функции используется «скользящее» вычисление отсчетов автокорреляционной функции сигнала и метод гармонического разложения Писаренко [3] для определения отсчетов функции текущей частоты.

Для нахождения значений частот методом гармонического разложения Писаренко составляется теплицева матрица R_{xx} и решается матричное уравнение следующего вида:

$$R_{xx}A=\sigma_n^2 A, \qquad (2)$$

где σ_n^2 – дисперсия шума, A – вектор параметров авторегрессионной модели [5], являющийся собственным вектором, $A=(a_{0,},...,a_{2p})$. Известно, что дисперсия шума в случае процессов в виде синусоид в белом шуме соответствует минимальному собственному значению матрицы R_{xx} [3].

Из уравнения (2) определяется собственный вектор $\vec{A}=(a_{0,},...,a_p)^T$, из коэффициентов которого формируется полином относительно *z*:

$$a_0 z^p + a_1 z^{p-1} + ... + a_p = 0. \quad (3)$$

Комплексные корни полинома (3) определяют текущую частоту:

$$z_i = \exp[j2\pi f_i \Delta t] \quad (4)$$

В данной работе использовалось скользящее окно длиной 3 отсчета. В данном случае полином представляет собой квадратное уравнение в комплексных числах:

$$z^2 + a_1^{'} z + a_2^{'} = 0, \quad (5)$$

при этом $\vec{A}=\left(1,\frac{a_1}{a_0},\frac{a_2}{a_0}\right)^T$. Значение частоты определяется согласно следующему выражению:

$$f = arctg\left(\frac{\mathrm{Im}(z)}{\mathrm{Re}(z)}\right). \quad (6)$$

Процесс формирования функции текущей частоты можно разделить на несколько этапов:

1. Выбирается длина «скользящего» окна *L* (количество отсчетов сигнала, по которому вычисляются отсчеты АКФ, в данной работе выбрано *L* = 3).
2. Составляется теплицева матрица R_{xx}, определяется минимальное собственное число $\lambda_{\min}$ и соответствующий ему собственный вектор $\vec{A}=\left(1,a_1^{'},a_2^{'}\right)^T$.
3. Решается квадратное уравнение, составленное из коэффициентов a_i, находится значение текущей частоты.
4. Окно передвигается на 1 отсчет, переход к пункту 2.

Функция текущей частоты вычисляется для каждого узкополосного канала опорного и исследуемого сигналов. Таким образом, получаем два набора функций текущей частоты, соответствующих опорному и исследуемому сигналу. Для оценки временной задержки может быть напрямую применен метод максимального правдоподобия, заключающийся в вычислении взаимной корреляционной функции (ВКФ) $R_i[n]$.

Недостаточная выраженность главного максимума взаимной корреляционной функции одной пары выходов фильтра не позволяет с необходимой точностью оценивать временную задержку сигналов. Предлагается вычислить усредненную взаимную корреляционную функцию методом поэлементного суммирования *M* взаимных корреляционных функций, полученных на предыдущем этапе:

$$R[n] = \sum_{i=0}^{M} \left| R_i[n] \right|, \quad (7)$$

где $R_i[n]$ – *n*-ый отсчет взаимной корреляционной функции *i*-ой пары узкополосных сигналов.

На рисунках 2-4 представлены главные взаимные корреляционные функции при количестве обрабатываемых узкополосных каналов *M* = 1, 5, 20 соответственно.

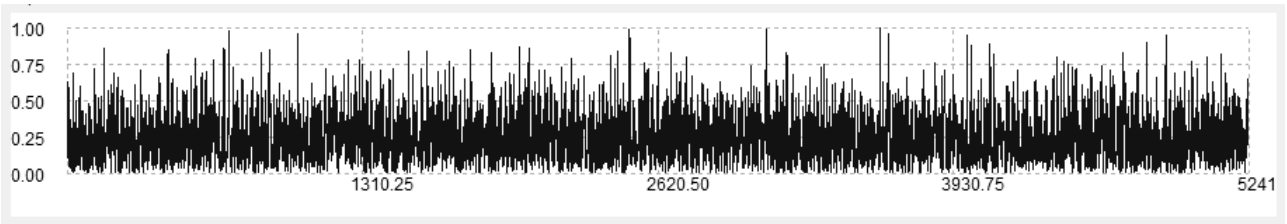


Рис. 2. Усредненная ВКФ, *M* = 1

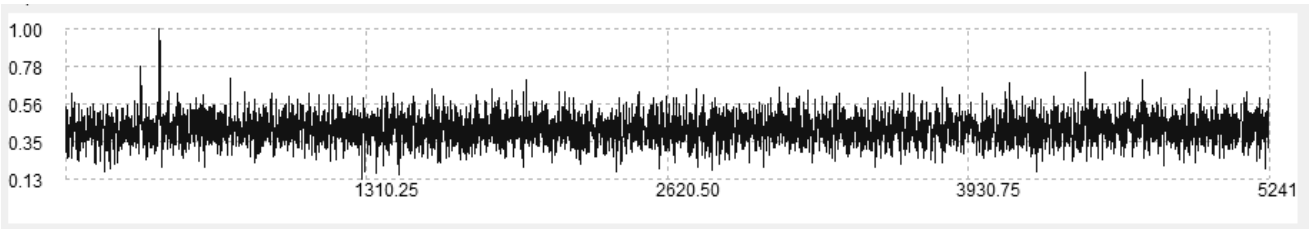


Рис. 3. Усредненная ВКФ, M = 5

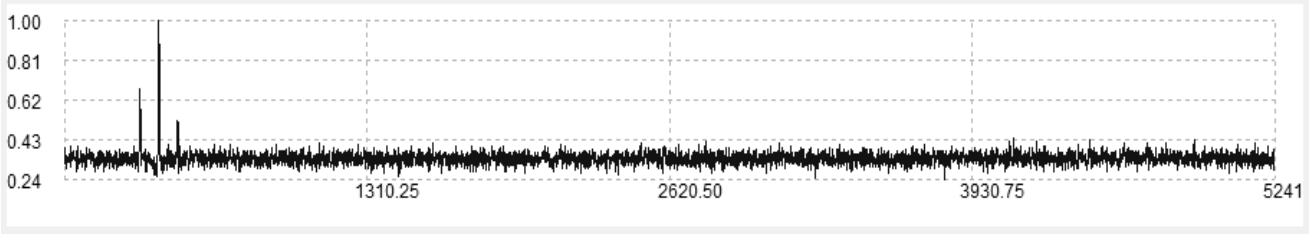


Рис. 4. Усредненная ВКФ, *M* = 20

На рисунках 2-4 наблюдается значительное улучшение выраженности главного максимума взаимной корреляционной функции при увеличении количества обрабатываемых узкополосных каналов. При количестве обрабатываемых каналов $M = 20$ ВКФ имеет ярко выраженный главный максимум, соответствующий взаимной временной задержке между сигналами.

Проведен анализ работы метода в условиях низкого отношения сигнал/шум и построена зависимость вероятности верной оценки взаимной временной задержки от отношения сигнал/шум. Аналогичная зависимость построена для метода на основе квадратичной фильтрации [6], результат приведен на рисунке 5.

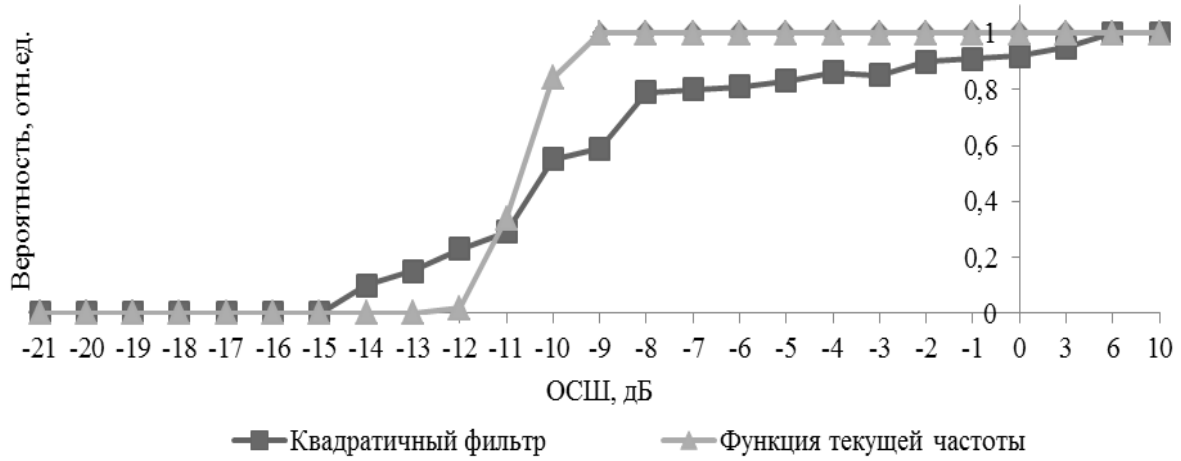


Рис. 5. Зависимость вероятности верной оценки взаимной временной задержки от отношения сигнал/шум

Можно заметить, что метод на основе вычисления функции текущей частоты более устойчив и «выходит» на высокое значение вероятности верной оценки взаимной временной задержки при более низком ОСШ.

Таким образом, предложенный в работе алгоритм оценки взаимной временной задержки сигналов является устойчивым к шумам вплоть до ОСШ, равного -12 дБ. Предложенный подход может быть положен в основу алгоритма определения местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом.

Библиографический список

1. Бакулин, М.Г. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 360 с.
2. Казаринов, Ю.М. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю.М. Казаринов. – М.: Высш.шк., 1990. – 496 с.
3. Морозов, О.А. Определение временной задержки сигналов методом адаптивной цифровой фильтрации. / О.А. Морозов, Е.А. Солдатов, В.Р. Фидельман // Автометрия, №2, 1995. – С. 108-113.
4. Ершов, Р.А. Оценка взаимной временной задержки сигналов с псевдослучайной скачкообразной перестройкой частоты / Р.А. Ершов, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия вузов. Радиофизика. –2015. – Т.58, № 2, С.157.
5. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Виноградов, А.А. Метод оценки взаимной временной задержки широкополосных сигналов с OFDM-модуляцией на основе квадратичной фильтрации / А.А. Виноградов, И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов // 19-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2017», доклады, Т.1, Москва, 2017. – с. 341-345.

A.A. Vinogradov, I.V. Grin, R.A. Ershov, O.A. Morozov

THE PISARENKO HARMONIC DECOMPOSITION BASED METHOD IN MUTUAL TIME DELAY OF ULTRA-WIDEBAND OFDM-SIGNALS ESTIMATING

Lobachevski State University of Nizhniy Novgorod

Authors of this paper propose a modification of the mutual time delay estimating method approbated on ultra wideband OFDM-modulated signals. A method bases on several narrowband channels segregation from the OFDM signal, and following nonlinear digital filtering of each channel and cross-correlation function calculation. The segregation of a set of narrow-band channels and their subsequent processing makes it possible to compensate spectrum distortions, due to their narrow spectral band and the consequent possibility of neglecting the influence of Doppler Effect. As a nonlinear filter, an adaptive digital filter was chosen. It is based on the Pisarenko harmonic decomposition and replacing the samples of the input signal with samples of the "current frequency function".

Key words: mutual time delay, OFDM-signal, non-linear filtration.

УДК 621.396.67

Е.Л. Варенцов, М.И. Дудкин, И.А. Илларионов

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ МЕТОДОМ ИНВЕРСНОГО АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА

Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований коэффициента отражения различных материалов в свободном пространстве методом инверсного апертурного синтеза. Применение метода позволило провести измерения характеристик материалов малых геометрических размеров в свободном пространстве.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, инверсный апертурный синтез, коэффициент отражения, эффективная поверхность рассеяния.

Введение

Разработка методов и методик измерений характеристик радиопоглощающих материалов является актуальной задачей по причине широкого применения таких материалов в УВЧ, СВЧ технике, антенных системах, антенных измерениях. При разработке антенных систем основное внимание также уделяют материалам, применяемым в их конструкции, это подложки, радиопрозрачные крышки, обтекатели и прочие конструктивные элементы, выполненные из диэлектрических материалов. Для снижения радиолокационной заметности объектов применяются специализированные виды материалов и покрытий, исследование которых на стадии разработки так же актуально.

Существуют подробно изученные методы измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов в свободном пространстве [1], основанные на сравнении принятой мощности, отраженной от образца испытуемого материла, с мощностью, отраженной от металлической поверхности тех же геометрических размеров. Измерения проводятся в условиях размещения испытуемого образца материала в дальней зоне измерительных антенн в случае бистатической схемы или одной антенны в моностатической схеме измерения. Таким образом, для обеспечения подобных измерений требуется изготовление образцов материалов значительных геометрических размеров, что требуется для перекрывания основного лепестка диаграммы направленности измерительных антенн. Однако, в силу технологических особенностей производства материалов это часто невозможно и недопустимо по финансовым причинам. Заметим также, что измерения с применением описанных выше методов должны проходить в больших безэховых камерах, а к используемым антеннам предъявляются дополнительные требования по обеспечению необходимой формы ДН – это прежде всего остронаправленные антенны. Таким образом, становится актуальной задача разработки методов измерения характеристик радиопоглощающих и диэлектрических материалов в ближней зоне антенн, что позволит снизить требования, как к измерительным антеннам, так и к размерам измеряемых образцов.

В данной работе для измерения коэффициента отражения образцов материалов малых геометрических размеров используется метод инверсного апертурного синтеза (ИАС) [2].

Суть метода ИАС [3] заключается в следующем (рис.1). Объект представляется как набор точечных, независимых и ненаправленных рассеивателей с координатами ρ, ϕ, имеющий возможность вращаться по оси θ (азимут) по отношению к направлению на освещающую антенну. Излучающая антенна (Е), расположенная в ближней зоне объекта на расстоянии R_1 от центра вращения объекта, формирует электромагнитное поле с распределением $G_E(\alpha_1)$ в направлении на каждый точечный рассеиватель. Рассеянное поле $E_S(f, \theta)$ измеряется приемной антенной (R) с ДН $G_R(\alpha_2)$, расположенной на расстоянии R_2 под бистатическим углом β к излучающей антенне.

Распределение отражательной способности Ψ методом ИАС определяется интегрированием по частоте f и азимутальному углу сканирования θ измеренного рассеянного поля E_s с применением интегрального оператора, использующего фокусирующую функцию ξ, которая компенсирует затухание и фазу рассеяния сферической волны, отраженной от каждого точечного рассеивателя объекта:

$$\Psi(\rho,\phi) \approx \int_0^{\infty}\int_0^{2\pi} \tilde{C}\cdot E_s(f,\theta)\cdot\xi(f,\theta;\rho,\phi)\,d\theta df\ , \qquad \xi(f,\theta;\rho,\phi) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(d_1+d_2)}\cdot\frac{(d_1\cdot d_2)\cdot f}{G_E(\alpha_1)\cdot G_R(\alpha_2)},$$

где $\tilde{C}$ – константа, определяемая параметрами измерительной системы при калибровке.

Распределение отражательной способности, позволяет с помощью нормировочной процедуры (измерения сигналов обратного рассеяния от калибровочного объекта, например, сферы), получить распределение эффективного поперечника рассеяния (ЭПР) испытуемого объекта:

$$\sigma(f,\theta) = e^{-i2\frac{2\pi}{\lambda}R}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Psi(x,y)\cdot e^{i2\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\theta+y\sin\theta)}dxdy\ ,\ \text{где}\ \ ЭПР(f,\theta) = \left|\sigma(f,\theta)\right|^2.$$

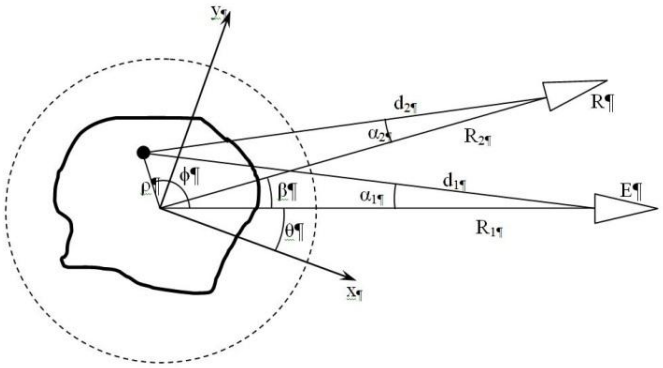


Рис. 1. Схема измерения методом ИАС

Возможности применения метода ИАС при измерении характеристик рассеяния объектов в их ближней зоне, рекомендации по выбору конфигурации и параметров измерительной системы для реализации ИАС приведены в работах [4].

Результаты экспериментальных исследований

Для использования метода ИАС при измерении характеристик рассеяния объектов в ближней зоне была создана лабораторная измерительная система, использующая квази-моностатический режим измерений рассеянного поля (рис. 2), т.е. антенны системы разделены на приемную и передающую, при этом бистатический угол между осями антенн в проекции на горизонтальную плоскость сканирования равен нулю.

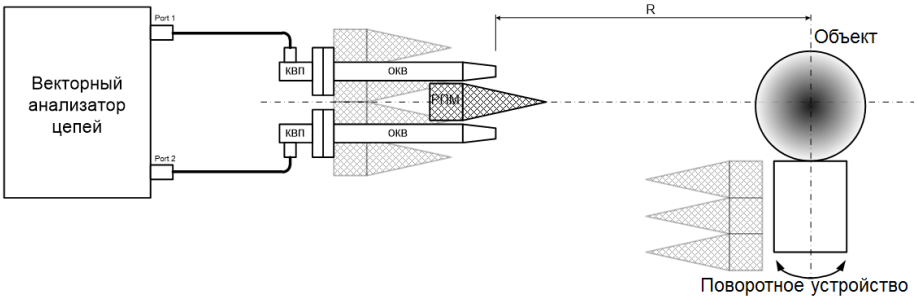


Рис. 2. Схема квази-моностатической измерительной системы

Объектами экспериментальных исследований в 8-мм диапазоне длин волн являлись два радиопоглощающих материала фирмы Cuming Microwave устанавливаемые на металлическое основание: 1) C-RAM GDSS РПМ толщиной 3.18мм на основе силиконовой резины; 2) C-RAM МТ-30 толщиной 12.7мм углеродосодержащий эластичный пористый широкодиапазонный поглотитель.

В данном эксперименте параметры измерительной системы были следующие: диапазон частот 25-37.5 ГГц (501 точка), расстояние от центра апертуры антенн до оси вращения порядка 300 мм, шаг азимутального сканирования 0.5°. Испытуемый РПМ крепился к одной из сторон калибровочной пластины того же размера. На рис. 3 приведены (слева направо) фотографии, амплитуда и фаза распределения отражательной способности объектов исследования с масштабной проекцией сечения объекта (слева от пластины).

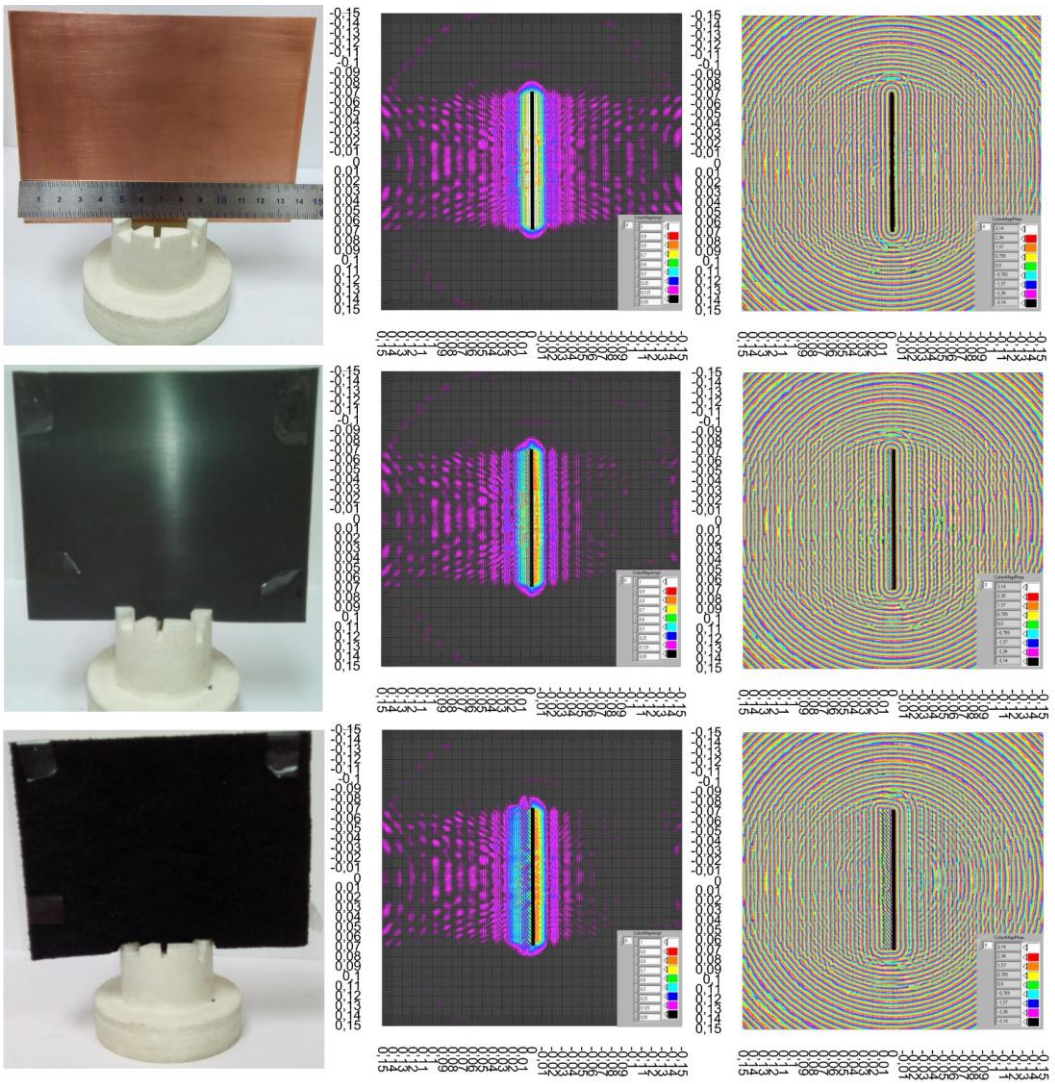


Рис. 3. Слева направо – фотография объекта 140×140мм, амплитуда и фаза отражательной способности: а) калибровочная пластина, б) РПМ C-RAM GDSS, в) РПМ C-RAM МТ-30

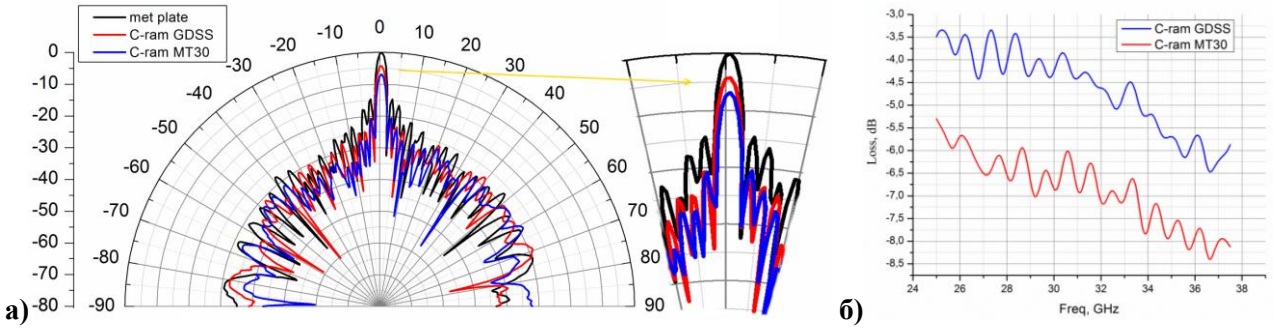
На рис. 4а приведены нормированные распределения ЭПР, или диаграмма обратного рассеяния (ДОР), нормировка ЭПР проводилась на восстановленное значение максимума ЭПР металлической (калибровочной) пластины, направление которого соответствует нормали к поверхности (0°).

Значение максимума ДОР исследуемого материала есть коэффициент отражения данного материала в направлении нормали к поверхности (рис.4б).

На рис. 5 приведены фотографии образцов материалов при измерении коэффициента отражения в сантиметровом диапазоне частот.

Образцы измерялись как самостоятельно (в свободном пространстве), так и совместно с образцом №1, т.е. на металлической подложке – направлении 0° соответствует нормали к поверхности со стороны исследуемого материала. На рис. 6 приведены результаты восстановления распределения ЭПР образцов на частоте 10 ГГц, нормированных на максимальное значение ЭПР металлической пластины (образец №1). Коэффициент отражения исследуемого материала различен при его установке на металлическую подложку (num 1-X) и без нее (num X), таким образом можно судить о коэффициенте поглощения материала.

Образец №4 (капралон) обладает наилучшей радиопрозрачностью, т.е. наименьшим коэффициентам отражения без металлической подложки и наименьшим коэффициентом поглощения, поэтому не оказывает заметного влияния на распределение ЭПР металлической пластины при укрытии ее данным материалом. Образец №5 обладает наибольшим коэффициентом поглощения, который составляет порядка -5дБ.



а) б)

Рис. 4. а) ДОР РПМ на частоте 30ГГц, б) распределение по частоте коэффициента отражения РПМ в направлении нормали к поверхности

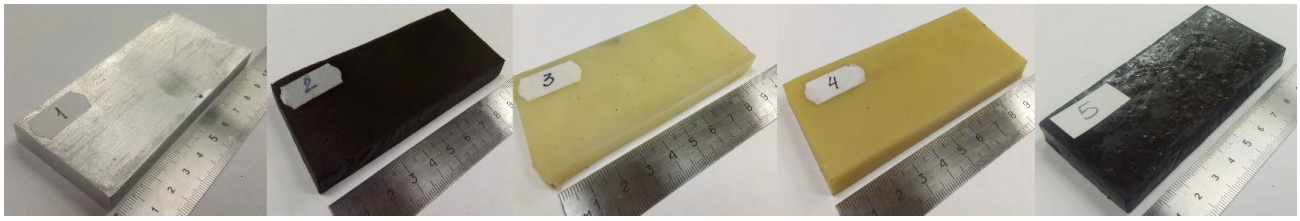


Рис. 4. Фотографии образцов с размерами 100×45мм: а) образец №1 (пластина АМг6), б) образец №2, в) образец №3, г) образец №4 (капралон-полиамид), д) образец №5

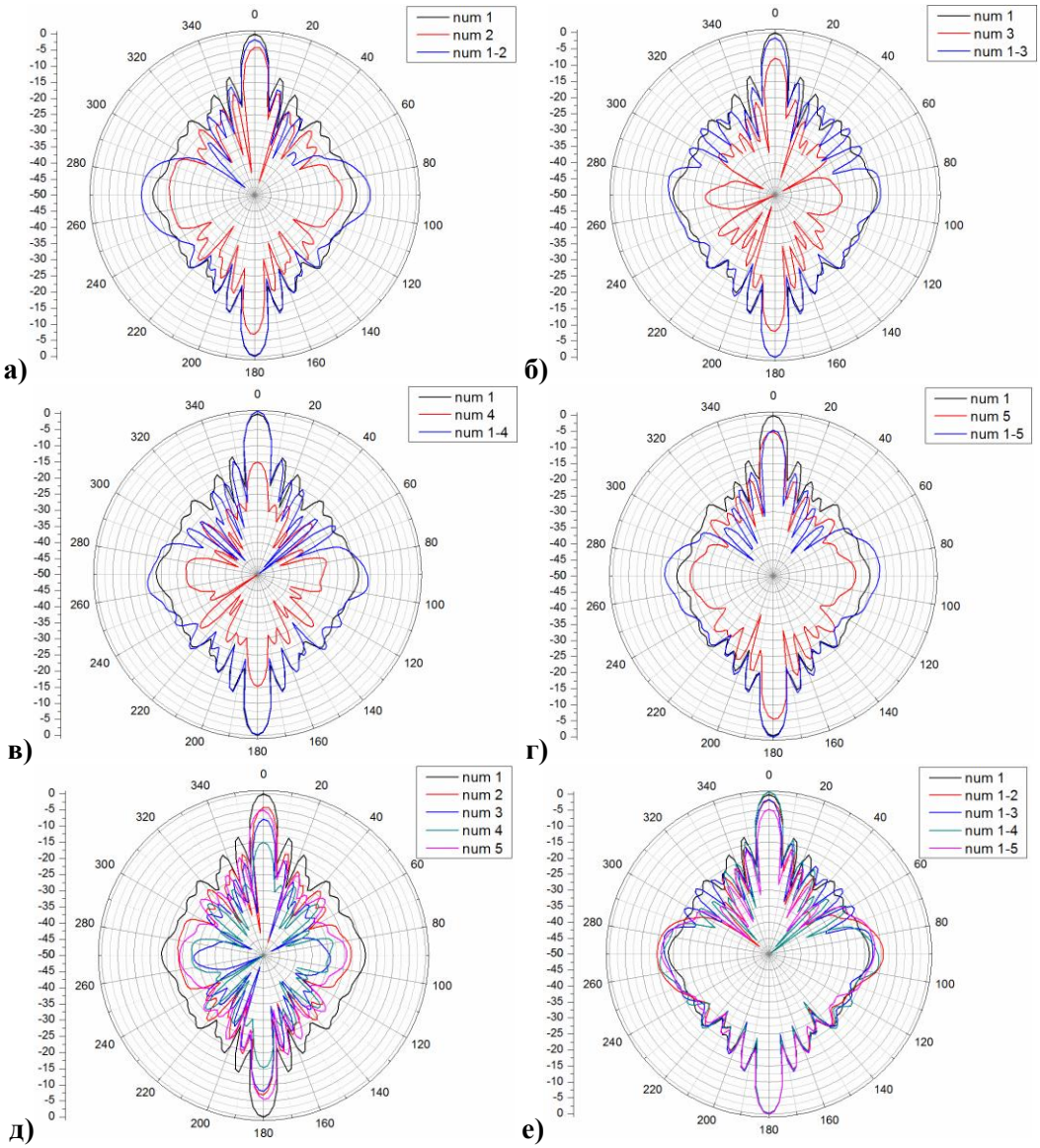


Рис. 5. Распределение ЭПР образцов на частоте 10 ГГц, нормированных на ЭПР образца №1 (металлическая пластина): а) образец №2, б) образец №3, в) образец №4, г) образец №5, д) ЭПР образцов, измеренных в свободном пространстве, е) ЭПР образцов, измеренных на металлической подложке

Выводы

В работе приведены результаты экспериментального исследования в широком диапазоне частот коэффициента отражения материалов методом инверсного апертурного синтеза. Нормировка восстановленных ЭПР плоских образцов материалов проводится на значение восстановленного ЭПР в максимуме ДОР металлической калибровочной пластины.

Достоинством предложенной методики является возможность проведения оценки коэффициента отражения образцов материалов малых геометрических размеров в свободном пространстве в широком диапазоне частот. К недостаткам данной методики можно отнести значительные временные затраты на восстановление распределения отражательной способности и ЭПР.

Библиографический список

1. **Мицмахер, М.Ю.** Безэховые камеры СВЧ / М.Ю. Мицмахер, В.А. Торгованов.- М. Радио и связь.- 1982, 128 с.
2. **Broquetas, A.** A near field spherical wave inverse synthetic aperture radar technique // A. Broquetas, L. Jofre, and A. Cardama in IEEE AP-S Symp. Dig., Chicago, IL. - July 1992, vol. 2, pp. 1114–1117.
3. **Broquetas A**. Spherical Wave Near-Field Imaging and Radar Cross-Section Measurement/ A. Broquetas**,** J. Palau, L. Jofre, and A. Cardama //IEEE Trans. on AP, vol. 46, No. 5, May, 1998, pp. 730 – 735.
4. **Белов Ю.И**. Внутренняя сравнительная калибровка измерительной системы при экспериментальном исследовании характеристик обратного рассеяния объектов методом инверсного апертурного синтеза /Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, М.И. Дудкин, И.А. Илларионов, А.Е. Шулындин . Антенны.- 2016, Вып.1(221).- С. 85 – 95.

E.L. Varentsov, M.I. Dudkin, I.A. Illarionov

MEASUREMENTS OF THE REFLECTON COEFFICIENT OF MICROWAVE ABSORBERS IN BROAD BAND WITH INVERSE APERTURE SYNTHESIS TECHNIQUE

Federal State Unitary Enterprise Federal Research and Production Center “Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye. Sedakov”

The results of experimental study of reflection coefficient of the microwave absorbers with aperture synthesis technique are presented in the paper. The experimental technique provided the measurement of reflection coefficient of absorber with reduced geometrical sizes.

Key words: microwave absorber, inverse aperture synthesis, reflection coefficient, radar cross section.

УДК 537.87

Е. Ю. Гайнулина, Н. С. Корнев, А. В. Назаров, Ю.И. Орехов

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ АНТЕННО-ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ КВЧ ДИАГНОСТИКИ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Представлены результаты проектирования малогабаритных излучателей антенно-фидерной системы (АФС) КВЧ радиоинтерферометра для зондирования в замкнутых объемах. На основании результатов численного моделирования предложено несколько вариантов АФС с диэлектрическими излучателями, имеющими минимально возможный размер апертуры. Экспериментально исследованы стержневые и конусные диэлектрические насадки на открытом конце металлического волновода АФС и подтверждено формирование такими излучателями осесимметричного узконаправленного волнового пучка зондирующего поля с шириной главного лепестка диаграммы направленности не более 40°, что обеспечивает оптимальное облучение области зондирования в замкнутых объемах. Применение в составе КВЧ радиоинтерферометра разработанных малогабаритных АФС с диэлектрическими излучателями существенно расширит возможности диагностики в специфических задачах ближней радиолокации, а также в условиях проведения газодинамических исследований, когда применение существующих на сегодняшний день антенно-фидерных систем не представляется возможным.

Ключевые слова: КВЧ интерферометр, гауссов волновой пучок, диэлектрическая стержневая антенна, диэлектрический конический излучатель

Введение

Для решения задач ближней радиолокации при исследовании быстропротекающих газодинамических процессов перспективным является применение КВЧ радиоинтерферометров (РИ), позволяющих исследовать динамику движения и восстанавливать двумерную картину деформации фронта движущейся поверхности [1].

Для данных РИ разработаны и запатентованы диэлектрические конические и планарные излучатели, формирующие гауссовы волновые пучки, с отношением геометрических размеров апертуры D к длине волны λ от 6 до 10. В то же время существует ряд задач, где требуется диагностика газодинамических процессов в замкнутых объемах, свободное пространство внутри которых ограничено. Для таких применений необходимы излучатели с минимальными габаритами, формирующие осесимметричную диаграмму направленности (ДН) с шириной по уровню 0,5 не более 40°, обеспечивающие амплитудное и фазовое распределения поля излучения в пределах требуемого участка движущейся в диагностируемом замкнутом объеме поверхности и обеспечивающие минимальный уровень боковых лепестков (УБЛ).

Требование такой малой ширины зондирующего пучка при отношениях D/ λ не более трех нереализуемо для металлических волноводных излучателей, но может быть выполнено при применении диэлектрических излучателей, у которых формирование ДН обеспечивается физической апертурой, превышающей геометрическую.

В докладе представлены результаты исследования и проектирования малогабаритных излучателей антенно-фидерной системы КВЧ радиоинтерферометра, которые отвечали бы предъявленным требованиям.

Содержание исследования

Будем рассматривать АФС, которая должна обеспечивать формирование излучения трехмиллиметрового диапазона длин волн (λ=3,2 мм) через отверстие в экране из фторопласта. При этом диаметр отверстия определяется диаметром подводящего волновода. В качестве подводящей линии для создаваемой АФС используется линия передачи КВЧ излучения закрытого типа – металлический волновод (МВ) минимально возможного сечения.

Внутренний диаметр МВ ограничен снизу критической частотой возникновения основной моды H_{11} МВ круглого сечения и составляет 1,87 мм. На практике будем рассматривать внутреннее сечение 2 мм, чтобы избежать резкого возрастания потерь в волноводе, неизбежного при работе вблизи критического сечения, а внешний диаметр МВ выберем равным 3 мм из технологических соображений.

Если использовать как излучатель открытый конец МВ, то при таком диаметре ширина диаграммы направленности излучения по уровню половинной мощности [2] при рабочей длине волны λ=3,2 мм составит не менее 92°, что неприемлемо для поставленной задачи.

Одним из способов сужения ДН излучения является увеличение апертуры излучающего элемента, что при имеющихся требованиях максимального снижения габаритных размеров антенны сводится к расширению эффективного размера поля на апертуре геометрически меньших размеров. В силу специфики диэлектрических волноводов как открытых систем у волноведущих диэлектрических элементов (стержень, конус и т.п.) направленность определяется физической апертурой, то есть поперечным сечением распределения потока мощности волны HE_{11} со спадом поля на границе сечения на 15..20 дБ. Это пространственное сечение поля возрастает с уменьшением сечения стержня, что приводит к сужению ДН и может обеспечивать требуемую ширину ДН.

Поэтому на открытом конце МВ было предложено разместить соосно диэлектрический излучатель с габаритами внешней насадки не более 10 мм по продольной и поперечным координатам.

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 насадке на торце металлического волновода.

Результаты численного моделирования

В работе предложены несколько конструкций диэлектрических излучателей АФС, позволяющих сузить ширину ДН за счет расширения эффективного размера поля на апертуре. В программе CST MWS были получены результаты численного моделирования для разных типов излучателей:

1. Предложен стержневой диэлектрический излучатель, выполненный в виде штыря из полистирола или кварца с плавным коническим заострением. Толщина стержня выбрана равной (рисунки 1а,б) или меньшей (рисунок 1в) внутреннего диаметра МВ, а длина его внешней (излучающей) части составляет 10 мм.

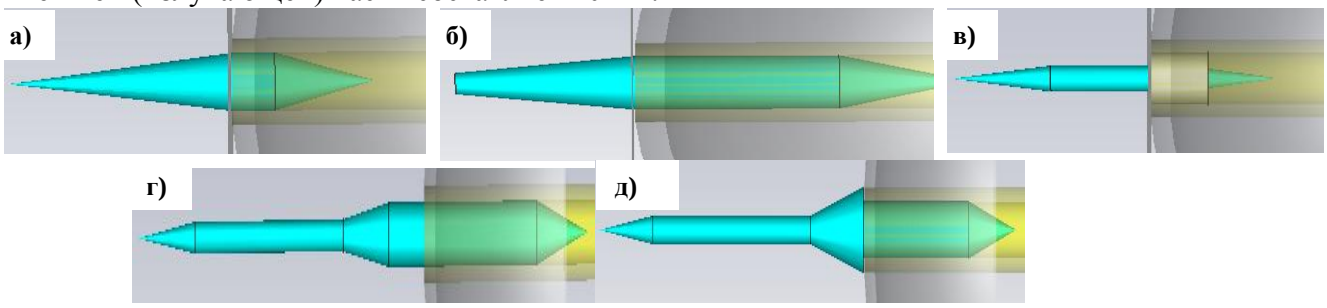


Рисунок 1 – Варианты стержневых диэлектрических излучателей: а) с толщиной, равной диаметру МВ; б) с усеченным коническим заострением; в) с толщиной, меньшей диаметра МВ; г) с плавным коническим переходом; д) с коническим переходом и скачкообразным изменением радиуса сечения

У излучателей такого типа физическая апертура зависит от их толщины и материала. Например, по результатам моделирования конструкции со стержнем из полистирола диаметром 2 мм, равным внутреннему диаметру МВ (рисунок 1а), получен почти симметричный пучок с уровнем БЛ минус 16,6 дБ. Ширина ДН составила 41,9° и 43,6° в двух плоскостях, соответственно (рисунок 2а). Получено, что аналогичная конструкция, но с

кварцевым стержнем того же сечения формирует более широкую ДН – 49° и 52° в двух плоскостях, соответственно. Результат хорошо согласуется с теоретическими предпосылками о формировании поля открытой волноведущей системой, так как поле излучателя из кварца (ε=3,8) имеет меньшую эффективную ширину на апертуре по сравнению с излучателем из полистирола (ε=2,5).

С целью уменьшения габаритов конструкции коническое заострение излучателя может быть усечено, как показано на рисунке 1б, практически без изменений характеристик излучения по сравнению с первоначальной конструкцией. Предельной следует считать длину излучателя 7 мм. Дальнейшее его укорочение ведет к расширению ДН и росту уровня боковых лепестков.

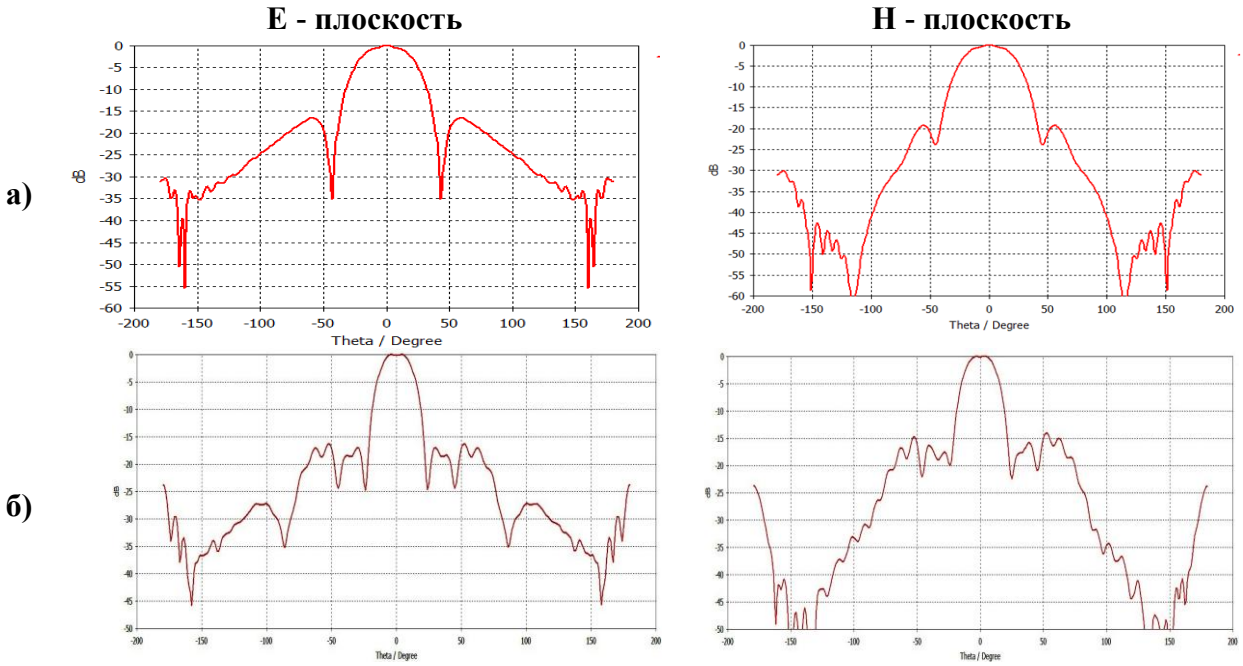


Рисунок 2 – Диаграмма направленности, формируемая стержневым излучателем из полистирола, представленным на: а) рисунке 1а; б) рисунке 1д

Излучатель с тонким стержнем (рисунок 1в) из полистирола или кварца не обеспечивает существенного сужения ДН. Более того, наблюдается возрастание уровня боковых лепестков до минус 12 дБ, что обусловлено влиянием паразитного излучения на выходе стержня из МВ из-за рассогласования тракта в этом сечении.

Согласование, а значит и уровень бокового излучения можно снизить с помощью представленных на рисунках 1г и 1д конструкций. Конструктивной особенностью предложенных вариантов является наличие плавного перехода от стержня диаметром 2 мм, равного внутреннему диаметру МВ, к тонкому стержню диаметром 1 мм. Длина плавного перехода выбиралась равной (4-5) мм. Длина внешней части излучателя составляет 25 мм.

Использование конструкции, представленной на рисунке 1г, дает возможность снизить УБЛ до минус 12,7 дБ при уменьшении ширины диаграммы направленности до 25,4° и 25,9° в Е и Н-плоскостях, соответственно.

Расчет показывает, что введение конического перехода со скачкообразным изменением радиуса сечения на выходе из МВ, равным 0,5 мм, улучшает согласование в большей степени, чем в предыдущем варианте стержневого излучателя, уменьшая тем самым УБЛ на 3 дБ до значения минус (14,3-16,3) дБ при сохранении такой же узкой ДН. Результат проиллюстрирован на рисунке 2б.

Оптимизация габаритов излучателя за счет исключения заостренного участка стержня практически не меняет ширину ДН. Уменьшение длины регулярного участка стержня целесообразно вплоть до 17 мм. При этом получены характеристики: ширина ДН – 28,3° и 28,4° в Е и Н-плоскостях, соответственно, УБЛ – не более минус 13,7 дБ.

2. Предложен также диэлектрический конический излучатель с длиной и диаметром раскрыва 10 мм, возбуждаемый круглым металлическим волноводом. Конус составляет единое целое и является продолжением диэлектрического штыря, введенного в МВ (рисунок 3).

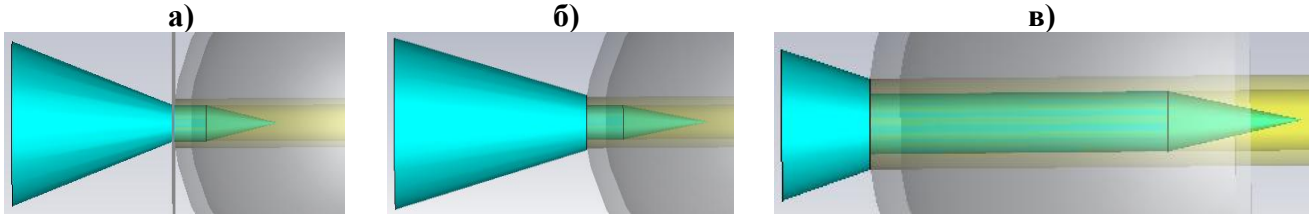


Рисунок 3 – Варианты диэлектрического конического излучателя

Диаграмма направленности, формируемая коническим излучателем из полистирола (рисунок 3а), приведена на рисунке 4а. Получен практически симметричный узконаправленный волновой пучок по уровню до минус 10 дБ с распределением поля, близким к гауссову. Ширина диаграммы направленности в Е и Н-плоскостях равна 26,5° и 24,9°, соответственно. Уровень боковых лепестков не превышает минус 20 дБ.

Ранее было показано [3], что излучатели, на выходе которых формируется волновой пучок в виде основной моды Гаусса-Эрмита, обеспечивают значительно бóльшую точность радиоинтерферометрических измерений при диагностике газодинамических процессов за счет существенного уменьшения уровня боковых лепестков. В связи с этим, целесообразно рассмотреть возможность дальнейшей оптимизации конического излучателя за счет формирования на его апертуре гауссова волнового пучка.

Одним из способов формирования гауссова распределения поля на апертуре излучателя является возбуждение высшей моды в определенном соотношении с основной модой [4]. Предложена конструкция с резкой нерегулярностью в виде скачкообразного изменения диаметра сечения диэлектрического элемента на выходе из МВ с 2 мм до 3 мм (рисунок 3б). Такое сечение соответствует критическому для возбуждения высшего симметричного типа EH_{12} в эквивалентном диэлектрическом волноводе. Таким образом, этот тип волны эффективно возбуждается на предложенной резкой нерегулярности на стыке торца металлического волновода с малым основанием конуса, и в сочетании с основной волной HE_{11} обеспечивает формирование ДН гауссова типа.

Такая модификация конструкции позволила получить существенно лучшие по сравнению с диэлектрическим конусом без скачкообразного изменения диаметра сечения параметры излучения – ширина основного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ составила 24,8° в Е-плоскости и 23,4° в Н-плоскости, гауссово распределение поля волнового пучка наблюдается до уровня минус 19 дБ при УБЛ, не превышающем минус 21 дБ. Такой УБЛ также обеспечивается лучшим согласованием структуры поля H_{11} металлического волновода с возбуждаемой в конусе волной HE_{11} (рисунок 4б).

При необходимости дальнейшего уменьшения габаритов возможно применение диэлектрического конического излучателя со скачкообразным изменением диаметра сечения с апертурой 5 мм и длиной внешней конической части 2,85 мм (рисунок 3в).

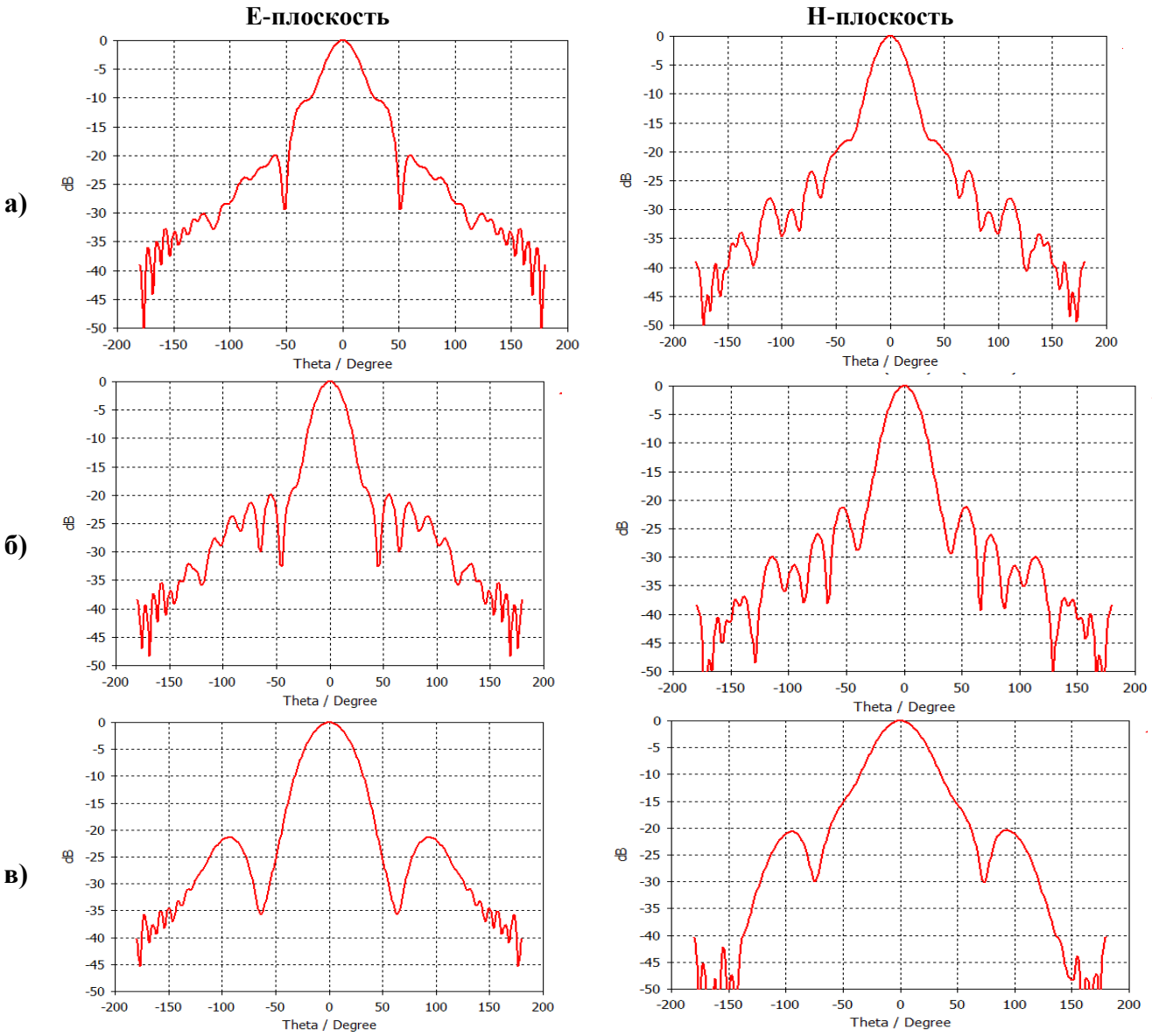


Рисунок 4 – Диаграммы направленности, формируемые коническим излучателем из полистирола, представленным на: а) рисунке 3а; б) рисунке 3б; в) рисунке 3в.

Диаграмма направленности в Е и Н-плоскостях, приведенная на рисунке 4в, иллюстрирует, что такой излучатель формирует волновой пучок с шириной ДН, равной 35,9° в Е-плоскости, 36,8° в Н-плоскости и УБЛ, не превышающим минус 20,5 дБ. Укороченный конический излучатель со скачкообразным изменением диаметра сечения обладает еще одним преимуществом – в формируемой им ДН минимумы основного лепестка по уровню минус 30 дБ находятся в районе углов ±(60-70)°, а первый боковой лепесток имеет максимум на (90-100)°. Это свойство очень важно для измерений в замкнутых объемах, так как позволяет избежать влияния множественных переотражений на результат измерений.

Выводы

У конических излучателей с диаметром раскрыва 10 мм достигается минимальная (из предложенных моделей) ширина ДН. Формируемый практически симметричный узконаправленный волновой пучок шириной $\Delta\theta_{0,5}$~25° с распределением поля, близким к гауссову, дает более чем трехкратное сужение ДН излучателя по сравнению с открытым

концом металлического волновода. Уменьшение диаметра раскрыва конуса до 5 мм приводит к увеличению $\Delta\theta_{0,5}$ до 35°. Примерно такая же физическая апертура у заостренных стержневых излучателей обеспечивает величину $\Delta\theta_{0,5}$~43°. Установлено, что использование плавного перехода между сечениями стержня и увеличение его длины приводит к сужению ширины диаграммы направленности до $\Delta\theta_{0,5}$~28° (с еще бóльшим сужением при дальнейшем удлинении).

Уровень боковых лепестков определяется в значительной степени согласованием диэлектрического излучателя в месте выхода из металлического волновода (на выходе из экрана), что определяет как КСВн тракта АФС, так и уровень паразитного излучения.

Варианты с плавным изменением сечения стержня или конуса в месте выхода из металлического волновода обеспечивают приемлемый уровень БЛ (около минус 17 дБ), а варианты двухмодовых конусов со скачкообразным изменением диаметра сечения позволяют добиться существенно меньшего уровня БЛ (минус 20 дБ) и меньшего КСВн. При построении последних был реализован принцип формирования на выходе структуры волнового пучка в виде основной моды Гаусса-Эрмита, образующейся при сложении двух мод, распространяющихся в диэлектрической структуре. Такие излучатели обеспечивают значительно бóльшую точность измерений при диагностике газодинамических процессов за счет формирования в дальней зоне ДН, близкой к преобразованию Фурье от функции Гаусса.

Предложенные варианты стержневых и конических диэлектрических излучателей КВЧ радиоинтерферометров позволили обеспечить узконаправленность излучения и уровень БЛ, не достижимые при использовании металлических волноводных и рупорных излучателей с теми же размерами. Разработанные диэлектрические излучатели могут существенно повысить информативность радиоинтерферометрических измерений в широком диапазоне исследовательских газодинамических опытов, в том числе в условиях малых объемов и жестких требований к габаритам АФС при установке внутрь измерительных узлов, свободное пространство внутри которых сильно ограничено.

Список литературы

1. Михайлов А.Л. , Катин С.В., Дмитриев Н.И. , Взятышев В.Ф. , Орехов Ю.И. , Хворостин В.Н. , Родионов А.В. Состояние и перспектива развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: труды междунар. конфер. «XV Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2013. – С. 353-354.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб и доп. // М.: Энергия. – 1975
3. Взятышев В.Ф., Гайнулина Е.Ю., Марков А.В., Назаров А.В. , Родионов А.В. , Седов А.А., Хворостин В.Н. , Штыков В.В. Диагностика газодинамических процессов микроволновыми интерферометрами с зондированием объектов гауссовыми волновыми пучками. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: труды междунар. конфер. «XVI Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2015.
4. Гайнулина Е.Ю., Штыков В.В. Многомодовый режим диэлектрических планарных волноводно-пучковых преобразователей. // Изв. вузов. Физика, 2012, т. 55, № 8/3.

Ye.Yu. Gaynulina, **N.S. Kornev**, **A.V. Nazarov, Yu.I. Orekhov**

DIELECTRIC RADIATORS FOR COMPACT ANTENNA-FEEDER SYSTEM FOR UHF DIAGNOSTICS IN CLOSED VOLUMES

Branch of the FSUE RFNC Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics«Measuring System Research Institute n.a. Yu.Ye. Sedakov», N. Novgorod

The report presents the development results of a small-sized radiators for the UHF radiointerferometer antenna-feeder system (AFS)for probing in closed volumes. Some constructive variants of AFS with dielectric radiatorshaving minimum possible aperture was proposed based on their numerical modeling results. The rod and cone dielectric tips at the open end of the AFC metal waveguide was experimentally investigated. It was confirmed what considered radiators provides formation ofa probe axisymmetric narrow wave beam with the directivity patternmain lobeless than 40°. It ensures optimal irradiation of the probing region in closed volumes.Using of the developed small-size AFS with dielectric radiators in the EHF radiointerferometer will significantly expand the diagnostic capabilities in specific problems of near-field radar, as well as in the conditions of gas dynamic studies, when using of existing antenna-feeder systems is not possible.

Key words: UHF radiointerferometer, gaussianwave beam, dielectric rod antenna, dielectric coneradiator.

УДК 621.396.67

С.М. Гаранин, И.А. Илларионов

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Настоящая работа посвящена разработке малогабаритной спиральной антенны аппаратуры спутниковой навигации. Разработан простой и компактный симметрирующий трансформатор для согласования коаксиальной линии и входа антенны. Представлены результаты измерения характеристик излучения.

Ключевые слова: архимедова спираль, миниатюризация антенн, симметрирующий трансформатор, широкополосная антенна, круговая поляризация.

Введение

Спиральные и спирально-щелевые антенны широко применяются в антенной технике. В особенности они необходимы там, где требуется широкая диаграмма направленности (ДН), широкая полоса рабочих частот и круговая поляризация. Одним из перспективных направлений применения данного типа антенн являются системы спутниковой навигации, такие как GPS и ГЛОНАСС.

Рабочая полоса частот спиральных антенн определяется размерами и точностью изготовления возбуждающей части (наибольшая рабочая частота) и размером апертуры антенны (наименьшая рабочая частота). Симметрирующее устройство, применяемое для возбуждения спиральных антенн от коаксиальных волноводов или несимметричных полосковых линий, обычно также ограничивает частотную полосу антенн. Спиральные антенны работают в так называемом 3W (wave) режиме [1] - режиме быстрых ($v_\phi > c$), вытекающих (leaky) и поверхностных (traveling) волн. Режим поверхностных волн возбужденного тока на плечах спиральной антенны обеспечивает широкополосные свойства антенны. Эти волны быстрые - за счет сильной связи токов в соседних точках плеч антенны - теряют энергию по мере распространения вдоль плеч спирали.

Поскольку чаще всего для передачи энергии антенне на практике применяются коаксиальные (несимметричные) линии, в состав антенны должен входить симметрирующий трансформатор, что приводит к повышению ее конструктивной сложности и ухудшению массогабаритных показателей. В разработанной антенне указанный трансформатор выполнен на основе короткого нерегулярного участка несимметричной микрополосковой линии передачи, что обеспечивает его компактность и технологическую простоту изготовления.

Цель настоящей работы заключается в разработке компактной антенны с резонатором малой глубины на базе плоской двухзаходной архимедовой спирали – то есть миниатюризация спиральной антенны.

Конструкция компактной широкополосной спиральной антенны

В зависимости от формы кромок спирали различают архимедову (арифметическую) и равноугольную (логарифмическую) спиральные антенны. Антенны могут быть однозаходными, двухзаходными и многозаходными.

Миниатюризация спиральных антенн возможна путем снижения фазовой скорости бегущей волны в плече антенны. Существует несколько техник снижения фазовой скорости: 1) расположение антенны в материале с высокой относительной диэлектрической или магнитной проницаемостями [2], 2) модификация плеч антенны путем модуляции формы [3], 3) применение радиопоглощающих материала в резонаторе антенны с целью уменьшения его высоты [4], 4) нагрузка плеч антенны на сосредоточенные или распределенные элементы [5], 5) применение искусственных electronic bang gap (EBG) материалов [6]. В данной работе нами

были исследованы представленные техники миниатюризации и выбрана конструктивно наиболее простая – использование резисторов в плечах антенны.

Плоская спиральная антенна является бинаправленной антенной со взаимно ортогональными поляризациями излучения в верхнее и нижнее полупространство. Для обеспечение однонаправленного излучения необходимо использование отражающего или радиопоглощающего (РП) экранов, расположенных в одном из полупространств. Резонаторы, заполненные РП материалом, поглощают все излучение в то полупространство, в котором расположены. Когда расстояние между антенной и экраном достаточно большое $h > \lambda/8$, то для КУ антенны в направлении максимума можно написать [7]:

$$G_{\substack{над \\ экраном}} = G_{\substack{в свободном \\ пространстве}} \cdot \left|1 - \exp\left(-i2\pi\frac{2h}{\lambda}\right)\right|. \qquad (1)$$

Выражение (1) не верно для $h < \lambda/8$, так как в таком случае связь антенны с экраном очень сильная - антенна излучает не эффективно. При расстоянии между экраном и антенной $h = \lambda/4$ происходит удвоение КУ на частоте, соответствующей заданной длине волны λ. Однако при этом деградирует КУ на других частотах. В таких случаях используют экраны сложной формы: в виде конических поверхностей или пирамидальной формы, что существенно усложняет конструкцию антенны. Так как разрабатываемая в работе антенна имеет ограниченную полосу частот 1…2 ГГц, то применялся резонатор простой цилиндрической формы.

Особенностью разработанной антенны является сверхмалая высота металлического резонатора, которая составляет 0.1λмакс, где λмакс - наибольшая длина волны, соответствующая нижней частоте рабочей полосы 1.1 ГГц. При этом нижняя частота определялась по значениям КЭ и КУ: КЭ< 3дБ, КУ> 0 дБ. Эффекта уменьшения высоты антенны над экраном удалось добиться, разместив в плечах антенны последовательно по два чип-резистора с номиналом 300 Ом. Заметим, что полоса антенны по уровню коэффициента отражения -10дБ, превосходит полосу антенны по критерию КУ, КЭ, определенному выше. Применение резисторов в плечах спирали позволило разместить антенну в металлическом резонаторе простой цилиндрической формы с внешним диаметром 130 мм (0.43λмакс) и высотой 27 мм (0.1λмакс). На рис.1 представлено сечение оптимизированной модели антенны. В полость резонатора установлено кольцо с внешним диаметром 124 мм, внутренним диаметром 100 мм и высотой 23 мм из оргстекла с относительной диэлектрической проницаемостью ε = 3.5. Кольцо крепится к резонатору, а резонатор к основанию, как показано на рисунке 1.

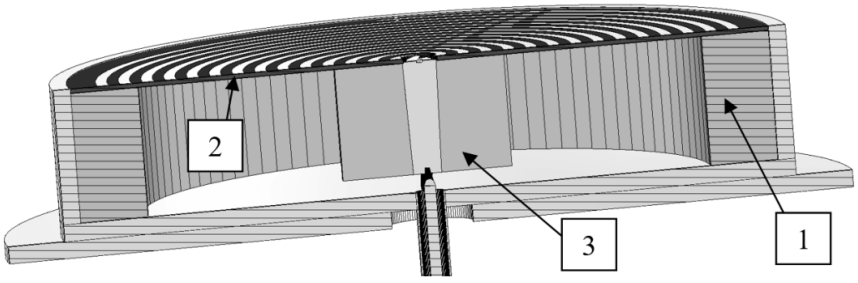
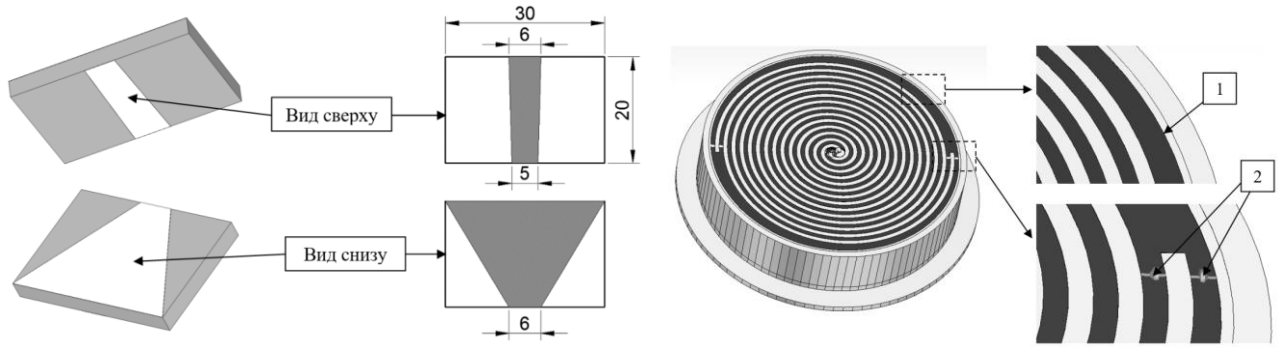


Рис. 1. Сечение модели антенны

На представленном рисунке 1: «1» – диэлектрическое кольцо, на которое установлена излучающая спиральная структура «2». Последняя изготовлена из фольгированного материала «Rogers» с относительной диэлектрической проницаемостью ε=3 и толщиной 0.8 мм. Диэлектрическое кольцо применяется для повышения механической прочности конструкции разработанного макета антенны. Элемент «3» на рисунке 1 является одновременно симметрирующим и согласующим устройством, осуществляющим согласование коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом и плеч архимедовой спирали, имеющей активную

часть входного сопротивления, составляющую примерно 100 Ом. Указанный симметрирующий трансформатор изображен на рисунке 2а. Он представляет собой плавный линейный переход между несимметричной полосковой линией и двухпроводной линией, выполненный на подложке из фторопласта толщиной 3 мм и относительной диэлектрической проницаемостью ε=2.2.



а б

Рис. 2. Согласующее устройство (а) и чип-резисторы (б)

Результаты экспериментального исследования характеристик изготовленного макета широкополосной спиральной антенны

Внешний вид изготовленного макета широкополосной спиральной антенны изображен на рисунке 3.

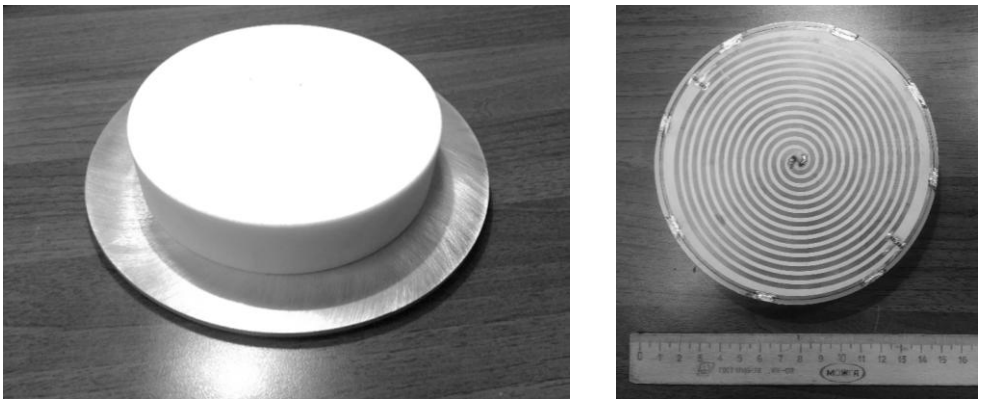


Рис. 3. Внешний вид макета антенны

Результаты измерения КСВн изготовленного макета широкополосной антенны изображены на рисунке 4.

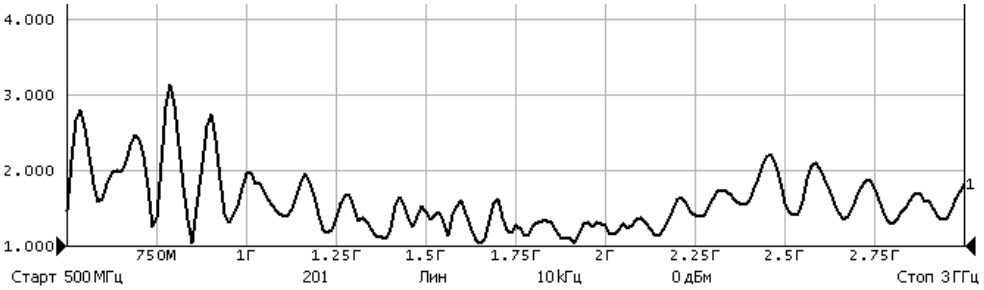
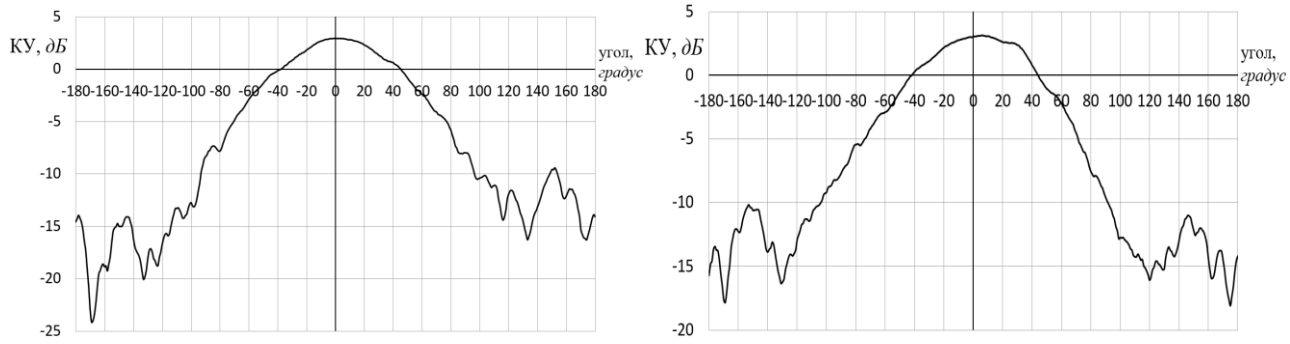


Рис. 4. Частотная зависимость КСВн макета антенны

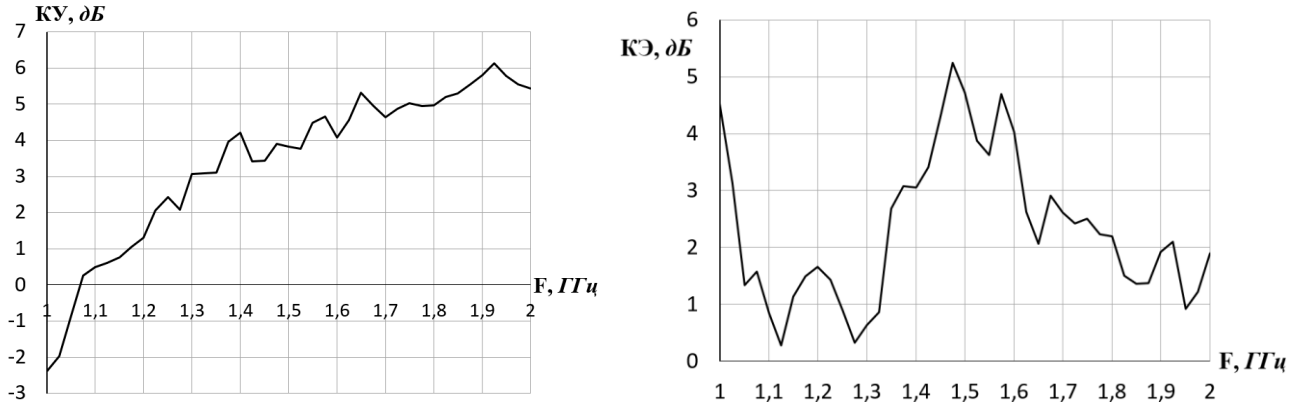
Результаты измерения ДН в меридиональной плоскости представлены на рисунке 5.



а б

Рис. 5. ДН макета антенны на частоте: (а) – *F*=1.3 ГГц; (б) – *F*=1.5 ГГц

Результаты измерения частотной зависимости КУ изготовленного макета антенны представлены на рисунке 6а, КЭ – на рисунке 6б.



а) б)

Рис. 6. Частотные зависимости КУ (а) и КЭ (б) макета антенны, полученные в результате экспериментального исследования

Выводы

При проведении экспериментального исследования и теоретических расчетов основных характеристик компактной широкополосной спиральной антенны получены следующие основные характеристики: 1) величина КСВн макета антенны не превышает значения, равного 2, в исследуемом диапазоне частот 1 ГГц $\leq F \leq$ 2 ГГц, 2) форма ДН не изменяется во всей рассматриваемой полосе частот; 3) величина КУ макета антенны практически во всей полосе частот имеет положительное значение, кроме того она увеличивается с ростом значения частоты, 4) величина КЭ практически во всем рассматриваемом диапазоне частот не превышает значения, равного 5.

Библиографический список

1. Antenna Engineering Handbook / John L. Volakis, Editor. -4th ed..- McGraw-Hill Companies, 2007.
2. McFadden, M. Analysis of the equiangular spiral antenna on a dielectric substrate / M. McFadden, W.R. Scott Jr. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation.-2007.- Vol.55 (11).- P.3163-3171.
3. Filipovic, D. S. A broadband meanderline slot spiral antenna / D. S. Filipovic and J.L. Volakis // IEE Proc. Microw. Antennas Propagat.-2002.-Vol.149 (12.- P.98-105.
4. Nakano H. Unbalanced-mode spiral antenna backed by an extremely shallow cavity / H. Nakano, T. Igarashi, H. Oyanagi, Y. Iitsuka, J. Yamauchi // IEEE Trans. on Antennas and Propagation.- 2009.- Vol.57 (6).- P.1625-1633.
5. Yamaguchi, S. Two resistors loaded ultra-wideband spiral array antennas / Yamaguchi, S. ; Miyashita, H. ; Nishizawa, K. ; Kakizaki, K. Makino, S. // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.- 2007 .- P. 1957 – 1960.
6. Братчиков А.Н. EBG-материалы (электронные кристаллы) в антенной и СВЧ технике – М.: «Радиотехника», 2009.- 72 с.
7. Volakis John L. Small antennas. Miniaturization techniques and applications / John L. Volakis, Chi-Chin Chen, Kyohei Fujimoto.- Mc Graw Hill.- 2010, 428 pp.

S.M. Garanin, I.A. Illarionov

DEVELOPMENT OF THE COMPACT WIDEBAND SPIRAL ANTENNA FOR THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» «Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye. Sedakov»

The design of the compact spiral antenna for the satellite navigation systems are described in the present work. The simple and compact balun transformer was developed to match the coaxial line with the antenna radiator. The results of the measurement of the radiation patterns, the gain, axial ratio and VSWR are presented.

Key words: Archimedean spiral, antennas miniaturization, balun transformer, wideband antenna, circular polarization.

УДК 512:53.08

Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич

АЙГЕНОСКОПИЯ: АНАЛИЗ НЕДОМИНИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Владимирский государственный университет
ООО «Собственный вектор»

Цель работы – привлечь внимание геофизиков к возможностям, которые открывает конструкция анализатора временных рядов экспериментальных данных, получившего название «айгеноскоп». Представлена конструкция айгеноскопа, описаны её отличительные особенности. Сделан обзор возможностей, предоставляемых способами формирования ансамблей и типологий. Представлены варианты реализации айгеноскопа.

Ключевые слова: собственный вектор, собственное значение, недоминирующий, компонента, ансамбль, типология.

Введение

Данная работа посвящена анализатору собственных векторов и компонент сигнала, получившему название «айгеноскоп» (от нем. Eigen – «собственный», греч. σκοπεω – «наблюдаю»). Схема этого анализатора была изобретена в ходе решения задач по исследованию временных рядов многолетних наблюдений вертикальной составляющей E_z электрического поля в приземном слое атмосферы Земли, которые любезно предоставил авторам Яков Михайлович Шварц. Первоначальной целью исследования было выявление в этих временных рядах некогерентных составляющих, спектрально локализованных на частотах лунных приливов. В ходе исследования временных рядов E_z оказалось, что оценки их амплитудных спектров на частотах лунных приливов по мере накопления и увеличения числа M отсчётов уменьшаются как $1/\sqrt{M}$ – что говорит о некогерентности компонент этих временных рядов на частотах лунных приливов. Для выявления и исследования компонент E_z, локализованных на этих частотах, было предложено накапливать множество (ансамбль) отрезков временного ряда на интервалах анализа фиксированной длины. Такое накопление было положено в основу анализатора собственных векторов и компонент сигнала (айгеноскопа), схема которого защищена патентом на полезную модель [1].

Как видно из названия, айгеноскоп анализирует собственные векторы и компоненты сигнала (временного ряда). Таким образом, айгеноскоп относится к классу схем и методов, использующих представления временных рядов в базисе собственных векторов (дискретное разложение Карунена-Лоэва, метод главных компонент, метод «Гусеница», анализ эмпирических ортогональных функций, анализ сингулярного спектра). Отличительная особенность айгеноскопа – анализ собственных векторов матриц смешанных моментов, имеющих малые собственные значения (недоминирующих собственных векторов).

Айгеноскоп нашёл применение также в биомедицинских исследованиях и при выявлении предвестников сильных землетрясений. Применение айгеноскопа поставило ряд методических вопросов (выбор способов построения ансамбля и параметров схем, интерпретация признаков собственных векторов и спектров собственных значений) и технических вопросов (влияние шумов и квантования, реализация схем). В ходе изучения этих вопросов были выявлены новые перспективы применения айгеноскопа, в том числе и в других областях (в частности, в разведочной геофизике).

Цель данной работы – представить результаты, полученные при решении этих вопросов, и расширить тем самым область применения айгеноскопа.

Теория и методика

Для представления временного ряда айгеноскоп использует два времени – «длинное» и «короткое». Длинное время совпадает с длительностью временного ряда, короткое – выбирается исходя из решаемой задачи и представляет собой время на конечном интервале анализа. На каждом из интервалов анализа временной ряд представляется в адаптивном ортонормированном базисе собственных векторов ковариационной матрицы временного ряда, построенной на ансамбле – некотором наборе интервалов анализа. Базис собственных векторов определяется свойствами самого временного ряда и поэтому является носителем важных его свойств. Поэтому анализу подвергаются не только коэффициенты разложения временного ряда в базисе, но и сами базисные векторы.

Опишем основные соотношения, положенные в основу айгеноскопии. Каждый элемент ансамбля представляется вектором-столбцом $\vec{a_i} = (a_{1i}; a_{2i}; \ldots a_{Mi})$, состоящим из M отсчётов временного ряда $\vec{X} = (x_1; x_2; \ldots x_N)$ на соответствующем интервале анализа. Весь ансамбль представлен матрицей $A = (\vec{a_1}, \vec{a_2}, \ldots \vec{a_L})$, состоящей из L столбцов $\vec{a_i}$, где L – объём ансамбля. Для ансамбля A вычисляется ковариационная матрица – матрица вторых нецентральных смешанных моментов [3], имеющая размеры $M \times M$

$$K = \frac{A \cdot A'}{L} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \vec{a_i} \cdot \vec{a_i}', \quad (1)$$

где штрих означает операцию транспонирования.

Для ковариационной матрицы K с использованием любого известного алгоритма вычисления собственных векторов и собственных значений [2] определяется последовательность из M собственных векторов и собственных значений, удовлетворяющих соотношению

$$K\vec{\psi_j} = \lambda_j \vec{\psi_j}, \quad (3)$$

где $\vec{\psi_j}$ – j-ый собственный вектор-столбец; λ_j – j-ое собственное значение.

Начиная с работ Давида Гильберта [3] последовательность собственных значений λ_j, упорядоченных по убыванию, именуется спектром собственных значений. В дальнейшем наряду со спектром собственных значений будем использовать нормированные собственные значения $\tilde{\lambda}_j$, образующие нормированный спектр собственных значений

$$\tilde{\lambda}_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{M} \lambda_j}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что $\tilde{\lambda}_j$ представляет собой относительный вклад j-ой компоненты в энергию временного ряда на интервале анализа.

Ковариационная матрица K неотрицательно определена, поэтому её собственные значения $\lambda_j \geq 0$ [4]. Собственные векторы $\vec{\psi_j}$ ковариационной матрицы K образуют в M-мерном унитарном пространстве ортонормированный базис, удовлетворяющий соотношению $\vec{\psi_j}' \cdot \vec{\psi_k} = \delta_{jk}$, где δ_{jk} – символ Кронекера [4].

Любой элемент $\vec{a_i}$ ансамбля A представляется в виде

$$\vec{a_i} = \sum_{j=1}^{M} g_{ji} \vec{\psi_j} = \sum_{j=1}^{M} (\vec{\psi_j}' \vec{a_i}) \cdot \vec{\psi_j}, \quad (5)$$

где $g_{ji} = \vec{\psi_j}' \vec{a_i}$ – j-ая главная компонента (коэффициент разложения) для i-ого элемента ансамбля.

Ковариационная матрица разлагается в сумму M ортогональных слагаемых, вес которых определяется собственными значениями λ_j, а форма – собственными векторами $\overrightarrow{\psi_j}$:

$$K = \sum_{j=1}^{M} \lambda_j \overrightarrow{\psi_j}\overrightarrow{\psi_j}' = \sum_{j=1}^{M} \lambda_j U_j , \quad (6)$$

где $U_j = \overrightarrow{\psi_j}\overrightarrow{\psi_j}'$ – матрица оператора проецирования на j-ый собственный вектор $\overrightarrow{\psi_j}$.

В случае, если некоторая компонента $\lambda_j U_j$ в составе ковариационной матрицы описывает колебания, возбуждённые внешним воздействием, то можно предположить, что величина λ_j связана в большей степени с интенсивностью воздействия, а форма $\overrightarrow{\psi_j}$ выражает характер воздействия и свойства колеблющейся среды.

При построении ансамбля в качестве вектора-столбца элемента ансамбля $\overrightarrow{a_i}$ может быть использован не вектор отсчётов временного ряда $\overrightarrow{X}$ на i-ом интервале анализа, а то или иное преобразование от этого вектора. Чтобы результаты анализа при использовании такого «обобщённого» ансамбля имели физический смысл, необходимо, чтобы все M координат вектора-столбца $\overrightarrow{a_i}$ элемента ансамбля A имели одинаковую физическую размерность – то есть были однородными величинами; это условие применительно к методу главных компонент было отмечено ещё В.В. Налимовым [5].

Итак, выбор способа построения ансамбля обусловлен как положением интервалов анализа на оси времени, так и преобразованием, преобразующим отрезок временного ряда на интервале анализа в элемент ансамбля.

Выявление недоминирующих компонент требует построения типологий – систематизированных описаний признаков, характеризующих собственные векторы и спектры собственных значений для разных классов временных рядов и при разных способах построения ансамбля. Для исследования типологий широко используются математический аппарат теории колебаний, линейной алгебры, статистической радиотехники.

Знание типологий позволяет строить эффективные схемы айгеноскопии, которые могут быть воплощены в виде айгеноскопов. Конструирование айгеноскопов использует вычислительные методы линейной алгебры, теорию возмущений линейных операторов.

Аналитические результаты, получаемые в ходе исследований на всех этапах работы, проверяются вычислительным экспериментом.

Применения

Авторами исследованы различные способы формирования ансамбля: траекторная матрица; ансамбль с фиксированным сдвигом интервалов анализа; синхронный ансамбль; ансамбль, состоящий из попарных произведений отсчётов. Построены типологии для периодических и квазипериодических временных рядов [6, 7], импульсных серий [8], стохастических временных рядов [9]. Показано, что для выявления компонент, спектры которых локализованы вблизи некоторых заранее известных частот, в качестве ансамбля следует использовать траекторную матрицу [7]. Для выявления периодических и квазигармонических компонент ансамбль должен состоять из отрезков временного ряда, сдвинутых друг относительно друга на фиксированное число отсчётов [6, 7]. Для анализа стохастических временных рядов в гауссовском приближении ансамбль следует формировать не из отсчётов временного ряда на интервале анализа, а из их попарных произведений [9].

Построена типология собственных векторов и спектров собственных значений при айгеноскопии временных рядов колебаний в линейных системах. Показана возможность выявления слабых (в том числе затухающих) мод при использованием траекторной матрицы или ансамбля с фиксированным сдвигом интервала анализа [10, 11]. Показано, что для выявления периодических параметрических воздействий целесообразно использовать ансамбль с

фиксированным сдвигом интервала анализа, варьируя величину сдвига вблизи предполагаемого значения периода [10]. Показана принципиальная возможность выявления периодических параметрических воздействий на линейную систему большой размерности (в вычислительном эксперименте – до 10 тысяч степеней свободы) [10].

Представлены собственные векторы и спектры собственных значений при использовании траекторной матрицы для анализа колебаний с монотонной частотной и амплитудно-частотной модуляцией. Отмечено наличие амплитудной и частотной модуляции собственных векторов; в случае гиперболической частотной ($\cos(a\ln t)$) и амплитудно-частотной ($\sqrt{t}\cdot\cos(a\ln t)$) модуляции в качестве признака отмечена явная асимметрия некоторых недоминирующих собственных векторов [10].

Авторами сконструирован и реализован ряд айгеноскопов на базе свободно распространяемого программного обеспечения с открытым кодом Scilab, а также на базе вычислительного комплекса «Монокуб-РС» архитектуры «Эльбрус» [12].

Айгеноскопия использована для выявления некогерентных недоминирующих компонент во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы Земли, спектры которых локализованы на частотах лунных приливов и частотах релятивистских двойных звёздных систем. Для выявления использована траекторная матрица при большой длине интервала анализа (до 1000 отсчётов), большом (до 100 тысяч и более) объёме ансамбля, времени дискретизации 1 час. Предложены критерий спектральной локализации собственных векторов и схема вторичной статистической обработки. Полученные результаты изложены в ряде статей и монографий [13-17]. Методика выявления недоминирующих спектрально локализованных составляющих реализована в виде айгеноскопа на базе Scilab.

Айгеноскопия положена в основу методики выявления предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенного радона Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона [18-20]. Разработанная методика позволила выявить предвестники ряда сильных (с магнитудой от 5.6) землетрясений, самое сильное из которых – Жупановское землетрясение 30 января 2016 г. [18, 19] Методика реализована как на базе Scilab, так и на языке Python [20].

Выводы

Проведённые исследования показали применимость айгеноскопии для анализа недоминирующих собственных векторов и компонент в разных ситуациях, в которых эти компоненты являются информативными. Показана возможность конструирования айгеноскопов с требуемыми свойствами. Показана эффективность использования в ходе конструирования разных способов построения ансамбля. Построены типологии признаков собственных векторов и собственных значений в ряде модельных примеров.

Подтверждена эффективность применения айгеноскопии при выявлении предвестников сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенного радона и при анализе компонент временных рядов вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы Земли.

Применение айгеноскопии – анализа недоминирующих собственных векторов и компонент временных рядов – в геофизических исследованиях находится в начальном состоянии; расширение области применения зависит от интереса исследователей и разработчиков.

Библиографический список

1. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Патент РФ на полезную модель №116242. Приоритет 30.09.2011.
2. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. Издание 3-е, стереотипное – СПб.: Издательство «Лань», 2002. 736 с. ISBN 5-8114-0317-8.

3. Hilbert D. Grundzuge eiger allgeminen Theorie der linaren Integralgleichungen. Lpz., 1912, pp.309.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984, 831 с.
5. Налимов В.В. Теория эксперимента. М. Наука, 1971, 208 с.
6. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Сушкова Л.Т., Лещев И.А. О характеристиках анализатора собственных векторов и компонент сигнала при анализе квазипериодических временных рядов / Методы и устройства передачи и обработки информации, 2014, №16, с.49-53.
7. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Сушкова Л.Т., Лукьянов В.Е. Частотные свойства ковариационной матрицы и её собственных векторов при анализе полигармонических временных рядов / Электромагнитные волны и электронные системы, 2013, т.18, №11, с.24-33.
8. Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Кардиоайгеноскоп – новая полезная модель обработки электрокардиограмм. М.: Издательство «Перо», 2014, ISBN 9-785000-862803, 138 с.
9. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Сушкова Л.Т., Лукьянов В.Е. Анализ собственных векторов матриц моментов четвертого порядка при выявлении амплитудной модуляции гауссовского шума / Нелинейный мир, 2014, т.12, №1, с.29-34.
10. Исакевич Д.В. Основы анализа собственных векторов и компонент регулярных колебаний. М.: Издательство «Перо», 2015, 140 с. ISBN 9-500086-934-5.
11. Исакевич В.В., Батин А.С., Сушкова Л.Т., Грунская Л.В., Исакевич Д.В. Использование собственных векторов ковариационных матриц для обнаружения гармонических составляющих временных рядов / Известия института инженерной физики, 2010, т.4, №18, с.62-66.
12. ЗАО «МЦСТ». http://www.mcst.ru
13. Исакевич В.В., Грунская Л.В., Исакевич Д.В. Выявление спектрально локализованных компонент на частотах лунных приливов во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли / Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. М.: ООО «Профиль-2С», 2014, вып.2, с.43-53. http://stfi.ru/documents/STFI_2014_2/total_2014_2.pdf
14. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Рубай Д.В. Анализ собственных векторов и главных компонент вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы: Частоты лунных приливов. М.: Издательство «Перо», 2015, 356 с., ISBN 9-785000-868041.
15. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Лукьянов В.Е. Собственные векторы и главные компоненты вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы на недельном интервале анализа. М.: Издательство «Перо», 2016, 138 с., ISBN 9-785906-927491.
16. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Сушкова Л.Т. Выявление спектрально локализованных компонент на частотах астрофизических процессов во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли / Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. М.: ООО «Профиль-2С», 2014, вып.2, с.54-71. http://stfi.ru/ documents/STFI_2014_2/ total_2014_2.pdf
17. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Айгеноскопия многолетних временных рядов электромагнитного поля в приземном слое атмосферы крайненизкочастотного диапазона на частотах двойных звездных систем. М.: Издательство «Перо», 2016, 276 с., ISBN 9-785906-927507.
18. Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (222Rn) на Камчатке (август 2012–август 2013 гг.) / М.: Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН. Сейсмические приборы, 2014, т.50, №3, с.63-75.

19. Фирстов П.П., Исакевич Д.В., Исакевич В.В., Будилов Д.И., Макаров Е.О., Грунская Л.В. Выделение методом айгеноскопии предвестниковых аномалий Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. с M_W=7.2 и глубиной очага 171 км (Камчатка). / Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017, №4(20), с.109-120. krasec.ru/firstov420/
20. Будилов Д.И., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Исакевич Д.В. Аппаратно-программный комплекс для регистрации подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. / Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы, 2017.

L.V. Grunskaya, V.V. Isakevich, D.V. Isakevich

EIGENOSCOPY: ANALYSIS OF NONDOMINANT TIME SERIES COMPONENTS

Vladimir State University, Eigenvector Ltd.

The work is purposed to attract attention of geophysicists to a scheme of experimental time series' eigenvectors' analyser named as eigenoscope. The scheme is introduced and its' distinctive features are shown. The opportunities and use cases of eigenoscope are reviewed which are provided by ensemble-making cases and typologies. The applications are described.

Keywords: eigenvector, eigenvalue, nondominant, component, ensemble, typology.

УДК 004.414

А.С.Квасов

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТРЕБОВАНИЯМ БИЗНЕС-ЗАКАЗЧИКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются методологические аспекты управления развитием информационных систем, их версионности, жизненного цикла и интеграции в ИТ-инфраструктуру предприятия.

Ключевые слова: информационная система, управлениеразвитием информационной системы, жизненный цикл информационной системы.

Совершенствование бизнес-процессов организации является одной из основных задач, от решения которой во многом зависит развитие ее бизнеса. [1,2,4] Современные темпы совершенствования информационных технологий и рост интенсивности обмена информацией обусловливают актуальность создания методов описания, анализа и моделирования потоков информации, а также построения моделей процессов управления жизненным циклом информационных систем, что позволяет своевременно вносить изменения в информационные системы компании, создавая для компании дополнительные преимущества.

Цикличный процесс выявления необходимости внесения изменений, доработки, тестирования и ввода в эксплуатацию обновленной информационной системы измеряется определенными ресурсными затратами. При этом высокий уровень формализации бизнес-процессов будет способствовать снижению эксплуатационных затрат.

Мониторинг необходимости изменений позволяет не допускать подобных ситуаций, обеспечивая планомерное развитие информационной системы. Достигнуть такой планомерности позволит постоянная многокритериальная оценка соответствия информационной системы требованиям бизнеса, сопровождающаяся выполнением определенных действий в соответствии с циклом Деминга[2,3].

Основным критерием оценки степени автоматизации является время, затрачиваемое на определенный бизнес-процесс. Рост необходимого времени показывает снижение уровня автоматизации, что является непосредственным сигналом к запуску очередного витка изменений в жизненном цикле информационной системы.

Наряду с временным показателем в качестве сигнального можно также рассматривать объемы ручной обработки информации. Задача подразделения автоматизации обеспечить надежную и устойчивую работу по выполнению основных функций бизнес-подразделения. Ситуации, когда работа требует ручного вмешательства, за исключением случаев, когда это действительно необходимо, не только снижает производительность работы подразделения, но и существенно увеличивает риск возникновения ошибок, снижает уровень исполнительской дисциплины, поскольку в ручном режиме действия могут не фиксироваться, а значит снижается ответственность. Увеличение ручной работы при обработке первичных документов, например, требует также дополнительных временных и ресурсных затрат на их печать, если документы изначально были в электронном виде, физический перенос из подразделения в подразделение и прочие манипуляции.

Немаловажным критерием оценки соответствия информационной системы требованиям бизнес-процессов предприятия является удобство работы и трудоемкость, необходимая как для выполнения основных бизнес-функций, так и для связанной деятельности, такой как, например, подготовка отчетности. Это наиболее трудно уловимый фактор, поскольку сотрудники бизнес подразделения могут привыкнуть к выполнению определенных действий и, не имея для сравнения других вариантов, не замечать, что выполняемая функция может быть автоматизирована эффективнее. Выявление необходимости дополнительной автоматизации происходит обычно при появлении нового сотрудника, работавшего ранее с более удобной информационной системой. В то же время, анализ и контроль возникновения подобных ситуаций может и должен быть автоматизирован.

Глубинный анализ процессов, происходящих в информационной системе в ходе выполнения подразделением бизнес-функции предприятия, позволяет производить мониторинг и своевременно информировать о необходимости запуска цикла изменений в жизненном цикле информационной системы.

В качестве примера рассмотрим цикл преобразований информационной системы, автоматизирующей бизнес-процесс формирования заключения для выдачи кредита финансовой организацией (Рис. 1).

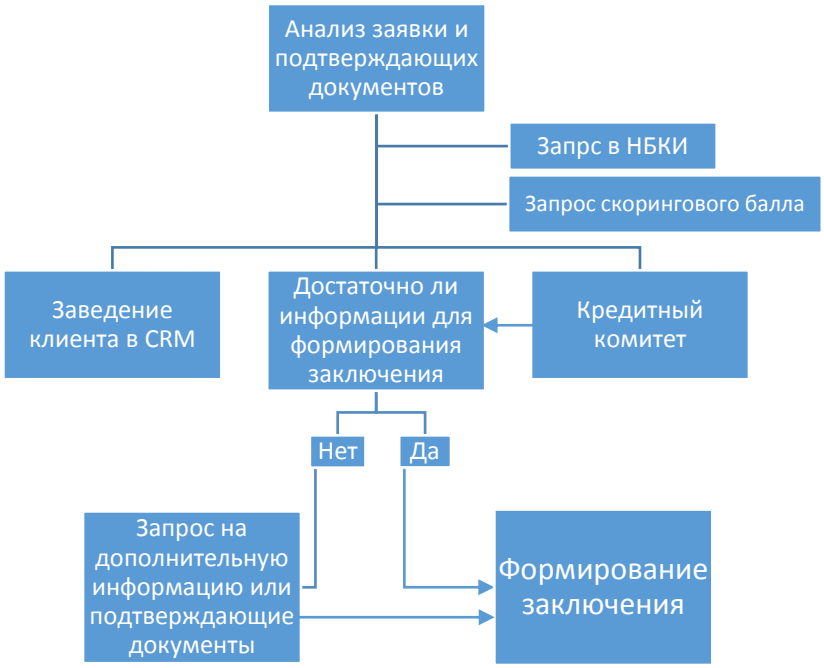


Рис. 1. Подготовка заключения на заявку по выдаче кредита

При поступлении заявки на кредит банк направляет сведения в Национальное бюро кредитных историй (НБКИ), следовательно, необходимо иметь возможность сохранить информацию из заявки в информационной системе. Кроме того, если кредит не будет выдан, кроме заявки необходимо сохранить причину невыдачи на случай повторного обращения заявителя. Для этих целей используются так называемые CRM-системы или Система управления взаимоотношениями с клиентами. Далее заявка проходит через систему оценок или скоринг, и различные проверки или андеррайтинг, а также при необходимости через кредитный комитет. Автоматизацией данного процесса занимается система Workflow или система, координирующая выполнение операций, составляющих бизнес-процессы. И лишь затем в случае положительного заключения происходит выдача кредита, а сам кредит, как продукт банка, переходит в учётную систему, из которой также информация регулярно направляется в НБКИ. Укрупненное описание данного бизнес-процесса показывает важность его автоматизации, поскольку наличие задержек или недостаточности информации ещё на первоначальном этапе может привести к проволочкам и потери клиента, а банк может нести репутационные риски и риски невозвратных кредитов.

Таким образом, выполняя однотипные операции информационная система в автоматическом режиме отслеживает отклонения от заданных показателей и сигнализирует о необходимости вмешательства. В процессе выполнения бизнес-функций и циклов повышения уровня автоматизации показатели критериев оценки могут меняться, обеспечивая эволюционный процесс развития информационной системы.

Для организации крайне важно, чтобы поставщик учитывал все факторы, затрудняющие обновление информационных систем таким образом, чтобы смена версий не приводила к простоям, а, следовательно, к финансовым потерям. Продукт должен быть качественным и установлен своевременно.[4]

Высокие темпы развертывания приводят к тому, что перед группой разработки накапливается большой набор задач по доработке ИС. Современные методы объединения усилий разработчика и знаний бизнес-заказчиков, называемые DevOps(от англ. development и operations) или набор практик, нацеленных на активное взаимодействие специалистов по разработке со специалистами по информационно-технологическому обслуживанию и взаимную интеграцию их рабочих процессов друг в друга особенно хорошо дополняют зарекомендовавший себя ранее метод Agile – гибкий подход или серия подходов к разработке программного обеспечения, ориентированных на использование итеративной разработки, динамическое формирование требований и обеспечение их реализации в результате постоянного взаимодействия внутри самоорганизующихся рабочих групп, состоящих из специалистов различного профиля, так как он расширяет и дополняет процессы непрерывной интеграции и выпуска продукта, давая уверенность в том, что код готов к выпуску и несет ценность для клиента.

По своей сути методология DevOps представляет собой расширенный вариант цикла Деминга, т.е. постоянный процесс регулирования усовершенствования продукта с разделением на область деятельности ИТ-подразделения и бизнес-подразделения. В настоящее время существует большое множество в том числе свободно распространяемых программных продуктов, реализующих отдельные этапы жизненного цикла информационной системы (рис. 2.), однако реализация полного цикла – индивидуальная задача каждой организации и от качества решения данной задачи зависит стабильность бизнеса организации.

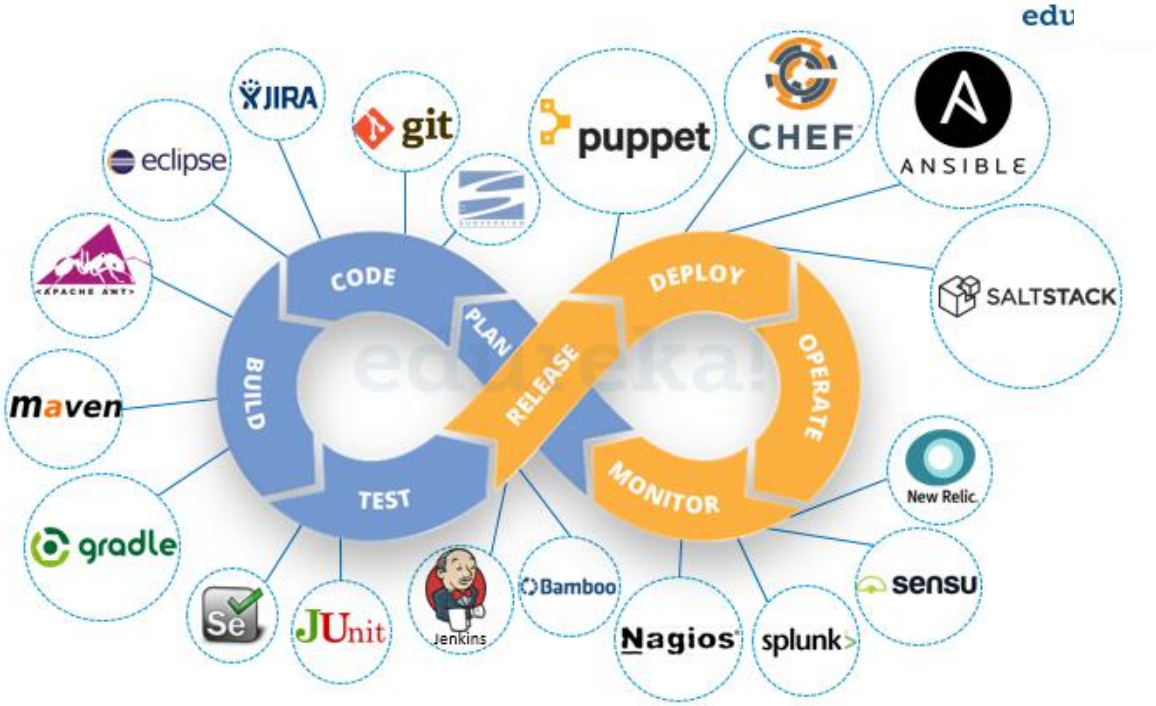


Рис. 2. Программное обеспечение для сопровождения цикла DevOps

Заключение. Организационное обеспечение и автоматизация процессов взаимодействия бизнес-подразделений и ИТ-службы с применением современных технологических решений позволяетобеспечить эффективную работу ИТ-подразделения, и высокий уровень поддержки жизненного цикла информационной системы бизнес-заказчика организации, что в свою очередь обеспечивает конкурентное преимущество организации на быстро меняющемся и высоко технологичном рынке.

Библиографический список

1. Баранов В.Г., Милов В.Р., Алексеев В.В., Егоров Ю.С, Дмитриев Д.В., Карнавский Е.Л., Капранов С.Н., Кольцов В.А., Милов Д.В., Реунов А.В., Савченков СВ., Севрюков А.А., Соколова Э.С., Степаненко М.А., Цыс В.М., Шалашов И.В., Шиберт Р.Л. Интеллектуальные информационные системы мониторинга и проектирования: Монография / под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2014. – 136 с.

2. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии) / Под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с

3. ХамблДжез, ФарлиДейвид. Непрерывное развертывание ПО: автоматизация процессов сборки, тестирования и внедрения новых версий программ. : Пер. с англ. — М. : ООО “И.Д. Вильямс”, 2011. — 432 с.

4. Квасов А.С., Седаков Д.В. Методологические основы моделирования систем управления внедрением и развитием информационных комплексов. ИСТ-2017. – Нижний Новгород, 2017.– С. 145-148.

A.S. Kvasov

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENSURING THE CONFORMITY INFORMATION SYSTEM REQUIREMENTS OF THE BUSINESS CUSTOMER

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva

The methodological aspects of managing the development of information systems, their versioning, the life cycle and integration into the IT infrastructure of the enterprise are considered.

Key words: information system, management of information system development, life cycle of information system.

УДК 681.3

А.М. Лабаев, И.Д. Охотников, В.П. Хранилов, М.В. Ширяев

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ УЧЕБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ «ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Разработка модели управления вычислительными ресурсами в условиях внедрения технологий «Цифровой экономики» для организации сопровождения учебного процесса в вузе.

Методология / подход: Применение модели вычислительных ресурсов и алгоритмов их мониторинга предоставляет возможность прогноза эффективности вычислительных средств поддержки учебного процесса и оптимизации их экономических показателей.

Результаты: Построена модель интерактивного управления информационными ресурсами в задачах разработки и внедрения средств технологий «Цифровой экономики» для организации сопровождения учебного процесса в вузе. Приведены диаграммы, иллюстрирующие предложенные модели и алгоритмы интерактивного управления вычислительными ресурсами.

Применение: Для эффективного управления вычислительными ресурсами, модернизации и перераспределения средств технического и программного обеспечений информационных технологий, предназначенных для поддержки учебного процесса в техническом вузе.

Оригинальность / значение: Данные проведенного мониторинга позволяют принимать обоснованные расчетом организационные решения, связанные с управлением вычислительными ресурсами, то есть модернизацией и перераспределением средств технического и программного обеспечений информационных технологий, предназначенных для поддержки учебного процесса в техническом вузе.

Ключевые слова: концепция «Цифровой экономики», CALS-технологии, модель вычислительных ресурсов, пространство параметров, пространство состояний, рейтинг, оценка и прогноз вычислительных ресурсов.

Введение

Современные информационные технологии, развиваемые в рамках концепции «Цифровая экономика» [1] и реализуемые в учебном процессе вуза, предъявляют особые требования к оснащенности вуза средствами вычислительной техники и специализированным периферийным оборудованием. Вычислительные ресурсы технического обеспечения информационных технологий определяют образовательный потенциал учебного заведения в области подготовки

специалистов перспективных инновационных направлений и обеспечивают элементы экономической безопасности образовательной деятельности в части развития востребованных направлений учебной работы в опорном техническом университете [2]. Опыт зарубежных и ведущих отечественных вузов предполагает в первую очередь организацию непрерывной информационной поддержки жизненного цикла учебного процесса – CALS- или ИПИ-технологии (в отечественной транскрипции) [3-4], объединяемых естественным образом концепцией «Цифровой экономики», требующей, в свою очередь, мобилизации и концентрации имеющихся вычислительных ресурсов.

Модель вычислительных ресурсов в пространстве параметров и состояний

Для формализации способов принятия решений и моделирования процесса оценки вычислительных ресурсов, являющихся основой мониторинга, в пространстве параметров **P** предложена математическая модель интерактивного распределения ресурсов при выборе средств поддержки CALS-технологий [4]. При моделировании процесса распределения ресурсов в условиях наличия альтернативных вариантов предлагается использовать векторную модель **Y**=**F**(**P**,**Λ**), где **P** – вектор ресурсов системы (внутренних параметров, определяемых технико-экономическими характеристиками элементов); **Λ** – вектор параметров внешних воздействий; **Y** – вектор выходных параметров, определяющий интегральные технико-экономические характеристики системы и отображающий результаты проектирования; **F** – теоретико-множественный функционал, выражающий соответствие q = (**P**,**Y**,**F**) с учетом воздействия внешних факторов **Λ**. Дальнейшее решение задачи оценки вариантов системы связано с определением степени влияния отдельного показателя p_j на качество (эффективность) системы. Это предполагает задание в качестве внешнего управляющего параметра коэффициентов важности ("веса") показателей λ_j, образующих вектор весомости $\mathbf{\Lambda}=\{\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n\}$. Значения весовых коэффициентов определяются, исходя из функционального назначения и особенностей эксплуатации компьютеров, методом экспертных оценок. Такой подход позволяет в процедуре оценивания отдавать предпочтение более важным показателям, что приводит к оценке решения с помощью взвешенной целевой функции $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$. Функцию $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$ можно представить как скалярное произведение векторов $\mathbf{P}=\{p_{i,j}\}$ и $\mathbf{\Lambda}=\{\lambda_j\}$, $j=1,n$: $F(\mathbf{P},\Lambda)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\lambda_j p_{i,j}$ [5]. Сопоставимость влияния каждого показателя на величину целевой функции обеспечивается нормировкой. Операции нормирования и масштабирования могут быть осуществлены одним и тем же преобразованием, определяемым особенностями решаемой задачи оценки или выбора.

Для представления модели управления вычислительными ресурсами в пространстве состояний рассмотрим задачу проектирования вычислительной системы – **Q**, состоящей из объектно-ориентированных модулей–наборов (ООН) $\mathbf{Q}_i$, формируемых из множества вариантов проектных решений $\mathbf{V}_j$ [4,5]. Процедура формирования ООН включает этап анализа и оценки множества вариантов проектных решений **V**, составляемого из $m_i \in \mathbf{M}$ в интерактивном режиме, с учетом предпочтений разработчика, качественных и количественных технико-экономических показателей и параметров элементов. Этот этап может осуществляться как в реальном процессе формирования наборов, так и виртуально, путем имитационного комбинаторного моделирования. При достижении устойчивой работоспособности варианта реализации ООН, составленного из $v_i \in \mathbf{V}_j$, перешедших, в свою очередь, из **M** при интерактивном участии разработчика, становится возможным зафиксировать ООН $\mathbf{Q}_i$. При формировании структуры **Q** комбинацией элементов наборов v_i в виртуальной фазе **V** происходит перераспределение элементов модулей $\mathbf{V}_j$ и, соответственно, их параметров. Таким образом, для формализованного описания состояний проектируемой вычислительной системы в пространстве состояний, определенного в обозначениях рассматриваемой модели, имеем теоретико-множественное отображение $\Gamma:\mathbf{M}\rightarrow\mathbf{Q}$; $\Gamma=\Gamma_1\cup\Gamma_2$; $\Gamma_1:\mathbf{M}\rightarrow\mathbf{V}$ и $\Gamma_2:\mathbf{V}\rightarrow\mathbf{Q}$ [4].

Расчет рейтингов вычислительных ресурсов

Получаемые для каждого оцениваемого варианта значения скалярной целевой функции $F(\mathbf{P}, \mathbf{\Lambda})$, выраженные как $R_i = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \bar{p}_{i,j}$, дают значение его интегральной оценки по приведенным (нормированным) значениям и позволяют провести сравнение различных конфигураций вычислительных средств (компьютеров и периферийных устройств) по введенным параметрам. Величина R_i определяет *рейтинг* варианта и используется для оценки и сравнения вычислительных ресурсов и эффективности формируемой или оцениваемой вычислительной системы.

Определенные таким образом рейтинги отдельных компьютеров подразделения, рассчитанные на 1 мая 2018 г. позволяют оценить их вычислительные ресурсы, а при суммировании получить интегральную оценку (рейтинг) всего подразделения (отдельного компьютерного класса ИВЦ).

Анализ рейтингов. Прогнозирование ресурса работоспособности подразделений

Дальнейший анализ полученных рейтингов подразумевает выделение так называемого опорного продукта – программного средства, с которым работает наибольшее число студентов в рамках выбранного направления обучения. В условиях ИВЦ НГТУ такими опорными программными продуктами могут выступать:

- AutoCAD версия 19.0 (AutoCAD 2013) – для направления «Графика»;
- Microsoft Visual Studio 2010 (версия 10.0) – для направления «Программирование»;
- Microsoft Office 2007 (версия 12.0) – для направления «Информатика».

Каждый из перечисленных продуктов характеризуется совокупностью системных требований, определяющих минимальные значения соответствующих параметров компьютеров, при которых обеспечивается устойчивая работа установленной программы. Соответствующие требования, выраженные весовыми коэффициентами, отражаются на значениях диаграмм рейтингов по выбранным профильным направлениям (Рис.1– рис.3).

В условиях ограниченности бюджета организации (что, несомненно, справедливо к образовательным учреждениям) задачей особой важности является обеспечение максимальной длительности функционирования оборудования. Для того, чтобы грамотно спланировать финансовую деятельность, необходимо иметь формализованное выражение для изменений уровня требований опорных программных продуктов в будущем. Результаты моделирования таких экстраполирующих зависимостей приведены на рис.4 – рис.6.

Таким образом, для AutoCAD – функция прогнозирования имеет следующий вид: $y=0{,}0115x^2+0{,}2553x+0{,}7104$; для Visual Studio – $y=0{,}0274x^2–0{,}0979x+0{,}8452$; для Microsoft Office – $y=0{,}0552x^2–0{,}1521x+0{,}2552$.

Для визуализации рассчитанных данных построим диаграмму рассчитанных рейтингов вычислительных ресурсов компьютеров в классах ИВЦ и спрогнозированных экстраполяцией значений рейтингов опорных программных продуктов, условно назвав их по наименованию программного продукта и года его предположительного выпуска. Соответствующие диаграммы представлены на рис.7 – рис.9.

Рис.1. Диаграмма рейтингов направления «Графика»

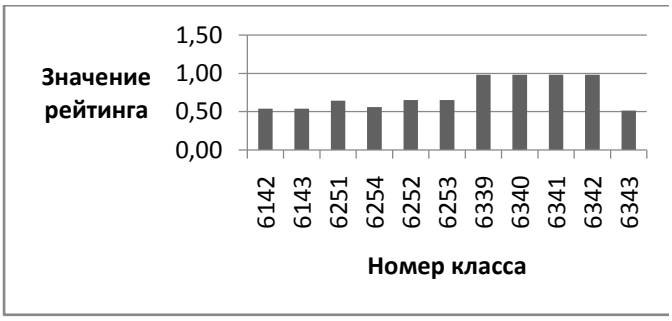


Рис.2. Диаграмма рейтингов направления «Программирование»

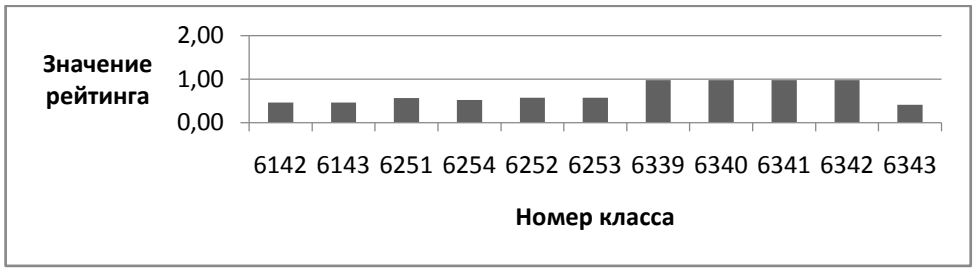


Рис.3. Диаграмма рейтингов направления «Информатика»

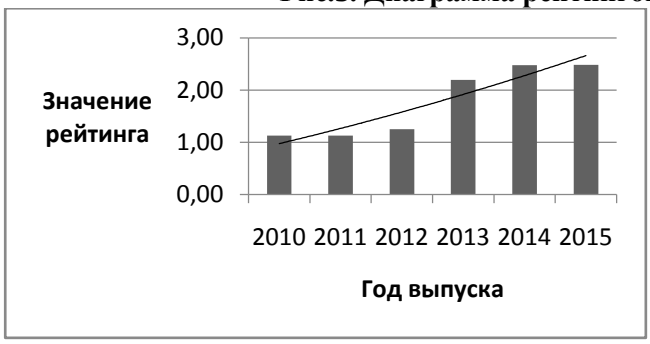


Рис.4. Изменение рейтингов системных требований опорного продукта AutoCAD

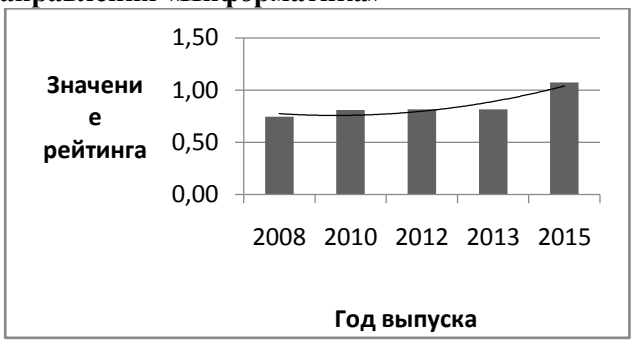


Рис.5. Изменение рейтингов системных требований опорного продукта Visual Studio

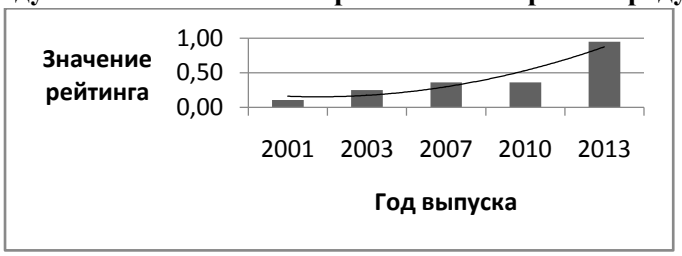


Рис.6. Изменение рейтингов системных требований Microsoft Office

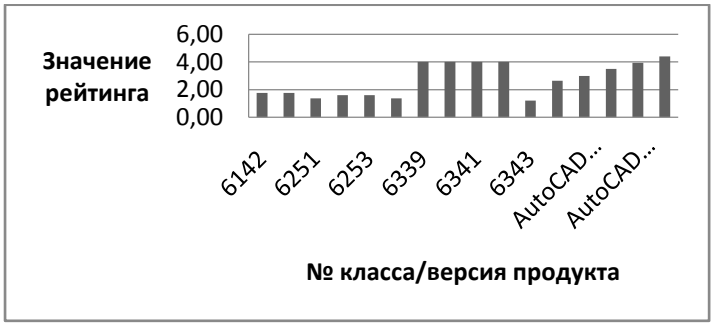


Рис.7. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям AutoCAD

Рис.8. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям Visual Studio

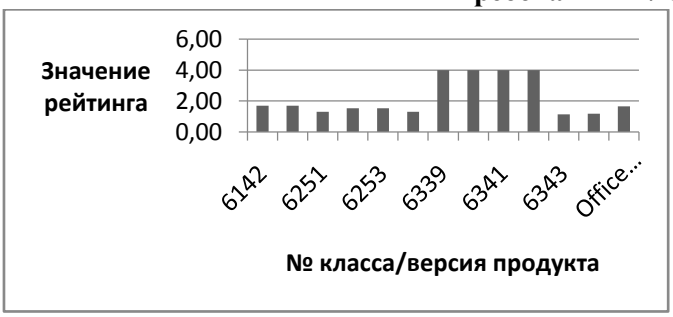


Рис.9. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям Microsoft Office

Заключение

Предложенная рейтинговая оценка вычислительных ресурсов при систематической её реализации позволяет осуществить постоянный мониторинг вычислительных ресурсов подразделений университета.

Данные проведенного мониторинга позволяют принимать обоснованные расчетом организационные решения, связанные с модернизацией и перераспределением средств технического и программного обеспечений информационных технологий, предназначенных для информационной поддержки учебного процесса в вузе [2].

Библиографический список

1. Программа "Цифровая экономика Российской Федерации"/ УТВЕРЖДЕНА распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
2. Ширяев М.В. Управление экономической безопасностью технического вуза: основные подходы / М.В. Ширяев, С.Н. Митяков, С.Л. Моругин // Экономика и менеджмент систем управления. – 2014. – Т.12. – № 2.2. – С. 318-326.
3. Гунин Л.Н. Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятии в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов / Л.Н.Гунин, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2006.–Н.Новгород, 2006. С.127.
4. Гунин Л.Н. Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов: монография / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов.– Н.Новгород, НГТУ, 2006. –153 с.
5. Баранов, В.Г. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем: монография / Баранов В.Г., Милов В.Р. ... Хранилов В.П., Ширяев М.В. и др. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2016.– 216 с.

A.M. Labaev, Iv.D. Okhotnikov, V.P. Khranilov, M.V. Shiryaev

INTRODUCTION OF MONITORING TECHNOLOGIES AND MANAGEMENT OF COMPUTING RESOURCES OF EDUCATIONAL EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF THE "DIGITAL ECONOMICS" TECHNOLOGIES

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

Purpose: To develop a model of managing computing resources in the conditions of introduction of technologies of the "Digital Economy" for organizing the support of the educational process in the university.

Design/methodology/approach: The application of the model of computational resources and their monitoring algorithms provides the possibility of predicting the effectiveness of computational means of supporting the educational process and optimizing their economic indicators.

Findings: The model of interactive management of information resources in the tasks of developing and implementing the means of technologies of the "Digital Economy" for organizing the support of the educational process in the university is constructed. The diagrams illustrating the proposed models and algorithms for interactive management of computing resources are presented.

Research limitations/implications: In order to effectively control computing resources, modernization and redistribution-ment means hardware and software information technologies designed to support the educational process in technical universities.

Originality / significance: The monitoring data allow to make organizational decisions based on the management of computing resources, that is, the modernization and redistribution of technical and software tools for information technologies designed to support the educational process in a technical university.

Key words: concept of "Digital economy", CALS-technologies, model of computing resources, parameter space, state space, rating, estimation and forecast of computing resources.

УДК 681.3

А.С. Макаров

АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Разработка модели управления устройством виртуальной реальности для организации амбулаторного лечения амблиопии.
Методология / подход: Применение разработанной модели предоставляет возможность сделать процесс интерактивным, и, как следствие, более эффективным
Результаты: Предлагаемая система способна лечить амблиопию с помощью технологии виртуальной реальности за счёт виртуальной линзы, созданной в виртуальной среде. Технической задачей является, создание эффективного лечения амблиопии у больных. Техническим решением является, аппаратно–программный комплекс позволяет проводить лечение амблиопии с помощью виртуальной линзы. Компонентом обеспечивающее лечение является, спрограммированная специалистом виртуальная линза.
Применение: Для эффективного лечения нарушений зрения – амблиопии. Система разрабатывается для больниц, поликлиник, санаториев и других медицинских учреждений.
Оригинальность / значение: Данная система может быть внедрена в больницы и поликлиники. В больницах и поликлиниках существует нехватка оборудования, позволяющего лечить амблиопию, что, в свою очередь, формирует плотный поток пациентов. Возможность расширения системы позволит лечить другие заболевания. Пациенты, относящейся к детской группе больных, отдадут приоритет данной системе, за счёт её интерактивности.

Ключевые слова: технологии виртуальной реальности, шлем виртуальной реальности, очки виртуальной реальности, амблиопия, «виртуальная линза».

Введение

Информационные технологии в современном мире непрерывно развиваются. При появлении новой технологии обнаруживаются многие способы её применения. Технология виртуальной реальности (VR) не стала исключением.

Технологии виртуальной реальности позволяют перенести человека в виртуальное пространство напрограммированное специалистом. Такая возможность, позволяет использовать технологию в медицине, в частности в офтальмологии.

Система, созданная на базе технологий VR, имеет огромный потенциал в возможности визуализаций. Пациент, погружённый в визуальную среду в процессе лечебной процедуры, имеет большой ряд преимуществ по сравнению со случаем использования для этой цели обычного медицинского оборудования. Также система способна открыть возможность домашнего лечения, что раньше не представлялось возможным.

Возможности современных устройств виртуальной реальности

Существует два основных технических решения для технологии виртуальной реальности [1]. Первое решение: очки виртуальной реальности. Данная конструкция состоит из смартфона с поддержкой VR технологии и VR очков, которая представляет корпус с встроенной оптикой с диоптриями. Вместе эта конструкция представляет устройство для погружения в виртуальную реальность. Второе решение: шлем виртуальной реальности. Такое устройство состоит из корпуса, фокусных линз, встроенного дисплея и наушников. Данное устройство подключается к персональному компьютеру, на котором происходят формирование необходимых графических образов, транслируемых на встроенный дисплей.

Технология VR имеет преимущества:

- Угол обзорности. Чтобы рассмотреть виртуальную среду, человеку в шлеме виртуальной реальности не надо пользоваться какими либо устройствами, он просто поворачивает голову.

Поворот головы является более естественным, в следствии более удобным способом взаимодействия с окружающей виртуальной средой.

- Глубокое погружение в виртуальное пространство. За счёт того, что в область зрения человека не попадает сторонних предметов реального пространства, человек более сфокусирован на виртуальной среде.
- Быстрое погружение в виртуальную среду. Из-за того, что размерность дисплея в VR шлеме совпадает с углом обзора глаза, человеческий мозг быстрее начинает воспринимать виртуальную среду, как реальную.
- Портативность и компактность. Очки виртуальной реальности легко транспортировать за счёт компактности устройства.

Постановка медицинской задачи лечения амблиопии

Медицинской задачей является обеспечение корректировки зрения при помощи медицинского оборудования. Амблиопия или в медицинской терминологии «ленивый глаз» - это функциональное обратимое нарушение зрения, при котором у больного не задействован один или два глаза в зрительном процессе [2]. Глаза видят разные картинки или же один из глаз имеет деградирующий нерв, это в свою очередь приводит к невозможности совместить изображение с двух глаз в единое целое. В результате мозг подавляет работу одного из глаз. У пациентов такого типа отсутствует бинокулярное зрение – способность мозга правильно сопоставлять зрительное изображение. Такая способность необходима людям для оценки объемной картины мира и целостного восприятия действительности. Существует несколько разновидностей амблиопии: анизометропическая, депривационная, обскурационная, дисбинокулярная, истерическая, рефракционная. Ряд наследственных заболеваний сопровождается амблиопией [2]: синдром Бенче: асимметричная лицевая гиперплазия, косоглазие; реципрокная сбалансированная транслокация; отставание умственного развития, низкий рост; синдром Кауфмана; офтальмоплегия с птозом и миозом.

Тактика терапии

Для обеспечения максимального результата лечения амблиопии необходима коррекция имеющейся аномалии рефракции. Полноценная коррекция необходима для получения отчётливого изображения на сетчатке глаза. Пациенту в таком случае назначают окклюзию сильного глаза. При этом окклюзия должна быть длительный период времени. Только в таких условиях можно обеспечить конкурентное тормозящее влияние сильного глаза (ведущего глаза). При этом проводится повторные осмотры зрения ежемесячно. Длительность терапии диктуется динамикой изменения остроты зрения амблиопичного глаза. Если за период двух месяцев не происходит положительных изменений продолжение лечения с помощью окклюзии нецелесообразно [2].

Применение современных технологий для лечения

Болезнь амблиопия в большинстве случаев поддаётся лечению при условии своевременного обращения к специалистам. Пациентов с амблиопией лучше лечить в детском возрасте до 12-летнего возраста. Родители должны быть осведомлены, что их детям необходимо исследование остроты зрения до начала учёбы.

В настоящее время широкое применение находит технология лечения, основанная на эффекте нейропластичности. Нейропластичность – способность мозга менять свою архитектуру нейронов под действием внешних воздействий. В этом случае применяют компьютерные программы, демонстрирующие пациенту специальные образы. Данный метод построен на основе стимуляции пятна Габора показанного на рис. 1. В результате прохождения курса лечения, возможно, улучшение остроты зрения в среднем на 2.5 строки. Курс лечения занимает около трёх месяцев и доступен для пациентов старше 9 лет. Эта технология позволяет также лечить амблиопии у взрослых.

Лечение амблиопии может проходить по нескольким направлениям: тренировка амблиопичного глаза, правильная коррекция аметропии (дефекта оптики) и устранение косоглазия. В офтальмологической клинике «Эксимер» терапевтическое лечение амблиопии проводится при помощи уникального аппарата «Реамед-А» [3].

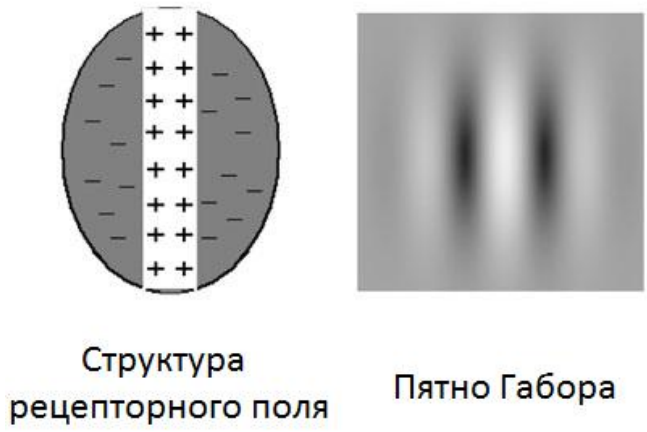


Рис. 1 – Пятно Габора

В основе действия прибора «Реамед-А» лежит метод видеокомпьютерного аутотренинга. Пока пациент смотрит фильм или мультфильм, прибор с помощью датчиков снимает информацию о работе глаз, одновременно фиксируя энцефалограмму. При этом изображение на экране сохраняется только во время «правильного» зрения и исчезает, как только оно перестает быть четким. Таким образом, прибор как бы заставляет мозг подсознательно сокращать периоды неконтрастного зрения. Подобный подход оптимизирует работу нейронов зрительной коры, а зрение при этом существенно улучшается.

Применение принципа «виртуальной линзы»

Воздействие на глаз, аналогичное описанному выше, возможно создать с использованием принципа «виртуальной линзы», реализуемого при помощи технологий VR. Предлагаемая система, построенная на основе одного из устройств VR, способна лечить амблиопию с помощью технологии VR за счёт «виртуальной линзы», созданной в виртуальной среде.

Техническим решением является, аппаратно–программный комплекс, позволяющий проводить лечение амблиопии с помощью «виртуальной линзы».

Реализация лечебной системы с применением VR

Предлагаемая система способна лечить амблиопию с помощью технологии виртуальной реальности за счёт “виртуальной линзы», созданной в виртуальной среде очков VR.

Технической задачей является, создание эффективного лечения амблиопии у больных.

Техническое решение – аппаратно–программный комплекс позволяющий проводить лечение амблиопии с помощью «виртуальной линзы».

Компонентом обеспечивающее лечение является, созданная в вычислительной среде компьютера специально запрограммированная специалистом «виртуальная линза».

При реализации функциональных возможностей системы используется язык программирования C#. Его применение обосновывается значительными сравнительными преимуществами в плане создания программ, а также возможностью поддержки последних современных стандартов программирования.

В качестве среды для разработки 3D проекта выбран Unity, продукт компании Unity Technologies [4], потому что он имеет ряд преимуществ перед другими средствами разработки. Для 3D моделирования выбран программный продукт 3Ds Max, разработанный компанией AutoDesk. Для использования системы для мобильных устройств под платформой Android, применяется SDK google android studio, в качестве плагина для виртуальной реальности Google CardBourd.

Использование плагина Google Cardboard обуславливается тем, что он поддерживает большее количество версий Android.

Заключение

Таким образом, проведен анализ существующих методов лечения амблиопии, возможностей перевода их в «виртуальную среду» имеющихся в распоряжении устройств VR а также исследования методов и способов реализации программного обеспечения, позволяющего лечить данное заболевание. Масштабное исследование предметной области позволило использовать существующие методики лечения для создания новых методик лечения с использованием технологии виртуальной реальности. В результате создан аппаратно–программный комплекс позволяющий проводить лечение амблиопии с помощью «виртуальной линзы», показавший целый ряд преимуществ перед используемыми в современной офтальмологической клинической практике инструментальных терапевтических средств: кроссплатформенность, невысокая стоимость, подтвержденная испытаниями высокая эффективность лечения, портативность. Практическая ценность работы: возможность легкого внедрения в больницы и поликлиники; устранение в больницах и поликлиниках существующей нехватки оборудования для лечения амблиопии, что, в свою очередь, формирует плотный поток пациентов, возможность расширения системы с созданием условий для лечения других офтальмологических заболеваний; привлекательность предлагаемого метода терапии для пациентов, относящихся к детской группе больных, который с большой долей вероятности отдадут приоритет данной системе, за счёт её интерактивности и использования прогрессивных компьютерных устройств.

Библиографический список

1. Виды виртуальной реальности. [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://tproger.ru/translations/vr-explained//, свободный. – Загл. с экрана.
2. Передерий В.А. Глазные болезни. Полный справочник/ В.А. Передерий.-М.:Эксмо,2008.–704 с.
3. «Комплекс функционального биоуправления по электрофизиологическим параметрам и микрополяризации зон головного и спинного мозга «РЕАМЕД» с биологической обратной связью. [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://simtmed.ru/files/reamed-all.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
4. Информация о среде разработки Unity3d. [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.unrealengine.com/en-US/what-is-unreal-engine-4, свободный. – Загл. с экрана.

A.S. Makarov

ADAPTATION OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES FOR MEDICAL APPLICATIONS IN OPHTHALMOLOGY

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

Purpose: Development of a virtual reality device management model for the organization of ampulopic treatment for amblyopia.

Methodology / approach: Application of the developed model provides an opportunity to make the process interactive, and, as a consequence, more efficient

Results: The proposed system is able to treat amblyopia with virtual reality technology at the expense of a virtual lens created in a virtual environment. The technical task is to create an effective treatment for amblyopia in patients. The technical solution is, the hardware and software complex allows you to treat amblyopia with a virtual lens. The component providing the treatment is a virtual lens programmed by the specialist.

Application: For the effective treatment of visual impairment - amblyopia. The system is being developed for hospitals, polyclinics, sanatoriums and other medical institutions.

Originality / Significance: This system can be implemented in hospitals and clinics. In hospitals and clinics, there is a shortage of equipment to treat amblyopia, which in turn forms a dense flow of patients. The possibility of expanding the system will allow treating other diseases. Patients belonging to the children's group of patients will give priority to this system, due to its interactivity.

Key words: virtual reality technologies, virtual reality helmet, virtual reality glasses, amblyopia, "virtual lens".

УДК 004.896:535.8

Блайвас М.Г., Дмитриев И.Н., Дмитриев А.В., Ярцев И.М.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕР ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

АО «Федеральный научно-производственный центр
«Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»

В статье рассмотрены результаты разработки управляемой высокопроизводительной системы отображения объектов в стереорежиме в реальном времени. Задачей является разработка устройства и программного обеспечения для получения совмещенной стереопары с двух камер в реальном времени и отображение на устройствах стереовывода с задержкой менее 20 мсек. Разработанная система отлаживался на малой дальности в качестве стереомикроскопа. Испытания проводились на макете глаза, а также при выполнении работ связанных с пайкой мелких деталей. Планируется применение системы для наблюдения за малоразмерными воздушными объектами на дальностях до 2 км путем доработки ПО, смены объективов и увеличения стереобазы.

Ключевые слова: стереорежим, малая дальность, малоразмерные воздушные объекты.

В настоящее время существует ряд работ по наблюдению, обнаружению и сопровождению малоразмерных высокоскоростных объектов в оптическом диапазоне [1,3]. Также проводятся работы на подвижных платформах, что требует использования камер с повышенными характеристиками (частотой кадров, высоким разрешением). Для решения этих задач необходимо построение высокопроизводительной системы обработки.

Целью данной работы было создание такой высокопроизводительной системы и разработки специализированного программного обеспечения (СПО) для наблюдения, обработки сигналов и отображения объектов в стереорежиме для визуализации объемности сцены [2].

Предъявляемые требования к системе:

- частота кадров более 50 кадров в секунду (fps) в каждом канале;
- размер входных изображений с каждой из камер не менее 1920*1080 пикселей;
- возможность применения оптического и цифрового увеличения до 30 крат;
- обеспечение управления параметрами стереопары (фокус, увеличение, диафрагма, экспозиция, усиление и параметрами совмещения изображений).

Использование существующих средств оказалось невозможным из-за большой задержки кадра, невозможности получения изображения FullHD размеров с высокой частотой и из-за зашумленности изображения. Также имеющиеся каналы передачи видеоизображения (USB2.0 и Ethernet) были не способны реализовать передачу кадров с необходимой скоростью, что приводило к задержке кадров и малому числу fps.

В качестве высокопроизводительных средств захвата изображения были выбраны камеры с интерфейсом USB3.0, который имеет теоретический предел скорости передачи 5 Гбит/сек. К данным камерам через специализированные переходники были подключены управляемые объективы. Для управления объективами была разработана специализированная плата управления, позволяющая изменять оптические параметры видеозахвата.

Для создания стереопары камеры были установлены на разработанную платформу с сервоприводами, имеющую по 2 степени свободы на каждую камеру и управляемую при помощи разработанной специализированной платы управления платформой. Это позволило изменять параметры совмещения изображения.

На втором этапе был разработан комплекс специализированных программных средств по управлению параметрами объективов, камер и платформы, по захвату видеоизображений с камер и выводу совмещенного изображения на устройство 3D вывода с необходимыми параметрами визуализации.

Возможность получения повышенного количества кадров в секунду для FullHD размера является не только аппаратной, но и программной задачей. Для оптимизации кода разработанное ПО отлаживалось на низкопроизводительном неттопе со следующими характеристиками. Процессор Intel Pentium 2127U 1,9 GHz; Оперативная память 4096 МБ; Видеокарта intel HD Graphics; Интерфейс USB 3.0 intel(R) 8 series/C220.

По результатам отладки была выбрана следующая схема передачи данных.

1. Создание двух потоков (по одному на каждое ядро). Каждый из потоков производит захват кадра по USB 3.0 с каждой камеры и записывает его в ОЗУ.

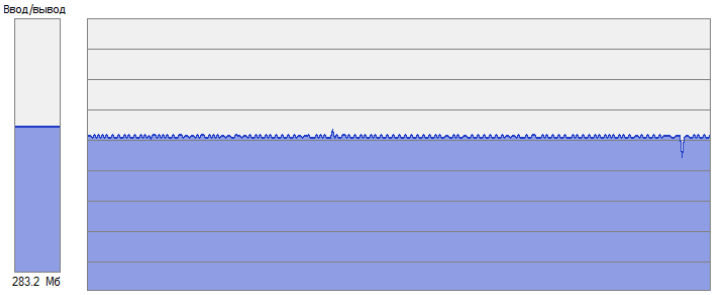


Рисунок 1 – Суммарная загруженность USB 3.0 шины

2. Используемые камеры, выдают кадр с разрешением, большем, чем FullHD поэтому каждый поток проводит кадрирование кадра в ОЗУ в зависимости от необходимой области интереса.

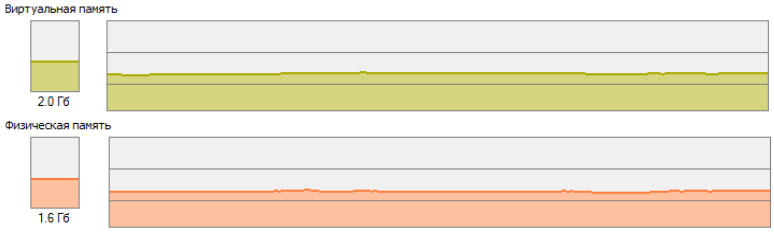


Рисунок 2 – Загрузка ОЗУ

3. В каждом потоке производится масштабирование кадра под размер устройства вывода.

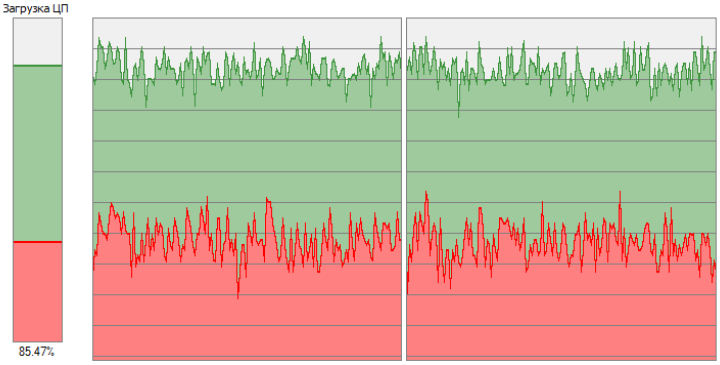


Рисунок 3 – Загрузка центрального процессора (ЦП)

4. Кадры помещаются в видеопамять, вся работа с видеопамятью производится асинхронно, и после выгрузки кадра в видеопамять процессор сразу принимает следующий кадр.

5. В зависимости от типа устройства стереовывода производится упаковка кадров в видеопамяти и непосредственный асинхронный вывод.

Как видно из рисунков 1-4 при таком построении ПО обеспечивается даже запас по производительности USB 3.0 шины, ЦП и ГП даже на таком низкопроизводительном неттопе.

Невостребованные ресурсы были использованы после добавления в ПО следующих возможностей:

1. Автоматическая фокусировка во всем диапазоне дальности, автоматическая фокусировка в малых пределах для точной подстройки резкости и автоматическая следящая фокусировка.
2. Автоматическая калибровка оптических осей в вертикальной плоскости по видеоизображениям.
3. Автоматическое сведение оптических осей в горизонтальной плоскости для переноса центра наблюдаемого объекта в нулевую дальностную точку стереосцены в устройстве стереовывода.
4. Автоматическая регулировка диафрагмы и экспозиции для получения наилучшей ГРИП (глубина резко изображаемого пространства).
5. Цифровая стабилизация двух видеопотоков.

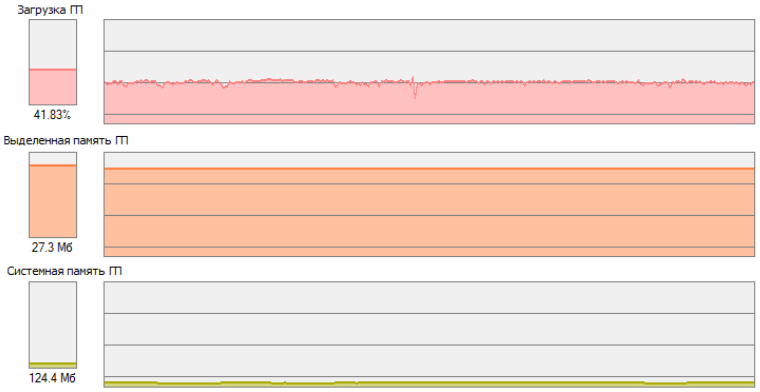


Рисунок 4 - Загрузка графического процессора (ГП)

Третьим этапом работы является система наведения и слежения с автоматизированной системой настройки [3]. Для этого была использована система из высокопроизводительной камеры и дополнительного вычислительного блока. Данное разделение необходимо для наведения и обработки, не влияющей на основную обработку и отображение стереосистемы. Также для этих целей желательно использовать черно-белую камеру из-за большей чувствительности матрицы. Этап разделяется на несколько шагов, а именно:

1. Получение кадра с черно-белой камеры.
2. Обработка кадра с учетом информации о сцене, выделение областей изменения и сегментирования контуров по характеру движения.
3. Выбор объекта для слежения и расчет характера движения [4].
4. Передача данных о цели на основной блок системы для наведения и настройки стереоплатформы для вывода цели на экран оператора.

Разработанный комплекс программно-аппаратных средств отлаживался при работе на малой дальности (0,5-2м) в качестве стереомикроскопа. Далее планируется применение комплекса для наблюдения за малоразмерными воздушными объектами на дальностях до нескольких километров путем замены объективов и масштабирования платформы с целью увеличения стереобазы.

Таким образом, устройство обладает высокими техническими характеристиками, что позволяет в дальнейшем создать высокопроизводительную высокоточную систему для прикладных задач работы по воздушным и наземным целям в ближней зоне за счет выбора соответствующих характеристик системы.

Библиографический список

1. Б.А. Алпатов и др. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов.

2. М.Г.Блайвас, И.Н.Дмитриев, С.Н.Матюгин, И.М.Ярцев. Обнаружение линейчатых структур (растяжек) на оптических изображениях с использованием детектора движения.

3. Соловьев В.А., Купреев А.В., Жендарев М.В., Якименко И.В., Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. – Т.10 вып.3. – 2011, «Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами»

4. D.K. Prasad Survey of The Problem of Object Detection in Real Images. - International Journal of Image Processing, 2012.

Blaivas M.G., DmitrievA.V., Dmitriev I.N., Yarcev I.M.

USE OF HIGH-PERFORMANCE CAMERAS IN OPTICAL SYSTEMS

Nizhniy Novgorod, Federal Research and Production Centre “Nizhniy Novgorod Research Institute of Radio Engineering”, Joint Stock Company (FRPC, “NNIIRT”, JSC)

The purpose of this paper is to develop a controllable high-performance system for displaying objects in the stereo mode in real-time. The task is to develop a device and software for obtaining a combined stereo pair from two cameras in real-time and display it on the stereo output devices with a delay less than 20 ms.

Designed system was tuned up at a short range as a stereomicroscope. The trials were conducted by an ophthalmologist, who performed operations on an experimental model of an eye, and a mechanic, who performed operations of soldering small-sized parts. The given design allows for obtaining 4x – 16x optical magnification, digital magnification - up to 32x at a frame delay of 16-17 ms and output rate of 60 frames per second. The system is further planned to be applied for monitoring small-sized air targets at a range of up to 2 km by dint of software upgrading, replacing the object lenses and increasing the stereo base.

Key words: stereomode, short range, small size air objects.

УДК 621.37

А.Д. Дорогов, Д.В. Калинин, С.Е. Минеев, А.В. Назаров,Д.К. Рыбаков

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ БЛОКА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ДАТЧИКА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

В докладе приводятся алгоритмы измерения расстояния до цели радиолокационными датчиками подвижных объектов. Описываются алгоритмы, осуществляющие помехозащищенную обработку сигнала биений. Приводится решение задачи построения блока цифровой обработки радиолокационного датчика на современной элементной базе, позволяющее снизить энергопотребление и стоимость, достичь минимальных массогабаритных характеристик радиолокационного датчика.

Ключевые слова: радиолокационный датчик, биения, ПЛИС, микроконтроллер.

В современном мире радиолокационные системы находят все более широкое применение при построениисистем предупреждения столкновений, охранных систем и т.д.

Основным элементом радиолокационной системы является радиолокационный датчик, параметры и характеристики которогов значительной степени определяют эффективность всей системы или комплекса в целом (дальность действия, разрешающую способность, массогабаритные характеристики).

Одним из основных узлов радиолокационного датчика является блок цифровой обработки. Параметры этого блока определяют быстродействие датчика.

Главной задачей блока цифровой обработки радиолокационного датчика с ЛЧМ-сигналами является анализ сигнала биений и обнаружение объекта, от которого происходит отражение радиосигнала, в заданном диапазоне дальностей, с заданной вероятностью ложного срабатывания, в том числе в условиях действия помех. При этом он должен иметь низкое энергопотребление, стоимость и минимальные массогабаритные характеристики.

Входным информационным сигналом блока цифровой обработки является сигнал биений, частота которого пропорциональна расстоянию до объекта[1],[2]. Выходным информационным сигналом является сигнал об обнаружении объекта, а также модулирующий сигнал, необходимый для формирования ЛЧМ-сигнала.

За признак наличия полезного сигнала принимается возрастание плотности распределения периодов отраженного сигнала $U_{комп}$ по отношению к исходному значению при отсутствии сигнала.

Возможны различные реализации блока цифровой обработки сигналов радиолокационного датчика подвижных объектов.Наиболее оптимальными являются реализации с использованием ПЛИС и реализация на базе 32-разрядного микроконтроллера. Рассмотрим оба эти варианта.

Функциональные схемы блока обработки с использованием ПЛИС и микроконтроллера одинаковы(рисунок 1). Сигнал биений проходит через фильтр и оцифровывается компаратором, после чего сигнал поступает на ПЛИС или микроконтроллер, где, в соответствии с заданным алгоритмом, принимается решение о наличии или отсутствии объекта. Для формирования модулирующего напряжения используется DDSгенератор, управляющие сигналы для которого поступают черезSPI интерфейс.

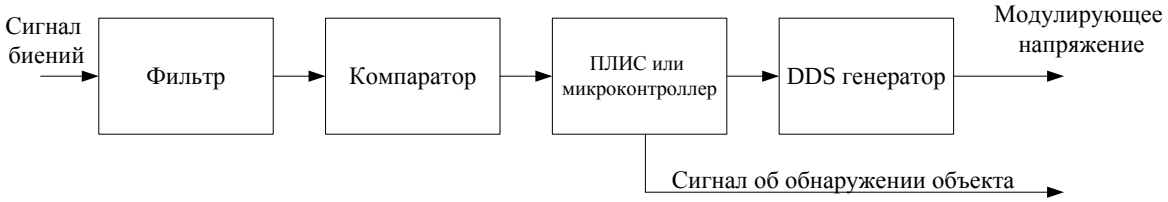


Рисунок 1 – Функциональная схема блока цифровой обработки сигналов радиолокационного датчика подвижных объектов

Алгоритм цифровой обработки информации радиолокационного датчика подвижных объектов может быть реализован с использованием ПЛИС фирмы Altera. ПЛИС фирмы Altera семейства MAX10 изготовлены по Flash-технологии.

Основным преимуществом данной технологии является низкое энергопотребление.ПЛИС, выполненные по SRAM технологии,генерируют значительный импульс тока при включении питания, также им необходимо время для загрузки конфигурации из внешней ПЗУ. ПЛИС, выполненные по Flash-технологии, лишены этих недостатков и готовы к работе сразу после включения питания.

Микросхемы фирмы Alteraсемейства MAX10 обладают большой надежностью и энергонезависимой конфигурацией, исполняются в небольших корпусах. Для реализации алгоритма оптимально подходит микросхема 10M08DC.

Рассмотрим функциональную схему блока обработки, реализованного на ПЛИС (рисунок 2). На рисунке 2:ТГ – тактовый генератор, ФСС – формирователь сигналов синхронизации, РСЧ – реверсивный счетчик, ФВК – формирователь выходной команды.

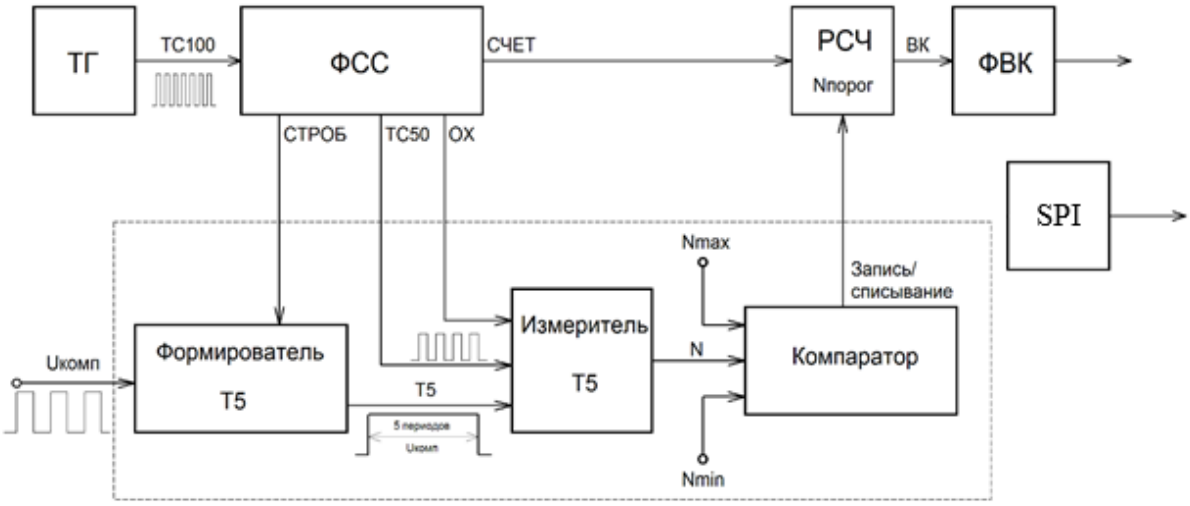


Рисунок 2 – Функциональная схема блока обработки, реализованного на ПЛИС

Эпюры сигналов, поясняющие работу схемы, приведены на рисунке 3.

Тактовый сигнал поступает на формирователь сигналов синхронизации, где используется для формирования необходимых для работы частотного обнаружителя синхросигналов – ТС50, СТРОБ, ОХ и СЧЕТ. Сигнал ОХ подается на формирователь модулирующего напряжения для формирования пилообразного модулирующего напряжения. Часть схемы частотного обнаружителя, выделенная на рисунке 2 пунктиром, предназначена для формирования сигналов записи/списывания, управляющих работой реверсивного счетчика.

В каждом цикле модуляции с формирователя сигналов синхронизации на формирователь Т5 поступает синхросигнал СТРОБ, разрешающий счет сигналов $U_{комп}$. Формирователь Т5 фиксирует поступление первого (после прихода синхросигнала СТРОБ) фронта сигнала $U_{комп}$ и производит счет 6 фронтов сигнала $U_{комп}$. На выходе формирователя Т5 формируется импульс Т5, длительность которого соответствует сумме 5 следующих подряд периодов $U_{комп}$.

Сигнал Т5 подается на измеритель Т5, разрешая счет тактовых сигналов ТС50 частотой 50 МГц. Таким образом, происходит измерение длительности сигнала Т5. Результат измерения выражается числом N. Результат измерений N подается на вход компаратора. Также на входы компаратора подаются числа N_{min} и N_{max}, которые соответствуют граничным частотам сигнала $U_{комп}$. Компаратор формирует сигналы, управляющие работой реверсивного счетчика. Если частота сигнала $U_{комп}$ находится в заданном диапазоне, формируется сигнал записи, в противном случае формируется сигнал списывания.

Изменение состояния счетчика производится по фронту сигнала СЧЕТ. При наличии сигнала записи состояние реверсивного счетчика увеличивается на единицу, при наличии сигнала списывания – уменьшается на единицу или не изменяется, если было достигнуто нулевое состояние.

При отсутствии полезного отраженного сигнала на выходе компаратора чаще формируется сигнал списывания и счетчик находится в нулевом состоянии. При наличии сигнала, соответствующего объекту, находящемуся в заданном диапазоне дальностей, на выходе компаратора чаще формируется сигнал записи, состояние счетчика увеличивается и при достижении им состояния $N_{ПОР\ РСЧ}$ на выход выдается логическая единица.

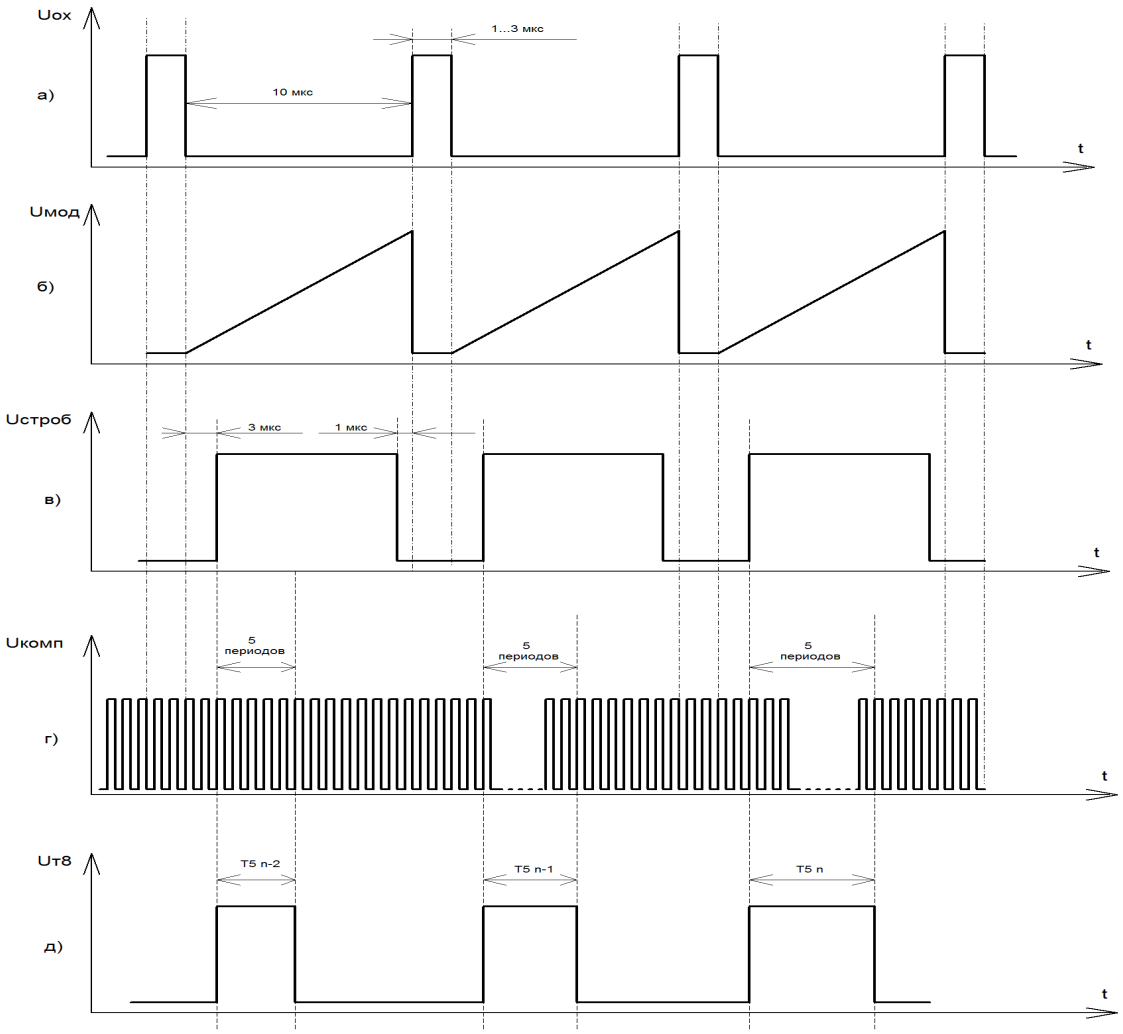


Рисунок 3 – Эпюры сигналов блока обработки

Рассмотрим вариант реализации блока обработки на базе микроконтроллера. Для реализации алгоритма был использован 32-разрядный микроконтроллер фирмы МилландрK1986BE92QI. Микроконтроллеры серии К1986ВЕ9х построены на базе высокопроизводительного процессорного RISC ядра ARM Cortex-M3, работают на тактовой частоте до 80 МГц.Периферия микроконтроллера включает в себя три 16-разрядных таймера с 4 каналами захвата. Кроме того, в состав микроконтроллера входит SSPконтроллер, необходимый для управления DDSгенератором.

Алгоритм работы блока обработки,реализованного на микроконтроллере, представлен на рисунке 4 в виде блок-схемы.

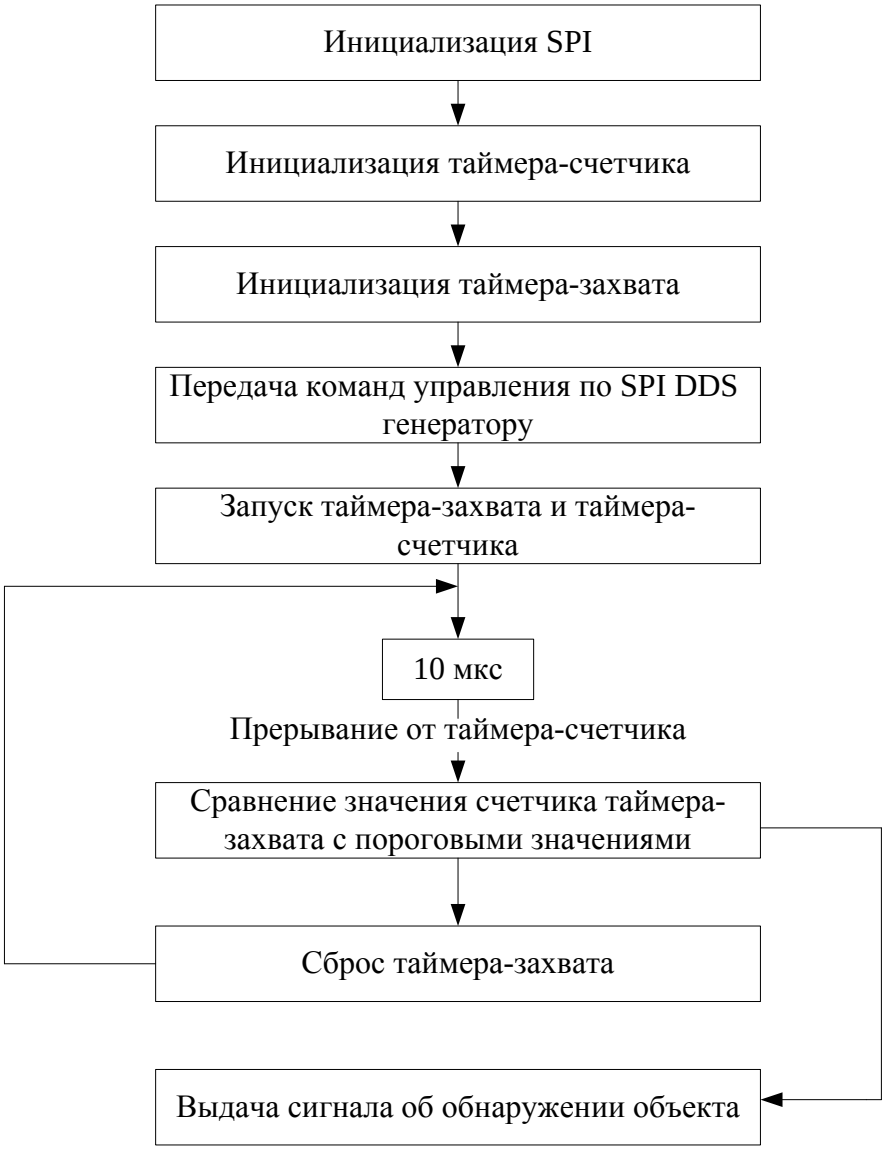


Рисунок 4 – Алгоритм работы блока обработки, реализованного на микроконтроллере

После инициализации необходимых периферийных устройств выполняется передача управляющих команд для DDS генератора, определяющих параметры модулирующего напряжения. Далее выполняется запуск таймеров. Таймер-счетчик инициализирован таким образом, чтобы вызывать прерывания через каждые 10 мкс, в течение этого времени таймер-захвата фиксирует все фронты сигнала биений и записывает количество этих фронтов. По истечении 10 мкс значение счетчика таймера-захвата сравнивается с пороговыми значениями,

которые определяются плотностью распределения периодов сигнала $U_{комп}$ по отношению к исходному значению при отсутствии сигнала. При накоплении определенного количества периодов, при котором значение счетчика таймера-захвата попадает в диапазон,ограниченный пороговыми значениями, выдается сигнал об обнаружении объекта.

Таким образом, в докладе рассмотрены две наиболее оптимальные реализации блока цифровой обработки сигналов для радиолокационных датчиков подвижных объектов.Обе реализации позволяют обеспечить обнаружение движущихся объектов с высокой точностью. Их преимуществами являются простота, возможность легкой перестройки диапазона обнаружения, низкая стоимость и минимальные массогабаритные характеристики.

Библиографический список

1. Климашев Б.М., Петров И.П. Устройства ближней радиолокации с непрерывными сигналами. Методическое пособие. – Куйбышев, 1974.
2. Борзов А.Б., Быстров Р.П. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех. – М.: Радиотехника, 2010.

A.D. Dorogov, D.V. Kalinin,S.E. Mineev, A.V. Nazarov, D.K. Rybakov

OPTIONS OF REALIZATION OF THE BLOCK OF DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS OF THE RADAR SENSOR OF MOBILE OBJECTS

Algorithms of measurement of distance to the purpose by radar sensors of mobile objects are given in the report. The algorithm which is carrying out noise immunity processing of a signal of beats is described. The solution of a problem of creation of the block of digital processing of the radar sensor on modern element base allowing to reduce energy consumption and cost, to reach the minimum mass-dimensional characteristics of the radar sensor is provided.

Keywords: radar sensor, beats, FPGA, microcontroller.

УДК 621.396.6

А.П. Евсеев[2)], П.Н. Вьюгин[2)], С.В. Касаткин[1)], А.В. Пучков[1)]

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ «СВЕРХРАЗРЕШАЮЩЕЙ» ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ

АО «ФНПЦ «ННИИРТ» [1)], ННГУ им. Н.И. Лобачевского [2)]

Аннотация: в предлагаемой вниманию исследовательской работе обсуждается и иллюстрируется возможность получения углового разрешения приемной цифровой антенной решетки сверх классического предела, определяемого по Релею через отношение длины волны к размеру апертуры антенны. В качестве физической основы выхода за классический предел используется алгоритм полигармонической экстраполяции (АПГЭ) позволяющий рассчитать дополнительные («виртуальные») мгновенные отсчеты волнового поля за пределами реальной апертуры приемной антенной решетки опираясь на совокупность мгновенных отсчетов с образующих ее элементов. АПГЭ имеет в своей основе Фурье-преобразование. Включение полученных «виртуальных» отсчетов в алгоритм диаграммообразования как раз и позволяет достигать эффекта «сверхразрешения» за счет увеличения действующего раскрыва антенны. В качестве метода исследования используется компьютерное моделирование в среде графического программирования «LabVIEW» от фирмы National Instruments.

Ключевые слова: приемные цифровые антенные решетки, «сверхразрешение», Фурье-преобразование, алгоритм полигармонической экстраполяции, компьютерное моделирование в среде «LabVIEW».

Все нижеприведенные выкладки применимы к приемным цифровым антенным решеткам, которые работают по принципу радиолокации на просвет от вышек сотовой связи, телерадиовещания и так далее и имеют место быть при рассмотрении нестационарных процессов. На данный момент развития техники приемные антенны имеют определенные преимущества перед активными решетками. Для удобства выкладок и рассуждений примем наиболее удобную для себя терминологию (приемный модуль = элемент антенной решетки = сенсор).

Классический способ получения приемлемого углового разрешения антенных систем имеет принципиальный предел задаваемый размером апертуры [1]. Поэтому разработан ряд подходов основанных на нелинейном спектральном анализе позволяющих на практике преодолевать эту проблему с большим или меньшим успехом [2]. Это, например, алгоритмы Берга, Кейпона, MUSIC и другие. Они основаны на вычислении и обращении зачастую плохо обусловленных корреляционных матриц, что приводит к неустойчивости вычислительной процедуры. При этом в ряде случаев, их использование требует априорного знания количества пеленгуемых источников и нередко приводит к смещенным оценкам угловых координат.

Поэтому представляется интересным подход, основанный на искусственном расширении апертуры за счет добавления «виртуальных» отсчетов, вычисленных путем экстраполяции мгновенной картины электромагнитного поля измеренного на реальных элементах антенны за пределы физической апертуры и последующего их включения в классический алгоритм диаграммообразования. Такой подход был предложен и успешно апробирован как за рубежом, так и в России [3, 4, 5]. Однако, как легко понять, важнейшим фактором эффективности при этом становятся характеристики алгоритма экстраполяции. Прежде всего, это *точность*, при достаточно большом интервале экстраполяции относительно размера массива физических отсчетов, а далее идут характеристики *устойчивости* и *быстродействия алгоритма*. Сразу следует подчеркнуть, что предлагаемый метод возможен только для цифровых приемных антенных решеток. Кроме того, необходимо отметить, что в последующих рассуждениях используется модель *линейной эквидистантной антенной решетки с принимаемыми плоскими волнами*. Для принятия решения об использовании какого-либо конкретного алгоритма

экстраполяции (или хотя бы его класса) необходимо проанализировать свойства наборов данных, на которых его предполагается использовать. С целью упрощения физической картины представим, что на одномерную, эквидистантную антенную решетку падает излучение от совокупности удаленных точечных источников, некогерентных и относительно узкополосных. В этом случае картина отсчетов электромагнитного поля на элементах решетки представляет собой суперпозицию квазисинусоидальных пространственных волн различной амплитуды, пробегающих вдоль линии расположения элементов решетки с различной скоростью и направлением движения. Термин «квазисинусоидальность» использован для оправдания возможного присутствия узкополосной модуляции в падающих волнах. Скорость, пространственная частота и направление движения (влево или вправо) определяются расположением источников излучения относительно перпендикуляра к апертуре антенны, что в нашем случае совпадает с осью главного лепестка диаграммы направленности (рис. 1).

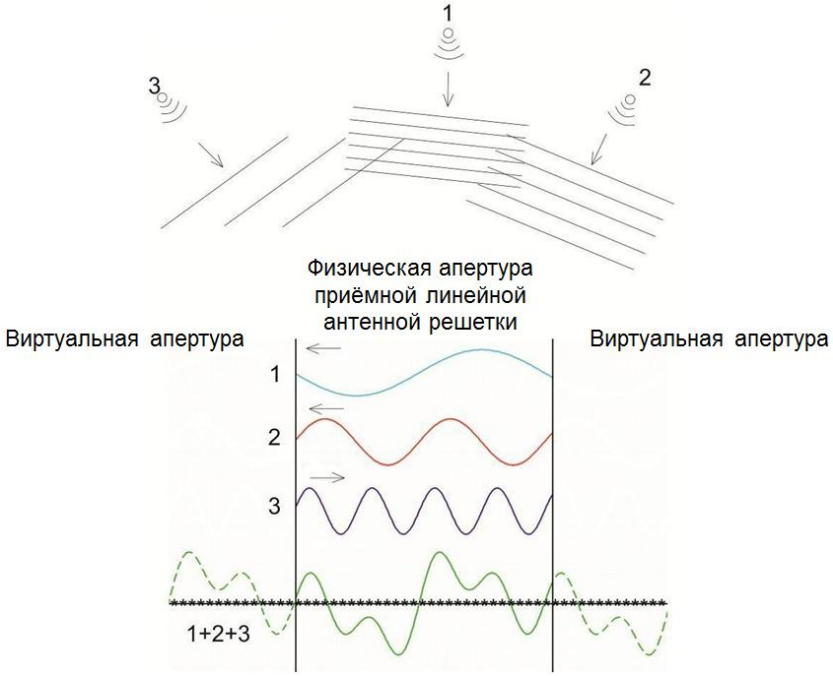


Рис. 1. Экстраполяция мгновенной картины электромагнитного поля

Основное достоинство предлагаемого алгоритма полигармонической экстраполяции (АПГЭ) состоит в увеличении разрешающей способности антенных решеток при меньших вычислительных затратах (количество операций) по сравнению с подходами, основанными на нелинейном спектральном анализе, так как в конечном итоге получение «сверхразрешения» осуществляется за счет алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) для «увеличенной» апертуры антенны, реализующегося на сигнальных процессорах специализированной цифровой вычислительной машины (СЦВМ) нового поколения. А так же АПГЭ, по сравнению с другими методами нелинейного предсказания, имеет возможность работать при меньших отношениях сигнал/шум.

Задача эффективной экстраполяции такого вида сигналов, в общем случае, не тривиальна и далеко не все, известные в настоящее время алгоритмы, могут быть использованы, особенно с учетом высоких требований по точности, быстродействию и устойчивости. К примеру, в работе профессора Б.А. Лаговского зафиксирован выигрыш (сужение главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА)) в 5-7 раз при отношении сигнал/шум не менее 14 дБ [5]. Попытки применения АПГЭ в его одномерном и двумерном вариантах позволили получить выигрыш в разрешении на 30 и 80 процентов, соответственно, при отношении сигнал/шум порядка 8 дБ [3, 4, 6]. Такой результат для практики едва ли можно считать приемлемым, особенно с учетом необходимого аппаратурного усложнения. Однако, дальнейшее развитие

подхода к вычислению «виртуальных» отсчетов через спектральные характеристики двумерного массива реальных отсчетов электромагнитного поля позволило получить существенно лучшие количественные показатели, что и проиллюстрировано на нижеприведенных рисунках с помощью имитационного моделирования в среде программирования «LabVIEW» [7] (рис. 2, 3).

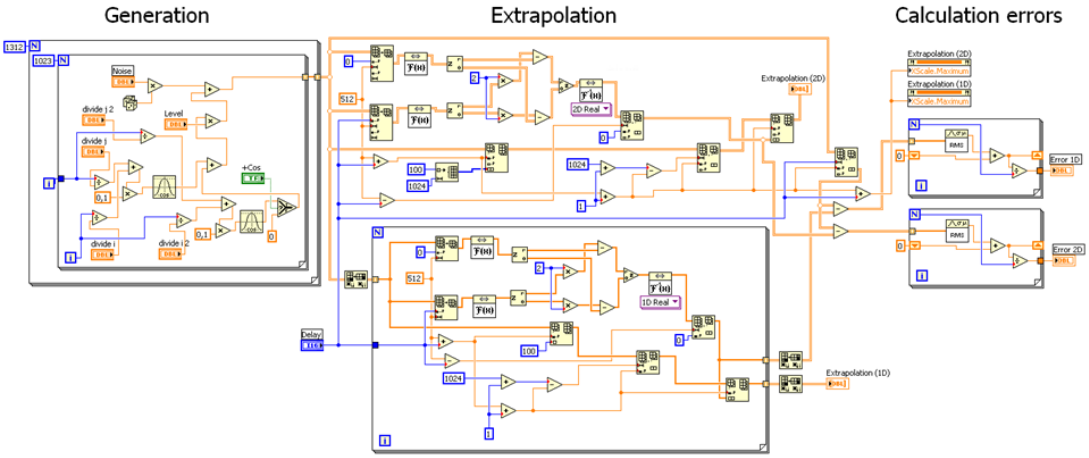


Рис. 2. Блок-диаграмма виртуального прибора (в общем виде) в «LabVIEW»

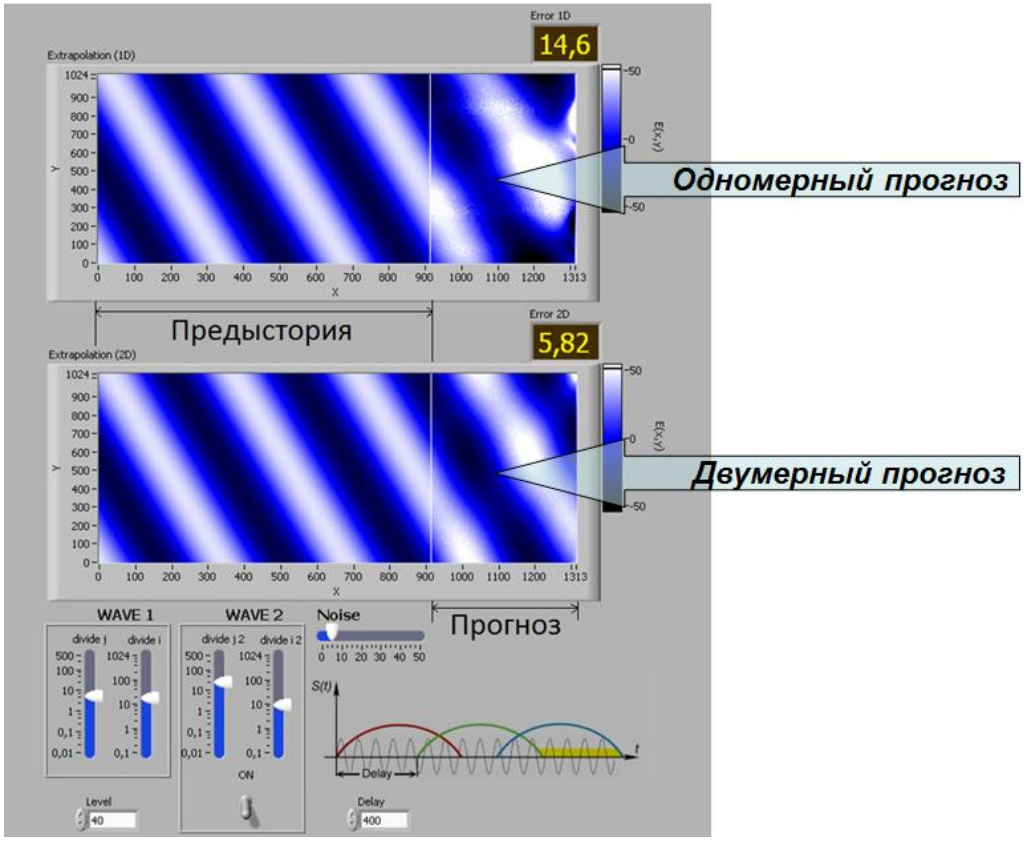


Рис. 3. Передняя панель виртуального прибора в «LabVIEW»

На рис. 4 в яркостной индикации изображен идеализированный участок волнового поля полученный моделированием экстраполяции мгновенной картины принятого электромагнитного поля с набора отсчетов двух реальных сенсоров (10-го и 11-го) с помощью алгоритма БПФ для «увеличенной» апертуры антенны.

2)

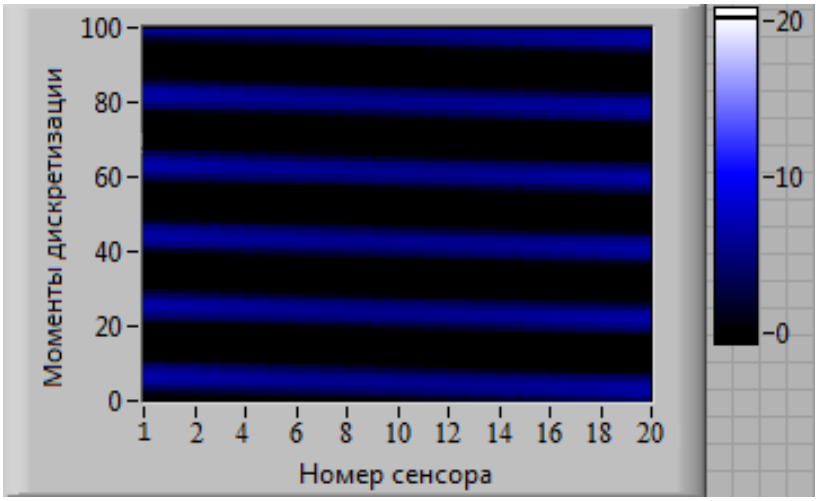


Рис. 4. Участок волнового поля, полученный вычислением из набора отсчетов полученных с 10-го и 11-го сенсоров

То есть данное волновое поле получено путем экстраполяции мгновенной картины электромагнитного поля измеренного на реальных элементах антенны за пределы физической апертуры и последующего их включения в классический алгоритм диаграммообразования. Это чисто идеализированная картина для лучшего представления происходящих процессов.

Последующие рис. 6, 7, 8, 9 показывают ДНА по мощности отнормированные к единице, вычисленные через Фурье-преобразование наборов отсчетов соответствующего размера (2; 20; 50; 100) выполненные через запрограммированный в «LabVIEW» алгоритм полигармонической экстраполяции (рис. 5).

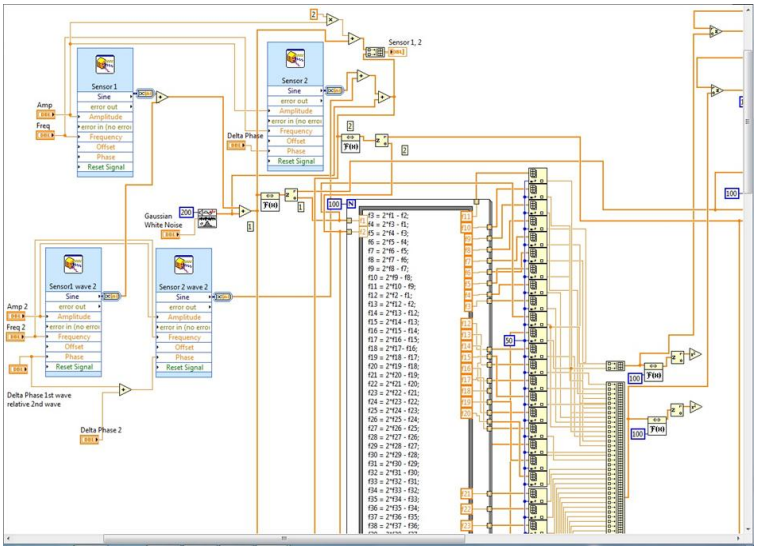


Рис. 5. Часть блок-диаграммы виртуального прибора

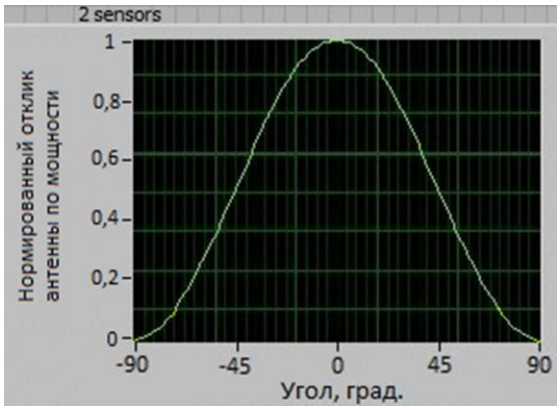


Рис. 6. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решетки

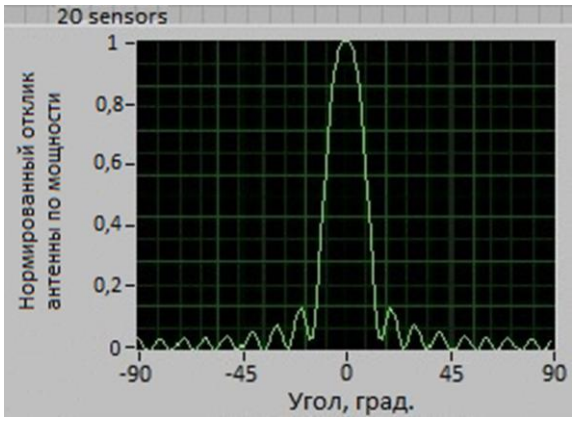


Рис. 7. Диаграмма направленности 20-ти элементной антенной решетки

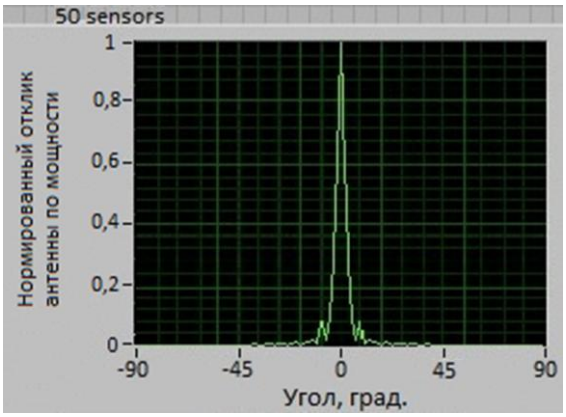


Рис. 8. Диаграмма направленности 50-ти элементной антенной решетки

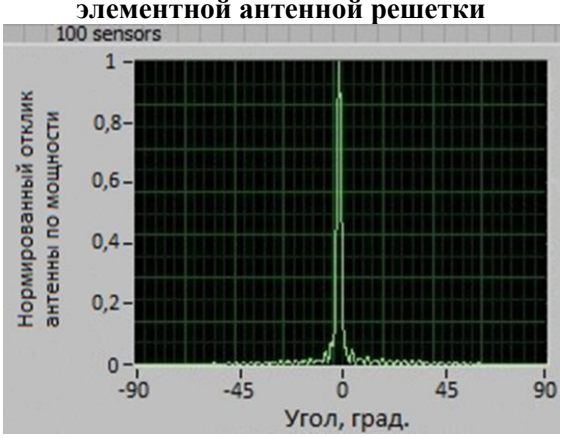


Рис. 9. Диаграмма направленности 100 элементной антенной решетки

При моделировании алгоритма полигармонической экстраполяции для 2-х, 20, 50 и 100 элементной антенной решетки получаем закономерные амплитудные индикации нормированных откликов, которые изображены на рис. 6, 7, 8 и 9, соответственно.

Анализируя данные графики делаем вывод о том, что применение алгоритма полигармонической экстраполяции позволило получить существенный выигрыш в разрешении благодаря искусственному расширению апертуры антенны за счет добавления «виртуальных» отсчетов.

Таким образом, выигрыш в направленности получается существенным, что зачастую вызывает недоверие и скепсис у специалистов. Однако физическим аналогом обсуждаемого подхода является, например работа антенн типа «волновой канал» или «Уда-Яги» либо «Бевериджа» (рис. 10).

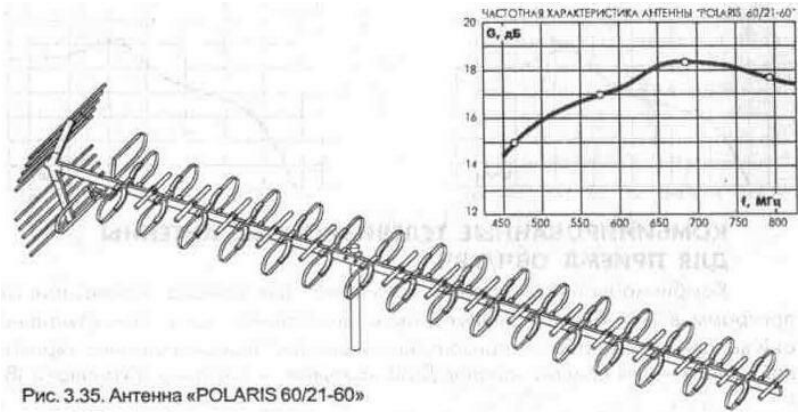


Рис. 10. Антенна типа «волновой канал»

Не имея достаточного поперечного размера (классической апертуры), они обеспечивают на практике усиление 15дБ и более. Ограничение накладывается размером в направлении главного лепестка диаграммы направленности. Этот размер, с нашей точки зрения, вполне уместно назвать «глубиной» антенны. Аналогом этого параметра для обсуждаемого подхода является количество ячеек в регистрах сдвига, связанных с соответствующими сенсорами через аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Приведенные данные являются результатом расчета ДНА при приеме модельных сигналов, в качестве которых использовалась плоская монохроматическая волна [1-4].

Так же проведем моделирование работы данного алгоритма полигармонической экстраполяции при наличии шумовой компоненты (белый гауссовский шум) и весового окна в реализации с одним источником сигнала и построим графики ДНА (рис. 11, 12, 13, 14) в логарифмическом масштабе для более точного отображения боковых лепестков.

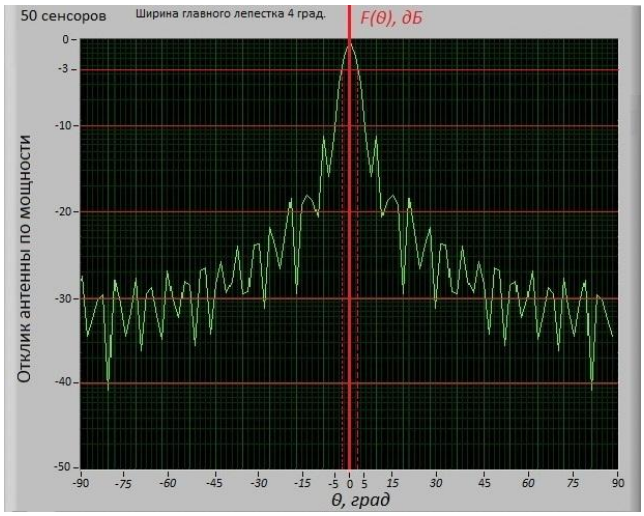


Рис. 11. Расширение апертуры антенны с 2 до 50 сенсоров

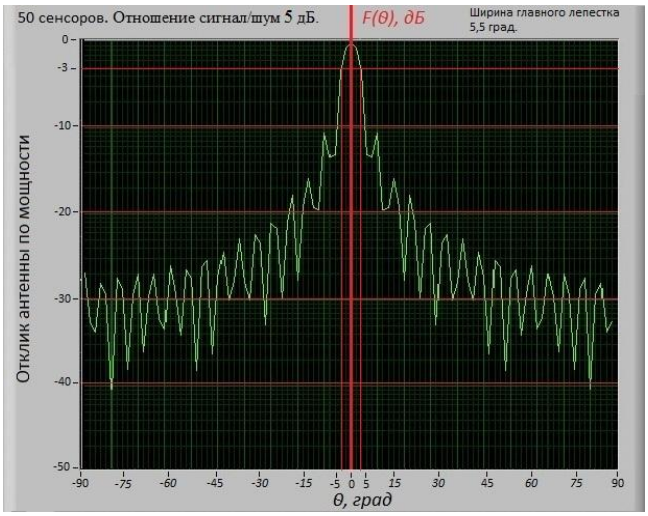


Рис. 12. Расширение апертуры с 2 до 50 сенсоров (реализация зашумлённого сигнала)

Из графиков на рис. 11, 12 можем сделать вывод, что в отличие от многих других методов прогнозирования, даже при малых отношениях сигнал/шум (5 дБ и менее) данный алгоритм работоспособен. Включение аподизирующего множителя в виде окна Хемминга приводит к снижению уровня боковых лепестков, но слегка расширяет главный лепесток, что соответствует классическим представлениям. (см. рис. 13 и 14, где получаемая ДНА отображена в логарифмическом масштабе).

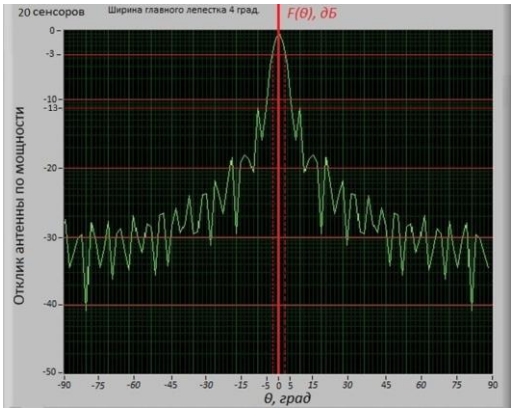


Рис. 13. Диаграмма направленности в логарифмическом масштабе для антенны из 20 сенсоров

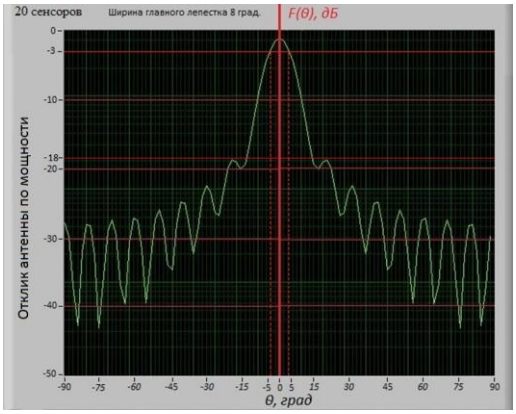


Рис. 14. Диаграмма направленности в логарифмическом масштабе для антенны из 20 сенсоров при добавлении окна Хемминга

Количественные характеристики выигрыша в угловом разрешении позволили сделать вывод о перспективности предлагаемого подхода наряду с традиционными методами. Однако, для убедительности и уверенности в полученных результатах был проведен *эксперимент с использованием реальных сигналов*. Это и было выполнено с использованием специального бассейна (т.е. в ограниченном объеме) на базе кафедры акустики радиофизического факультета ННГУ.

Использовалось следующее оборудование в диапазоне гидроакустических колебаний приблизительно 90 кГц. Пьезокерамический излучатель со сферической диаграммой направленности возбуждался от генератора Tektronix AFG 3102 через усилитель У7-5 в режиме амплитудноимпульсной модуляции. Длительность импульса модуляции и период повторения выбирались из условий надежной отстройки от сигналов реверберации для имеющейся геометрии рабочего объема бассейна и составили 5,0 и 20,0 миллисекунд, соответственно. В противном случае это могло бы затруднить интерпретацию полученных результатов. Прием 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 решетку. 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. 15 и 16 соответственно:

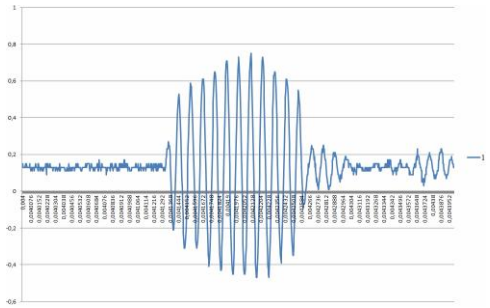


Рис. 15. Зарегистрированный сигнал с левого микрофона

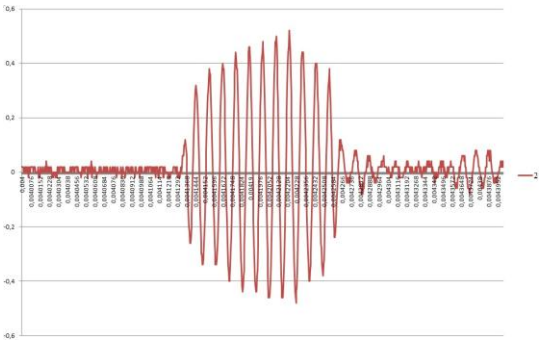


Рис. 16. Зарегистрированный сигнал с правого микрофона

Последующие рисунки (рис. 17, 18, 19, 20) показывают диаграммы направленности по мощности, вычисленные через Фурье-преобразование наборов отсчетов соответствующего размера (2; 20; 50 и 100 сенсоров) пришедшего на оба микрофона квазиплоского волнового фронта.

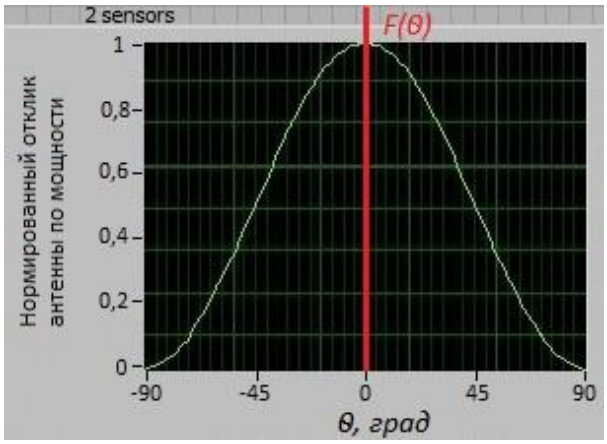


Рис. 17. Диаграмма направленности реальной 2-х элементной антенной решетки

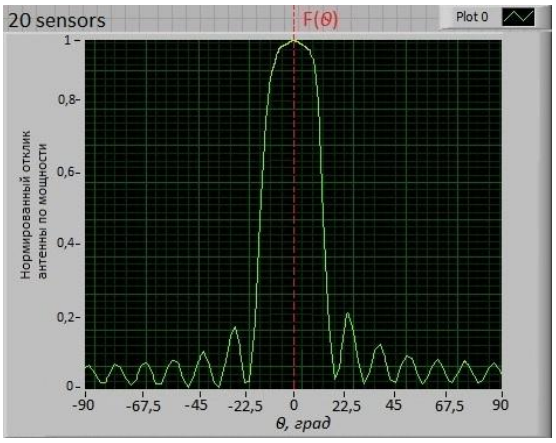


Рис. 18. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решетки, при добавлении 18-ти «виртуальных»

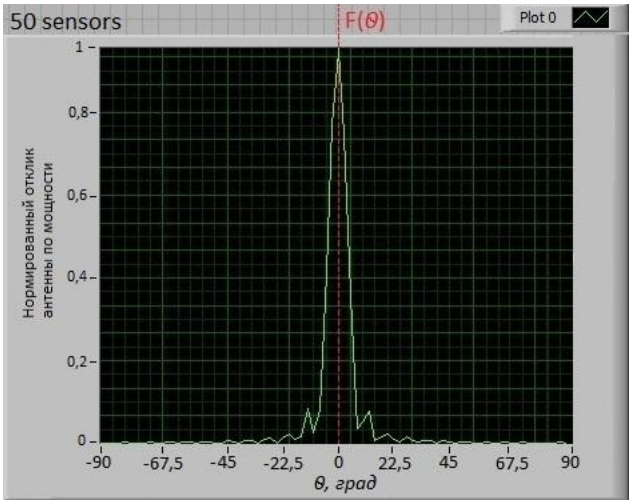


Рис. 19. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решетки, при добавлении 48-ми «виртуальных» отсчетов

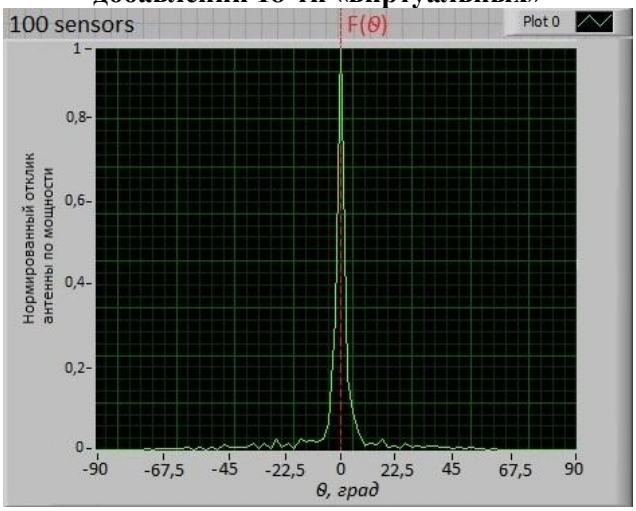


Рис. 20. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решетки, при добавлении 98-ми «виртуальных» отсчетов

Можем заметить, что при добавлении «виртуальных» отсчетов линейно сужается главный лепесток диаграммы направленности модельной антенной решетки. Позже эту закономерность и работу самого алгоритма проверим на конфигурации системы из двух излучателей.

Вторая часть эксперимента была проведена следующим образом.

Теперь вместо одного точечного излучателя с круговой диаграммой направленности в бассейн были помещены два плоских пьезокерамических излучателя, которые также возбуждались от генератора Tektronix AFG 3102 через усилитель У7-5 в режиме амплитудноимпульсной модуляции. Частота первого излучателя задавалась равной 90 кГц, а второго 100 кГц. Следовательно имеем некогерентную систему излучателей. Длина между излучателями равна 40 см. Излучатели были отъюстированы в направлении микрофонов на максимально принимаемый сигнал.

Ниже приведена полученные ДНА (рис. 21, 22, 23) при обработке полученных сигналов от двух излучателей с помощью АПГЭ.

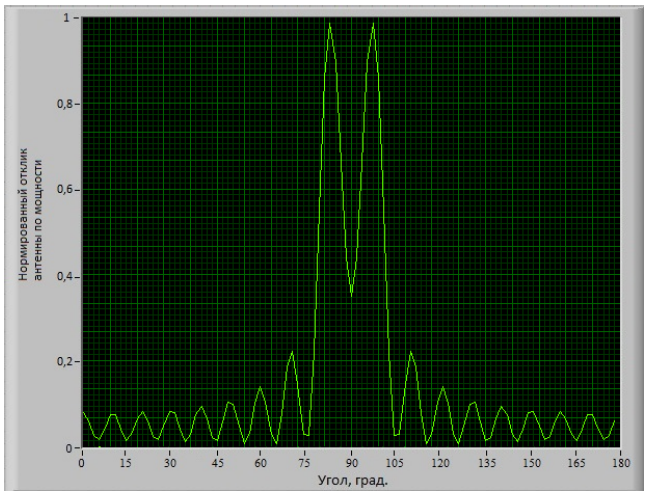


Рис. 21. Диаграмма направленности 2-х элементной антенной решетки, при добавлении 18-ти «виртуальных» отсчетов

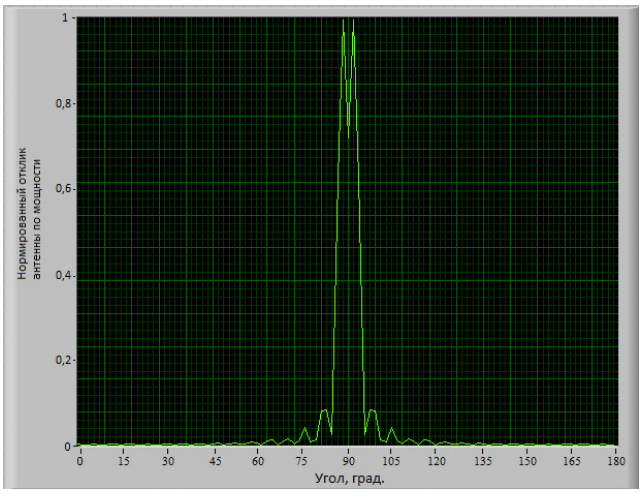


Рис. 22. Диаграмма направленности 50-ти элементной антенной решетки, при добавлении 48-ми «виртуальных» отсчетов

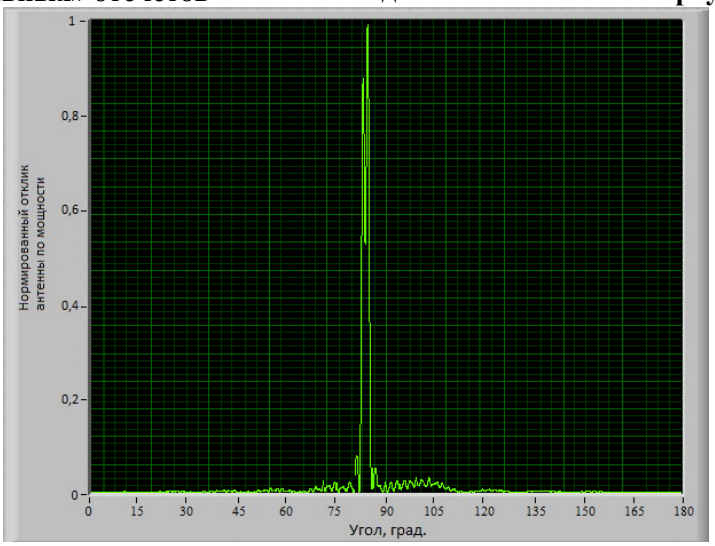


Рис. 22. Диаграмма направленности 100 элементной антенной решетки, при добавлении 98-ми «виртуальных» отсчетов

То есть можем видеть, что практические результаты полностью подтверждают ранее запрограммированные и смоделированные математические модели.

Выводы

1. Алгоритм работоспособен и потенциально ориентирован на работу в режиме реального времени в радиолокации и гидролокации. Некоторые области применения: реставрация сигналов и «сверхразрешение»;

2. Полученные результаты моделирования в «LabVIEW» основаны на физических представлениях и подтверждаются теорией и практикой диаграммообразования в протяженных антеннах;

3. Применяемый метод может использоваться для повышения как азимутального, так и угломестного сверхразрешения приемных цифровых антенных решеток;

4. Рассмотренный подход может быть полезен во многих областях науки и техники, начиная с радио-гидролокации и заканчивая сейсморазведкой и медико-биологической аппаратурой.

Библиографический список

1. Горелик Г.С. Колебания и волны / 2-е изд. – Ред.С.М. Рытов. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.;

2. Ратынский М.В. // Радиотехника. Анализ характеристик алгоритмов пеленгации со сверхразрешением. 1992. №10-11. С. 12;

3. Баданов И.В., Евсеев А.П. // В кн.: Труды 12-й научной Конференции по радиофизике. 7 мая 2008 г. / Ред. А.В. Якимов. – Н. Новгород: ТАЛАМ, С. 95;

4. Евсеев А.П., Евсеев Д.А., Баданов В.В. // В кн.: Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. Вып. 1(2). Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2004. С. 249-255;

5. Лаговский Б.А. // Антенны. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками. 2013. №.6 (193). С. 9;

6. Евсеев А.П., Баданов В.В., Орлов И.Я. // Труды 14-й международной научно-технической конференции, «Радиолокация, навигация и связь». 15-17 апреля 2008 г. // Алгоритм полигармонической экстраполяции и возможности его применения для решения некоторых задач радиолокации, навигации и связи / Ред. Б.Я. Осипов – Воронеж. – 25 с.;

7. Евсеев А.П., Козлов С.А., Пучков А.В. // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвящённой 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика (Н. Новгород, 12–20 мая 2016 г.) // Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решетки / Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова. Нижний Новгород: ННГУ, 2016 – 144 с.;

8. А.П. Евсеев, С.А. Козлов, А.В. Пучков, И.Я. Орлов // Труды XXIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - ИСТ-2017», посвящённой 100-летию НГТУ – Нижегородского политехнического института (Н. Новгород, 21 апреля 2017 г.) // Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решетки Нижний Новгород: НГТУ, 2017 – 287 с., С. 87-90;

9. Евсеев А.П., Пучков А.В. // Двадцать первая научная конференция по радиофизике (Н. Новгород, 15–22 мая 2017 г.) // Снижение уровня боковых лепестков в диаграмме направленности цифровой антенной решетки с апертурой синтезированной на основе алгоритма полигармонической экстраполяции / Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова. Нижний Новгород: ННГУ, 2017.

A.P. Evseev[2],P.N. Vyugin[2], S.V. Kasatkin[1], A.V. Puchkov[1]

SOME QUESTIONS ABOUT CREATING A"SUPERRESOLUTION" DIGITAL ANTENNA RESET USING POLYGON EXTRAPOLATION ALGORITHM

[1] FRPC “NNIIRT”, JSC, Nizhniy Novgorod;
[2] Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod

Abstract. In the attention of researchers is discussed and illustrated the possibility of obtaining the angular resolution of the receiving digital array antenna above the classical limit determined by the ratio of Rayleigh wave length to the size of the aperture antenna. As a physical basis to go beyond the classical limit of the algorithm is used polyharmonic extrapolation (APGE) calculates the additional (“virtual”) instant readout of the wave field outside a real aperture antenna array based on the set of instant readings with its constituent elements. APGE is based on Fourier transform. The inclusion of samples obtained in the algorithm diagrammoobrazovaniya and achieves the effect of “superresolution” by increasing the effective aperture antenna. As a method of study used computer modelling in the environment «LabVIEW».

Keywords: receiving digital antenna arrays, “superresolution”, Fourier-transform, an algorithm of polyharmonic extrapolation, a computer simulation by «LabVIEW».

УДК 621.396

Р.А. Ершов, Е.Е. Микляева, О.А. Морозов, К.А. Новожилова

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТКАХ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В работе рассмотрены методы оптимальной обработки сигналов в адаптивных антенных решетках и методы моделирования диаграммы направленности адаптивного компенсатора помех с различным количеством элементов на основе формирования оптимального вектора весовых коэффициентов разложением по степенным векторам и псевдообращения корреляционной матрицы помехи. Предложен вычислительно эффективный метод обращения корреляционной матрицы помех на основе вычисления псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза и её формировании на основе сингулярного разложения исходной матрицы, который может быть реализован с использованием методов и технологий параллельных вычислений на графических процессорах.

Ключевые слова: диаграмма направленности, вектор весовых коэффициентов, псевдообратная матрица Мура-Пенроуза, сингулярное разложение матрицы, параллельные вычисления

Введение

В системах радиолокации, радиосвязи и телекоммуникаций, использующих в качестве приемников сигналов адаптивные антенные решетки, важнейшими характеристиками, предопределяющими качество приема и обнаружения сигналов, являются форма исходной диаграммы направленности и соотношение сигнал/(помеха + шум) [1]. Адаптивная обработка сигналов – это один из способов высокоэффективного решения задач приема и обнаружения сигналов на фоне шумов и помех. Данная обработка обладает возможностью подавления мешающих сигналов, в том числе при минимуме априорных сведений. Уровень подавления помех, необходимый объём аппаратуры обработки сигналов зависят от используемого метода адаптации и его конкретной реализации.

Суть любого критерия адаптации заключается в достижении экстремума соответствующей функции, описывающая изменение показателя качества в зависимости от значений весовых коэффициентов. Способ достижения этого экстремума называется методом адаптации.

Оптимальная обработка сигналов в адаптивном компенсаторе помех

Формирование оптимального весового вектора при помощи метода разложения по степенным векторам [2] требует представления весового вектора $\vec{W}$ в виде следующего разложения:

$$\vec{W} = c_0\vec{S} + c_1M\vec{S} + c_2M^2\vec{S} + ... + c_{K-1}M^{K-1}\vec{S}\,, \qquad (1)$$

где $\vec{S}$ – вектор полезного сигнала, M – корреляционная матрица шума. Выражение (1) показывает, что весовой вектор можно представить в виде линейной комбинации векторов $\vec{S}, M\vec{S}, M^2\vec{S}, ..., M^{K-1}\vec{S}$. Данная система векторов в математике называется системой степенных векторов или базисом Крылова [2]. Вектор $M\vec{S}$ имеет физический смысл корреляционного вектора.

Детализированная схема формирования вектора $M\vec{S}$ на основе вычисления корреляционных моментов представлена на рис. 1.

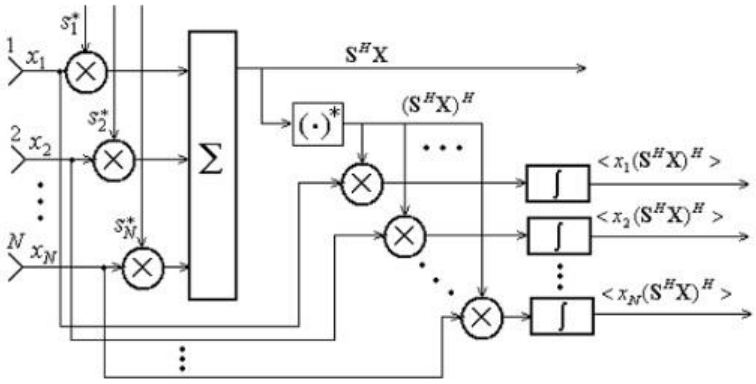


Рис. 1. Схема формирования вектора $M\vec{S}$

Степенные векторы $\vec{S}, M\vec{S}, M^2\vec{S}, ..., M^{K-1}\vec{S}$ образуют неортогональный базис, что является неудобным для вычислений. Поэтому, перейдем к эквивалентному ортонормированному базису, состоящему из векторов $\vec{F}_0, \vec{F}_1, \vec{F}_2, ..., \vec{F}_{K-1}$. Ортогонализация и нормировка степенных базисных векторов выполняется по следующей схеме [2]:

$$\begin{cases} \vec{F}_0 = \left(\vec{f}_0, \vec{f}_0\right)^{-0.5} \vec{f}_0; \;\; \vec{f}_0 = \vec{S} \\ \vec{F}_1 = \left(\vec{f}_1, \vec{f}_1\right)^{-0.5} \vec{f}_1; \;\; \vec{f}_1 = M\vec{F}_0 - \alpha_0 \vec{F}_0 \\ \vec{F}_2 = \left(\vec{f}_2, \vec{f}_2\right)^{-0.5} \vec{f}_2; \;\; \vec{f}_2 = M\vec{F}_1 - \alpha_1 \vec{F}_1 - \beta_0 \vec{F}_0 \\ \ldots \\ \vec{F}_{K-1} = \left(\vec{f}_{K-1}, \vec{f}_{K-1}\right)^{-0.5} \vec{f}_{K-1}; \;\; \vec{f}_{K-1} = M\vec{F}_{K-2} - \alpha_{K-2}\vec{F}_{K-2} - \beta_{K-3}\vec{F}_{K-3} \end{cases} \quad (2)$$

Оптимальный весовой вектор представим в виде разложения:

$$\vec{W} = c_0\vec{F} + c_1\vec{F}_1 + ... + c_{K-1}\vec{F}_{K-1}, \quad (3)$$

где $c_0, c_1, ..., c_{K-1}$ – коэффициенты разложения, которые необходимо определить.

Коэффициенты α_i, β_i в (2) находятся по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_{i-1} &= \vec{F}_{i-1}^H M\vec{F}_{i-1}, i = 1,2,...,K-1 \\ \beta_{i-1} &= \vec{F}_{i-2}^H M\vec{F}_{i-1}, \; i = 2,3,...,K-1 \end{aligned}. \quad (4)$$

Неизвестные коэффициенты c_i определяются с помощью следующей рекуррентной формулы [2]:

$$c_1 = -\frac{\beta_0}{\alpha_1 - \dfrac{\beta_1^2}{\alpha_2 - \dfrac{\beta_2^2}{\dfrac{\ldots}{\alpha_{K-1} - \dfrac{\beta_{K-1}^2}{\alpha_K}}}}}; \; c_2 = -\frac{\alpha_1 c_1 + \beta_0}{\beta_1} \quad (5)$$

$$c_n = -\frac{\beta_{n-2}c_{n-2} + \alpha_{n-1}c_{n-1}}{\beta_{n-1}}, n = 3,4,...,K.$$

На основе изложенного метода оптимальной обработки сигналов проведено моделирование алгоритма формирования весового вектора и диаграммы направленности многоканального адаптивного компенсатора помехи [3]. Результат численного эксперимента представлен на рис. 2.

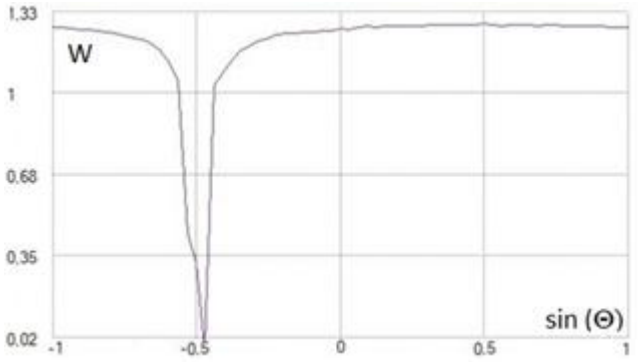


Рис. 2. Результаты численного эксперимента при следующих параметрах: угол прихода помехи Θ= - π/6, решетка из 64-источников, отношение сигнал/шум +3 дБ

В работе проведено сравнение методов оценки весового вектора на основе разложения по степенным векторам с методом, основанным на непосредственном обращении корреляционной матрицы:

$$\hat{\vec{W}} = M^{\#}\vec{S}\,. \tag{6}$$

Псевдообратная матрица Мура-Пенроуза $M^{\#}$ определена для любой комплекснозначной матрицы и может быть вычислена с помощью разложения по сингулярным числам (SVD) [4]:

$$M = U\Sigma V^{T}, \tag{7}$$

где U – унитарная матрица, столбцы которой представляют собой собственные векторы матрицы MM^{H}, V – унитарная матрица, столбцы которой представляют собой собственные векторы матрицы $M^{H}M$, Σ – диагональная матрица, элементы которой $\sigma_{ij} = 0$ при $i \neq j$ и $\sigma_{ii} = \sigma_i \geq 0$ – собственные числа матрицы M.

Псевдообратная матрица Мура-Пенроуза определяется на основе следующего соотношения [4]

$$M^{\#} = V\Sigma^{\#}U^{T}, \tag{8}$$

где $\Sigma^{\#}$ – диагональная матрица:

$$\Sigma^{\#} = \begin{pmatrix} \sigma_1^{\#} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \sigma_d^{\#} \\ & 0 & \end{pmatrix}, \tag{9}$$

на диагонали которой стоят числа, вычисляемые как:

$$\sigma^{\#} = \begin{cases} 1/\sigma, \sigma \neq 0 \\ 0, \sigma = 0 \end{cases}. \tag{10}$$

Произведено сравнение методов формирования адаптивного компенсатора помех по быстродействию алгоритма. В качестве первого метода использовался алгоритм формирования весового вектора компенсатора помех, полученного с помощью псевдообращения корреляционной матрицы помех [5] (зависимость М1 на рисунках 3, 4). В качестве второго метода использовался регуляризованный алгоритм получения весового вектора компенсатора помех на основе разложения весового вектора по степенным векторам [2] (зависимость М2 на рисунках 3, 4). Исследование проводилось для решётки из 256 источников при отношении сигнал/шум 0 дБ. Результаты представлены на рис. 3.

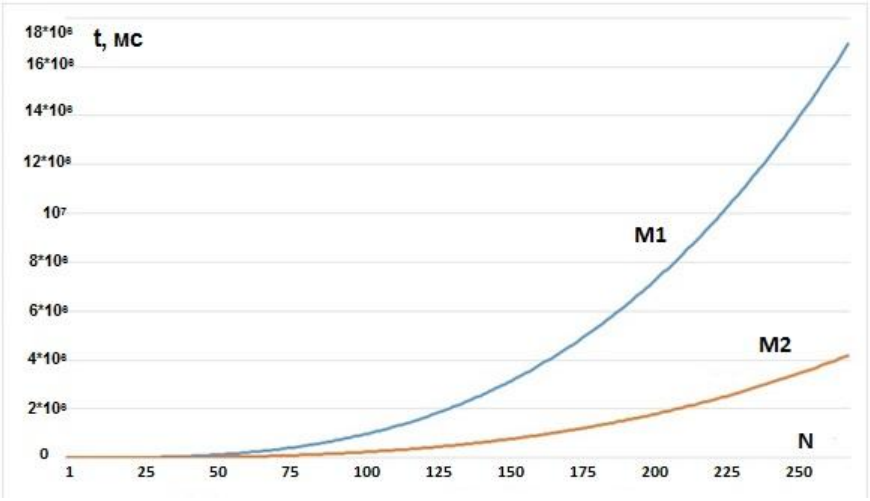


Рис. 3. Сравнение быстродействия алгоритмов оценки весового вектора

В работе проведено также сравнение зависимостей среднеквадратического отклонения (СКО) определения угла прихода волны от уровня шума для обоих методов при одинаковых параметрах. Результаты данного исследования представлены на рисунке 4. В результате проведенных исследований выяснилось, что по быстродействию значительно выигрывает алгоритм получения весового вектора компенсатора помех на основе разложения весового вектора по степенным векторам, в то время как при сравнении зависимостей СКО определения угла прихода волны от уровня шума, полученных с помощью обоих алгоритмов разница оказалась несущественной (в пределах погрешностей). Зависимости, в данном случае, лежат в одном конусе.

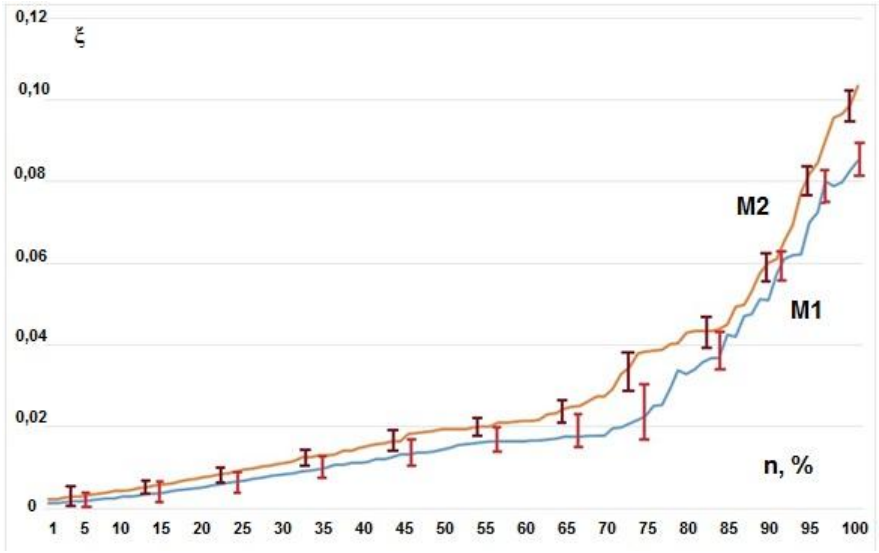


Рис. 4. Сравнение зависимостей СКО определения угла прихода волны от уровня шума

Поскольку алгоритм оценки весового вектора на основе псевдообращения корреляционной матрицы помехи является оптимальным, но неэффективным с вычислительной точки зрения, в работе реализован эффективный алгоритм псевдобращения корреляционной матрицы помехи, который может быть реализован с использованием технологий параллельных вычислений.

Для реализации эффективного алгоритма сингулярного разложения в работе использован алгоритм, который состоит из преобразований Хаусхолдера и вращений Гивенса [6]. Так как все операции данного алгоритма сводятся к матричному умножению, данный алгоритм может быть реализован с помощью применения технологии параллельных

вычислений с целью увеличения вычислительной эффективности. Преобразование Хаусхолдера заключается в формировании матриц преобразования $H_1^{(k)}, H_2^{(k)}$ таким образом, чтобы элементы матрицы, находящиеся ниже текущего элемента (для матрицы $H_1^{(k)}$) либо правее текущего элемента (для матрицы $H_2^{(k)}$), обратились бы в нуль. Применяя N шагов преобразования Хаусхолдера, получим бидиагональную матрицу $\tilde{\Sigma}$. Для дальнейшей диагонализации матрицы $\tilde{\Sigma}$ может быть применен итерационный алгоритм на основе вращений Гивенса, позволяющий обратить в нуль элементы на побочной диагонали. Поскольку приведенный выше алгоритм основывается на матричном умножении, он допускает реализацию на вычислительных системах с параллельной архитектурой, к примеру, на графических процессорах.

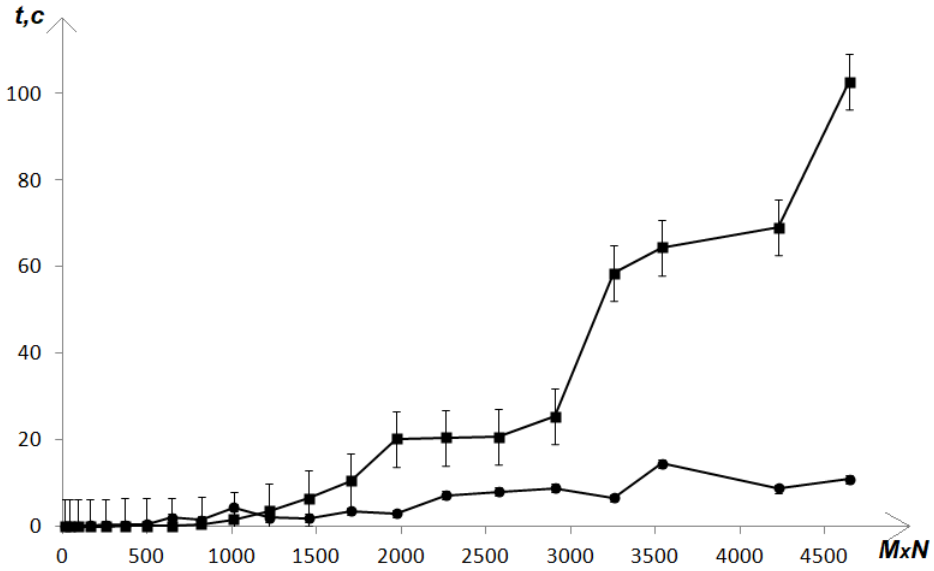


Рис. 5. Зависимость времени обращения корреляционной матрицы от её размерности

В работе проведено исследование зависимости времени работы последовательного и параллельного алгоритма обращения корреляционных матриц от их размерности. Расчеты проводились на системе с процессором Intel Core i5 3337U и видеокарты Nvidia GeForce GT 740m. Результаты исследования представлены на рисунке 5. Для матриц большой размерности время работы параллельного алгоритма меньше времени работы последовательного алгоритма более чем в 10 раз, что позволяет применять данный алгоритм в масштабе времени, близком к реальному.

Круглыми маркерами на графике обозначено время параллельного алгоритма, квадратными – последовательного. Из рисунка 5 можно сделать вывод, что параллельный алгоритм работает быстрее, чем последовательный алгоритм, начиная с размерности матриц 50×25. При этом предлагаемый алгоритм может быть использован для работы в реальном масштабе времени.

Выводы

Разработан алгоритм формирования оптимального вектора весовых коэффициентов адаптивного компенсатора помехи и методы моделирования диаграммы направленности адаптивного компенсатора помех с различным количеством элементов на основе формирования оптимального вектора весовых коэффициентов разложением по степенным векторам и псевдообращения корреляционной матрицы помехи. Продемонстрирована возможность формирования минимума диаграммы направленности на направление прихода помехи и оптимального определения угла прихода помехи. В результате исследования

алгоритмов выяснилось, что по быстродействию значительно выигрывает алгоритм получения весового вектора компенсатора помех на основе разложения весового вектора по степенным векторам, в то время как при сравнении зависимостей СКО определения угла прихода волны от уровня шума, полученных с помощью обоих алгоритмов разница оказалась несущественной (в пределах погрешностей). Вывод - метод формирования ДН адаптивного компенсатора помех, полученной при помощи регуляризованного алгоритма получения весового вектора компенсатора помех на основе разложения весового вектора по степенным векторам, является более эффективным.

Предложен вычислительно эффективный метод обращения корреляционной матрицы помех на основе вычисления псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза и её формировании на основе сингулярного разложения исходной матрицы, который может быть реализован с использованием методов и технологий параллельных вычислений на графических процессорах.

Библиографический список

1. Ермолаев, В.Т. Методы обработки сигналов в адаптивных антенных решетках и компенсаторах помехи. / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флаксман. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 194 с.
2. Ермолаев, В.Т. Регуляризованная оценка весового вектора адаптивного компенсатора помехи. / В.Т. Ермолаев, И.С. Сорокин, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Известия вузов. Радиофизика. – 2015. – Т. 58. – №12. – С. 1083-1093.
3. Сажин, В.И. Компьютерное моделирование направленных свойств антенн: учеб.пособие / В.И. Сажин, С.В. Унучков. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 86 с.
4. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Мальком, К. Моулер – М.: Мир, 1980. – 277 с.
5. Ермолаев, В.Т. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. Учебное пособие. / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флаксман – Н. Новгород, 2007. – 98 с.
6. Ершов, Р.А. Вычислительно эффективный метод обращения корреляционной матрицы в задаче поиска оптимального вектора весовых коэффициентов многоэлементной адаптивной антенной решетки / Р.А. Ершов, Е.Е. Микляева // Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии ИСТ-2017», Н. Новгород, 2017. – С.1143-1146.

R.A. Ershov, E.E. Miklyaeva, O.A. Morozov, K.A. Novozhilova

METHODS OF OPTIMAL SIGNAL PROCESSING IN ADAVTIVE ANTENNA ARRAYS

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

A comparison of the optimal signal processing methods in an adaptive interference canceller and methods for modeling the directional pattern of an adaptive interference canceller with a different number of elements based on the forming of an optimal weight vector by power-vector decomposition and pseudo inversion of the interference correlation matrix are considered in this paper. A computationally effective method of inversion of the interference correlation matrix is proposed on the basis of the calculation of the pseudoinverse Moore-Penrose matrix and it's forming on the basis of the singular value decomposition of the original matrix, which can be realized using parallel computing methods and technologies on graphical processor units.

Key words: directional pattern, weight vector, Moore-Penrose pseudoinverse, singular value decomposition, parallel computing

УДК 62-9

Д.И. Журавлева, Д.В. Гурлов, С.В. Суханов

АЛГОРИТМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского политехнического университета имени Р. Е. Алексеева

Рассмотрены источники погрешностей лазерного гироскопа. Приведено описание методов преодоления "зоны захвата", подробно изложен метод виброподставки. Указаны недостатки использования виброподставки в лазерном гироскопе. Представлены методы компенсации движения виброподставки на основе цифровой фильтрации. Проведено сравнение двух методов, а также предложены способы модернизации каждого из них.

Ключевые слова: навигационная система, датчик угловой скорости, лазерный гироскоп, виброподставка, компенсация погрешностей.

Одной из основных погрешностей лазерного гироскопа (ЛГ) является нечувствительность к входным воздействиям в области малых угловых скоростей. Такая проблема вызвана синхронизацией («захватом») частот встречных волн вследствие их связи через рассеяние на зеркалах оптического резонатора. Как известно, существует два основных метода (и множество их модификаций) преодоления данной погрешности.

В первом случае речь идёт о так называемом Зеемановском гироскопе. В схеме построения такого гироскопа применяется метод искусственного сдвига разностной частоты встречных волн, который состоит в использовании невзаимных оптических эффектов — Френеля-Физо, Фарадея, Зеемана [1].

Второй способ заключается в осуществлении угловых колебаний оптического резонатора и известен как метод виброподставки. Схема кольцевого лазерного гироскопа представлена на рисунке1, внешний вид – на рисунке 2 (виброподвес расположен в центре резонатора).

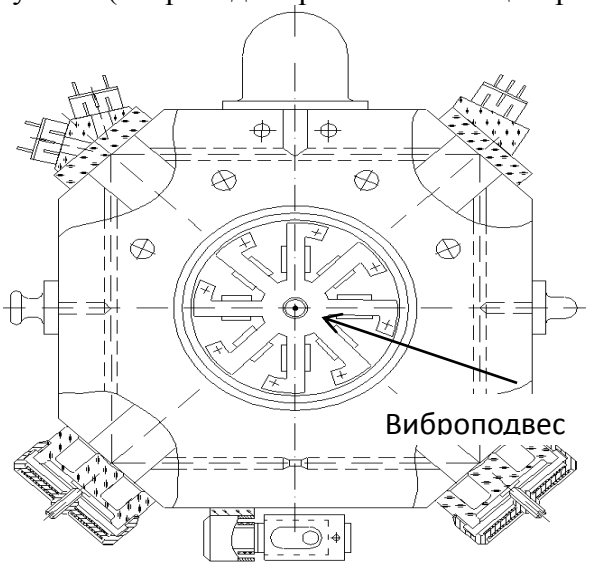


Рис.1 ЛГ с виброподставкой

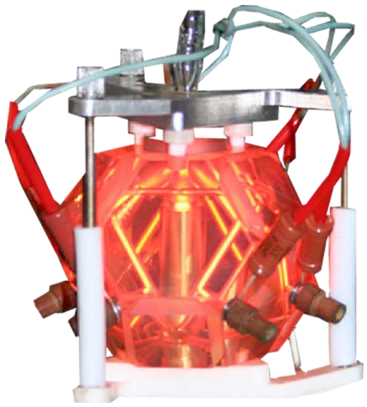


Рис.2 Внешний вид КЛГ

Схема построения ЛГ с использованием виброподставки (ВП) является в настоящее время наиболее применяемой и предполагает принудительное колебание кольцевого оптического генератора вокруг его оси чувствительности с частотой 300-600 Гц и амплитудой в несколько угловых минут. Данный метод можно назвать классическим, именно его успешно применяет предприятие «ТЕМП-АВИА» при разработке и производстве одноосных и трёхосных лазерных гироскопов [3].

Основным недостатком использования ВП в ЛГ является то, что возникает необходимость исключения движения ВП из полезного выходного сигнала. Компенсация колебательных движений виброподставки может быть реализована как с использованием дополнительных физических устройств, так и за счёт цифровой обработки выходного сигнала ВП. Основным преимуществом цифровой обработки является сохранение высокочастотных измерений прибора, которые необходимы в дальнейшем как для построения цифрового комплекса стабилизации конечных изделий, так и для реализации алгоритмов обработки измерений с целью повышения его точностных характеристик.

В настоящее время на предприятии используется датчик углового положения (ДУП), который позволяет формировать измерения ТКЛ в моменты перехода ВП через нулевое положение. Съём осуществляется 2 раза за период колебания, т.е. максимум с удвоенной частотой ВП – 600-1200 Гц. Такая конструкция накладывает существенные ограничения на частоту выдачи информации, поэтому необходимо организовать высокочастотный съём выходной информации и цифровую компенсацию движения ВП. Таким образом высокочастотная обработка измерений ТЛГ с целью компенсации конических движений в осях ВП является актуально задачей.

«Полезный» сигнал предлагается выделять за счёт применения цифровой фильтрации. Цифровая фильтрация — это обработка цифрового сигнала с целью выделения и/или подавления определённых частот этого сигнала [2].

На предприятии был разработан полосовой фильтр, который получен объединением передаточных функций трех режекторных фильтров. Фильтр имеет следующие частоты подавления:

1. Частота ВП минус 10 Гц;
2. Частота ВП;
3. Частота ВП плюс 10 Гц.

Программная реализация осуществлена в Matlab и Simulink, для чего были использованы следующие функции среды Matlab:

tf() – для реализации передаточной функции фильтра и получения коэффициентов фильтра в аналоговом виде;

bilinear( ) – для перевода коэффициентов фильтра из аналогового в цифровой вид с привязкой к частоте дискретизации;

filter( )– непосредственно для фильтрации сигнала.

Передаточная функция объединенного фильтра имеет вид:

$$H(z)=\frac{P(z)}{R(z)},$$

где $P(z)=z^6+(2.84442e+07)\cdot z^4+(2.69541e+14)\cdot z^2+(8.50930e+20),$

$$R(z)=z^6+9236.2824\cdot z^5+(5.68765e+07)\cdot z^4+(2.042678e+11)\cdot z^3+(5.389700e+14)\cdot z^2+$$
$$+(8.29391e+17)\cdot z^1+(178.50930e+20).$$

Работа фильтра отработана как на модельных, так и на реальных данных.На рисунке 3 представлена структурная схема разработанной Simulink-модели.

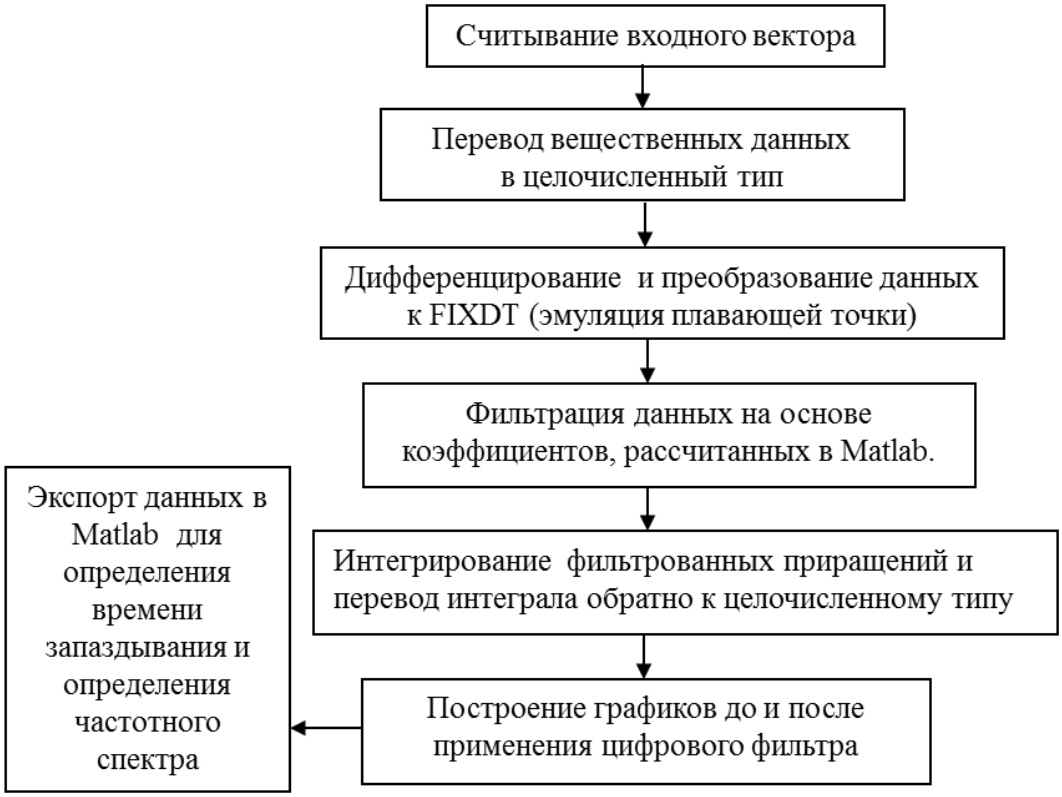


Рис.3 Структурная схема Simulink-модели

Предложенный фильтр удовлетворяет предложенным требованиям, однако имеет некоторые недостатки. Основной из них – это высокие вычислительные затраты, которые обусловлены тем, что фильтровать необходимо каждый из трёх выходных каналов гироскопа. Кроме того, для каждого прибора нужно подбирать свои коэффициенты.

В связи с этим в настоящее время на предприятии ведётся отработка иных алгоритмов и методик вычета вибродвижения. На рассмотрение взят способ, сочетающий в себе использование аппаратных средств и цифровую фильтрацию

Такой подход представляет собой компромисс между загрузкой вычислителя и качеством фильтрации ВП. Для вычитания вибродвижения используется ДУП и цифровые фильтры для

удаления систематической погрешности датчика и уменьшения остаточного шума.Схематично способ представлен на рисунке 4.

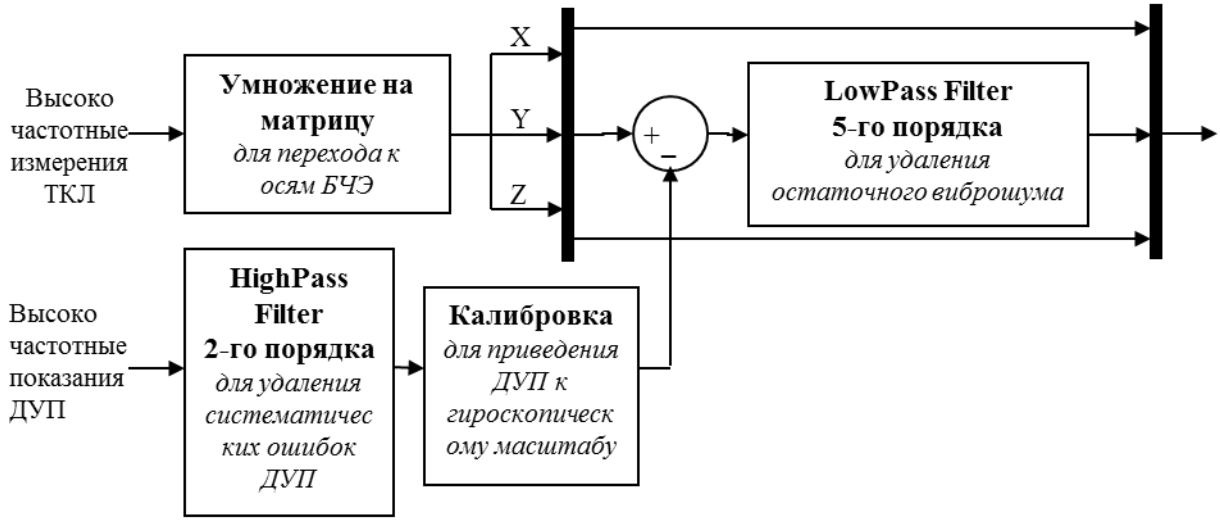


Рис.4 Алгоритм компенсации вибродвижений

Для оценки возможности применения данной методики на предприятии «ТЕМП-АВИА» были проведены доработки аппаратно-программной части и добавлена возможность съема высокочастотной информации с ДУП, совместно с высокочастотной информацией с квадратурных счетчиков. Алгоритм компенсации вибродвижения реализован в среде Matlab и Simulink, структурная схема представлена на рисунке 5.

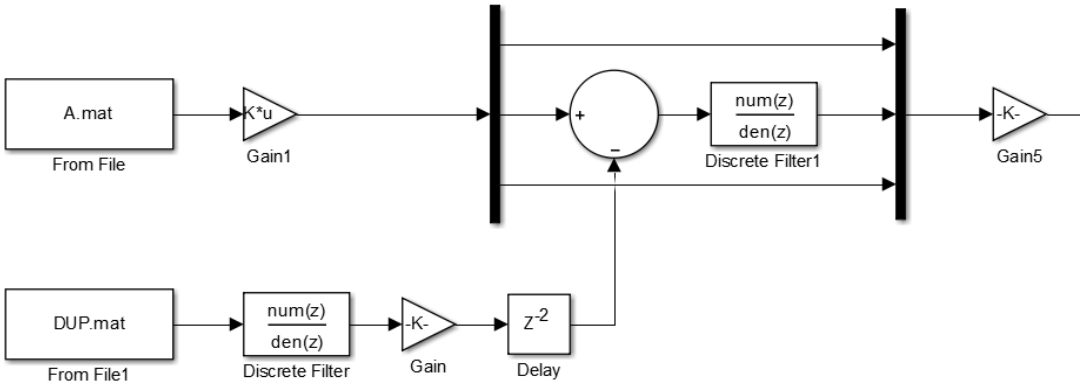


Рис.5 Алгоритм фильтрации в Simulink

На рисунке 6 представлены графики выходного сигнала по штатному съему и результат работы метода вычета вибродвижений по высокочастотным измерениям, а также разница данных сигналов.

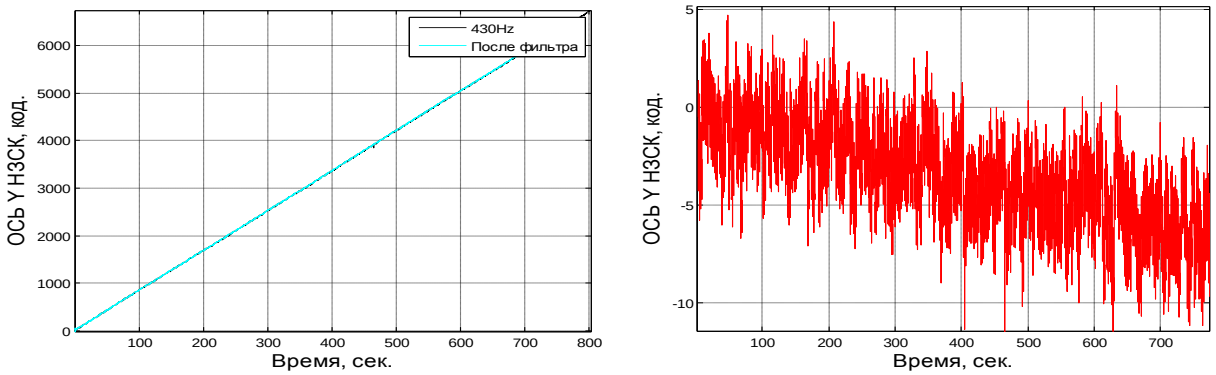


Рис.6 Выходной сигнал

Как видно из рисунка 6, имеется нарастающее во времени расхождение между двумя сигналами. Величина расхождения эквивалентна систематическому дрейфу 0.015°/ч. Можно сказать, что обработка высокочастотных измерений с ТКЛ посредством предложенного метода вычета вибродвижения соответствует штатным измерениям с ТКЛ.

Данный алгоритм позволяет сократить вычислительные затраты микроконтроллера ТКЛ за счёт отказа от фильтрации каждого измерительного канала и использования фильтров с низкими порядками (LowPass 5-го порядка и HighPass 2-го порядка). Однако предъявляются требования к качеству выходной информации с ДУП – уровень запаздывания относительно измерений ТКЛ, постоянство масштабного коэффициента, уровень выбросов и измерительного шума.Также стоит отметить, что алгоритм может быть оптимизирован. Для этого необходимо проработать вопрос об автоматическом масштабировании (автокалибровке) выходной информации ДУП относительно высокочастотного съема с квадратурных счетчиков.

Для дальнейшей работы по компенсациидвижения ВП необходимо более детально сравнить два описанных выше метода (метод полосового фильтра и метод вычета вибродвижения), а также проанализировать возможные пути усовершенствования каждого из них.

Библиографический список

1. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеемановские лазерные гироскопы. Электронный журнал: Квантовая электроника, 2015.
2. Санеев И.В. Цифровая обработка выходного сигнала лазерного гироскопа с виброподставкой. Электронный журнал: Молодёжный научно-технический вестник, 2012.
3. Суханов С.В. Методы и алгоритмы повышения точностных характеристик лазерного гироскопа. Электронный каталог диссертаций, 2009.

D. Zhuravleva, D. Gurlov, S. Sukhanov

HIGH-FREQUENCY PROCESSING ALGORITHMS OF MEASUREMENTS IN A LASER GYROSCOPE

Arzamas Polytechnical Institute of Nizhniy Novgorod State technical university n.a. Alekseev

The sources of laser gyroscope errors are considered in the article. The methods of overcoming the "capture zone" are described, method based on dither device is described in details. Disadvantages of using dither device are studied. Methods of dither error compensation based on digital filtration are presented. Two methods are compared, ways of modernizing each of them are proposed.

Keywords: navigation system, angular velocity sensor, laser gyroscope, dither device, error compensation.

УДК 621.3.013.62

С.С.Зельманов

ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСА В ЛИНЕЙНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Московский технический университет связи и информатики
(Волго-Вятский филиал, г.Н.Новгород)

Традиционная теория резонанса в линейной стационарной системе была построена в теории колебаний на базе одиночного резонатора, который в некотором смысле оказался исключением из остальной совокупности линейных систем. На его основе было дано определение резонансной частоты, зависящей якобы только от реактивных параметров и получившей название частоты нормальных колебаний. Зависимость резонансной частоты резонансной системы от потерь, тем не менее, проявилась в дальнейшем и в теории, и на практике. С потерями в резонансной системе можно считаться, можно пренебрегать ими в ряде случаев, когда они не существенны. Но отказ от признания потерь в самих истоках теории резонанса и переход к апериодическим и критическим режимам в резонансной системе второго порядка представляется не совсем корректным. Статья посвящена уточнению характера колебаний контура в режиме резонанса при учёте потерь вне зависимости от их величины и конструктивной роли потерь в теории резонанса и его приложениях.

Ключевые слова: апериодический режим, критический режим, спектральный критерий, экспоненциальные составляющие, свободный процесс, собственный процесс.

Рассмотрим резонансную систему типа последовательного LCR-контура в режиме свободных колебаний (Рис. 1).

Дифференциальное уравнение для тока свободного процесса в таком контуре имеет вид

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0, \qquad (1)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Характеристическое уравнение системы: $p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0$.

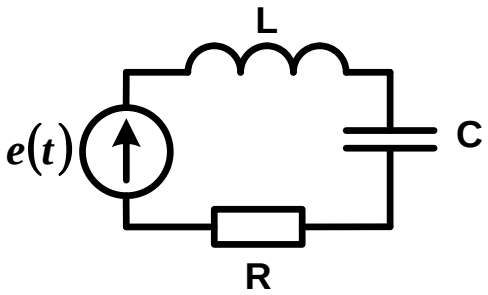


Рис. 1. Схема одиночного колебательного контура

Традиционно принято, что в зависимости от вида корней характеристического уравнения в системе могут существовать три режима: апериодический, критический и колебательный.

При $\alpha < \omega_0$ имеют место комплексно-сопряженные корни и колебательный режим.

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_{св}, \text{ где } \omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}.$$

Решение уравнения (1), то есть выражение для тока свободного процесса, будет иметь вид:

$$i_{\text{св}}(t)=\frac{1}{L}\frac{\omega_0}{\omega_{\text{св}}}e^{-\alpha t}\cos(\omega_{\text{св}}t+\varphi), \tag{2}$$

где ω_0 – частота нормальных колебаний; $\omega_{\text{св}}=\sqrt{\omega_0^2-\alpha^2}$; $\varphi=\operatorname{arctg}\frac{\alpha}{\omega_{\text{св}}}$.

В линейных стационарных динамических системах ток свободного процесса является суммой токов собственных процессов. В нашем случае ток $i_{\text{св}}$ является свободным процессом в системе, т.е. он же является иединственнымсобственным свободным процессом.

В соответствии с традиционным критерием резонанса при $\alpha\to 0$ резонансная частота системы стремится к частоте ее нормальных колебаний, то есть $\omega_{\text{р}}\to\omega_0$ [1]. Определим спектр свободного процесса тока с учетом выражения (2).

$$S_{\text{св}}(j\omega)==\int_0^{\infty} i_{\text{св}}(t)e^{-j\omega t}dt=\frac{1}{L}\frac{\omega}{\sqrt{[\alpha^2+\omega_{\text{св}}^2-\omega^2]+4\alpha^2\omega^2}}e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\operatorname{arctg}\frac{2\omega\alpha}{\alpha^2+\omega_{\text{св}}^2-\omega^2}\right)} \tag{3}$$

Исследование модуля этого выражения на экстремум позволяет определить частоту экстремума, то есть резонансную частоту системы. В результате получим, что $\omega_{\text{р}}=\omega_0=1/\sqrt{LC}$. Этот результат широко известен и из условия равенства нулю реактивного сопротивления цепи. Однако здесь важно не только это. Важно, в каком соотношении находятся: резонансная частота системы, частота свободных колебаний в системе и частота её нормальных колебаний. Соотношения между ними таковы: во-первых резонансная частота $\omega_{\text{р}}$ соответствует положению экстремума модуля спектра свободного процесса; во-вторых, резонансная частота $\omega_p=\omega_0$ не совпадает с частотой свободных колебаний системы $\omega_{св}$, т.к. $\omega_{\text{св}}=\sqrt{\omega_0^2-\alpha^2}$; в-третьих, резонансная частота системы $\omega_{\text{р}}$ совпадает с частотой ее нормальных колебаний ω_0, т.е. колебаний при отсутствии потерь (R=0).

Создается иллюзия, что потери энергии в системе не должны влиять на величину ее резонансной частоты. Однако это совершенно неверно. Рассмотренный случай широко распространенной колебательной системы вида одиночного контура в указанном смысле является скорее исключением, нежели правилом. Однако на примере этой простой системы базируется традиционная теория резонанса [1].

Рассмотрим традиционно принятые апериодический и критический режимы, для которых соответственно справедливы неравенства: $\alpha^2>\omega_0^2$ и $\alpha^2=\omega_0^2$.

Соответствующие решения для тока свободного процесса в этих режимах будут иметь вид: при $\alpha^2>\omega_0^2$, $\alpha_{1,2}=-\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2}$;

$$i(t)=\frac{1}{L}\frac{1}{(\alpha_1-\alpha_2)}\left(\alpha_2e^{-\alpha_2 t}-\alpha_1e^{-\alpha_1 t}\right); \tag{4}$$

при $\alpha^2=\omega_0^2$. $\alpha_{1,2}=-\alpha$

$$i(t)=\frac{1}{L}(1-\alpha t)e^{-\alpha t} \tag{5}$$

Апериодический и критический режимы, с одной стороны, и колебательный режим, с другой стороны, рассматриваются обычно по характеру их свободных процессов. В

колебательном режиме свободный процесс имеет вид экспоненциально затухающего гармонического колебания. Для апериодического и критического режимов свободный процесс, наблюдаемый на L и C контура, представленный суммой двух экспонент, традиционно как колебание не рассматривается и возможность резонанса в этих режимах не обсуждается.

В подтверждение этого, но с соблюдением некоторой осторожности утверждается, что «фактически граница между колебательными и апериодическими процессами размыта и не может быть проведена резко», а причина заключается в том, что «становится незаметным и явление резонанса – одно из наиболее характерных явлений в неавтономных колебательных системах». Далее к этому вопросу в теории колебаний уже никто не обращается [2].

Следует заметить, что понятие «незаметно» и понятие «не существует», на наш взгляд, вещи достаточно различные и в теоретических вопросах их приравнивать, мягко говоря, не совсем корректно.

Введённый нами спектральный критерий резонанса, который утверждает, что частота, на которой имеет место максимум огибающей модуля спектра свободного процесса, является резонансной частотой системы,позволяет определенно ответить на этот вопрос. Проблема не в том, заметен резонанс или нет в апериодическом и критическом режиме. Проблема в том, существует ли он вообще в этих режимах? Выражения (4) и (5) представляют свободные процессы тока в апериодическом и критическом режимах. При условии действия на входе контура δ-импульса импульсные характеристики для напряжений $h_\delta(t)$ по отношению к соответствующим элементам контура будут иметь вид выражений (6-11):

при $\alpha^2 > \omega_0^2$

$$u_R(t) = iR = \frac{R}{L}\frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1}\left(\alpha_2 e^{-\alpha_2 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_1 t}\right), \tag{6}$$

$$u_L(t) = L\frac{di}{dt} = \delta(t) + \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1}\left(\alpha_1^2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2^2 e^{-\alpha_2 t}\right), \tag{7}$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C}\int i dt = \frac{\alpha_1\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}\left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right); \tag{8}$$

при $\alpha^2 = \omega_0^2$:

$$u_R(t) = \frac{R}{L}(1 - \alpha t)e^{-\alpha t}, \tag{9}$$

$$u_L(t) = L\frac{di}{dt} = \alpha(\alpha t - 2)e^{-\alpha t}, \tag{10}$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C}\int i dt = \omega_0^2 t e^{-\alpha t}. \tag{11}$$

Заметим, что эти зависимости являются свободными процессами, состоящими из собственных процессов, которые носят апериодический характер. Определим спектры свободных процессов и их модули в соответствии с выражением вида:

$$S(j\omega) = \int_0^\infty h_\delta(t) e^{-j\omega t} dt \tag{12}$$

Проведя соответствующие преобразования с помощью выражения (12), получим для модулей этих спектров выражения вида:

при $\alpha^2 > \omega_0^2$:

$$S_{\delta R}(\omega) = \frac{\omega(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sqrt{(\alpha_1\alpha_2 - \omega^2)^2 + \omega^2(\alpha_1 + \alpha_2)^2}} \quad (13)$$

$$S_{\delta L}(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\omega^2 - \alpha_1\alpha_2\right)^2 + \omega^2\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^2}} \quad ; \quad (14)$$

$$S_{\delta C}(\omega) = \frac{\alpha_1\alpha_2}{\sqrt{\left(\alpha_1\alpha_2 - \omega^2\right)^2 + \omega^2\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^2}} \quad (15)$$

при $\alpha^2 = \omega_0^2$:

$$S_{\delta R}(\omega) = \frac{2\omega\alpha}{\sqrt{\left(\alpha^2 - \omega^2\right)^2 + 4\alpha^2\omega^2}} \quad ; \quad (16)$$

$$S_{\delta L}(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\alpha^2 - \omega^2\right)^2 + 4\alpha^2\omega^2}} \quad ; \quad (17)$$

$$S_{\delta C}(\omega) = \frac{\alpha^2}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}} \quad . \quad (18)$$

Полученные выражения (13-18) являются модулями спектральной плотности напряжений свободных процессов на элементах контура в апериодическом и критическом режимах. Соответствующие зависимости представлены на рис.2.

Из анализа выражений (13) и (16) следует, что модули спектральной плотности свободного процесса тока в каждом из этих режимов, и соответственно вызываемое этим током напряжение на резисторе в апериодическом и критическом режимах имеют экстремумы типа "максимум" на частотах $\omega_{p1} = \sqrt{\alpha_1\alpha_2}$ и $\omega_{p2} = \alpha$ соответственно. Это означает, что в соответствии со спектральным критерием резонанса на этих частотах в данной системе имеет место резонанс.

С явлением резонанса в линейной системе с потерями обычно связывают наличие свободного процесса, имеющего затухающий колебательный характер. Однако, рассматриваемый вид решений (6) и (9) для свободных процессов в апериодическом и критическом режимах представлен суммой двух экспонент, и, тем не менее, резонанс в этих режимах имеет место. Возникает определенное противоречие, требующее соответствующего разъяснения. Попробуем разобраться в этом.

В соответствии с традиционными представлениями о резонансе решение уравнения резонансной системы должно иметь вид затухающего колебательного, а не апериодического процесса. Рассмотрим выражение (6) для $u_R(t)$, представленное графиком на рис.3. Аналогичный характер будет иметь зависимость, представленная выражением (9).

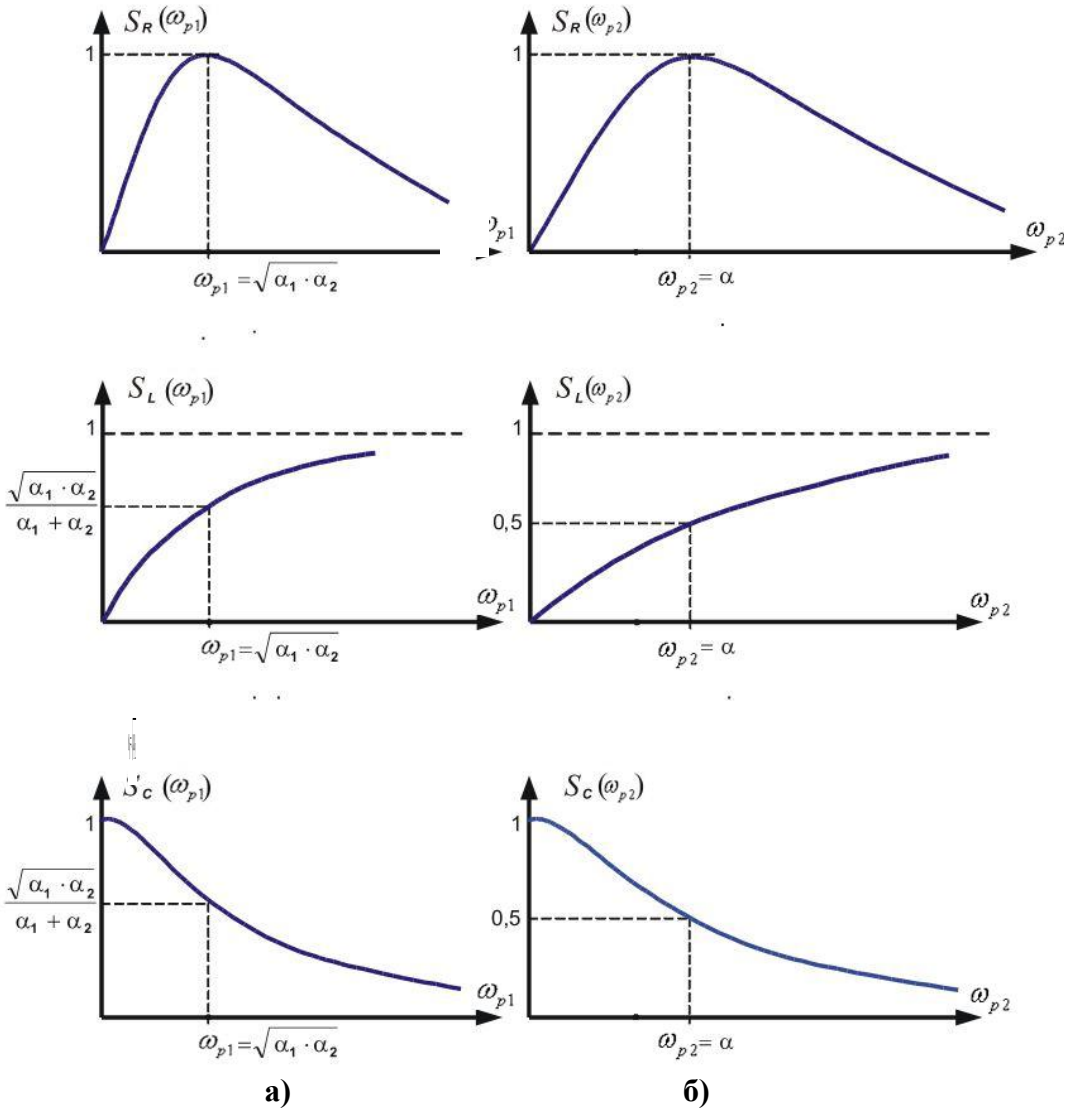


Рис.2. Модули спектральной плотности свободных процессов для апериодического (*а*) и критического (*б*) режимов

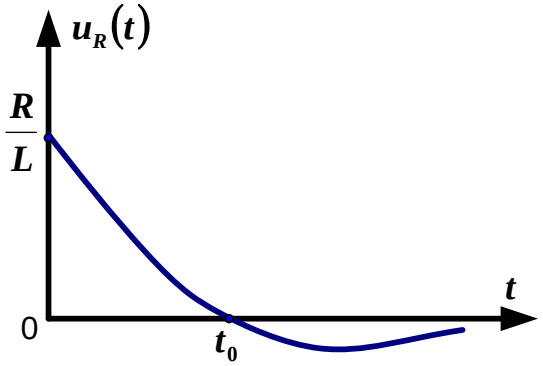


Рис.3. Импульсная характеристика RLC-четырехполюсника с резистором R на выходе

Легко видеть, что в момент t_0 напряжение $u_R(t)$ меняет знак, затем достигает минимума и стремится к нулю при $t \to \infty$. Является ли такой процесс колебательным? Для того, чтобы ответить на это вопрос, следует выяснить, является ли в линейной системе периодическим колебательный свободный процесс вида $u_1(t) = U_m e^{-\alpha t} \sin \omega_0' t$?

Судя по форме этого процесса, его нельзя назвать периодическим в строгом смысле этого понятия. Поэтому не случайно, что его, так называемый «период», в теории называют «условным». Строго периодическим является незатухающее колебание вида $u_2(t) = U_m \sin \omega t$.

Итак, экспоненциально затухающее колебание $u_1(t) = U_m e^{-\alpha t} \sin \omega_0' t$, строго говоря,является колебанием непериодическим. По этой причине можно достаточно «условно» говорить о его частоте.

Принв это, рассмотрим моменты времени t_n, в которые затухающее колебание $u_1(t)$ проходит через нулевые значения, изменяя каждый раз знак с отрицательного на положительный. Будем называть эти переходы «положительными нулями». Соответствующие им моменты времени удовлетворяют уравнению $\omega_0' t_n = 2\pi n (n = 0, 1, 2, \ldots)$.

Будем считать приближённо, чтомоменты t_n следуют во времени равномерно, т.е. периодически, хотя это и не так, строго говоря. Тогда их «условный» период равен:

$$T_{\omega_0'} = t_{n+1} - t_n = \frac{2\pi}{\omega_0'}; \omega_0' = \frac{2\pi}{T_{\omega_0'}}. \quad (19)$$

Следовательно, частота ω_0' есть угловая частота повторения положительных переходов свободного колебания $u_1(t)$через ноль. С увеличением потерь в системе количество колебаний затухающего процесса будет уменьшаться. Соответственно будет уменьшатьсячисло положительных переходов его через ноль и увеличиваться их неравно мерность во времени.В результате процесс придёт к виду, обладающему лишь одним «положительным нулём» (рис.3).Это и есть свободное колебание тока системы в апериодическом или критическом режимах.Спектральная плотность этого свободного колебания имеет максимум на некоторойчастоте ω_p, что в соответствии с критерием спектрального резонанса свидетельствует о наличии резонанса в системе на этой частоте.

Отсюда следует, что смысл частот ω_0' и ω_p различен, и нет ничего удивительного в том, что они не равны друг другу. Только при $\alpha = 0$ частота максимума спектральной плотности свободного колебания ω_p, то есть резонансная частота системы, будет равна частоте свободных колебаний $\omega_0' = \omega_p$, т.е. частоте нулевых переходов.

Итак, резонанс в апериодическом или критическом режимах, как бы он слабо не был выражен, всегда будет иметь место. При этом гармонический ток в системе при весьма малой амплитуде будет резонансным. Острота резонанса может быть увеличена как угодно. Это вопрос чисто технический.

Особенность полученного результата состоит в том, что с возможностью резонанса в линейной стационарной системе традиционно связывают комплексно-сопряженные корни её характеристического уравнения.Поэтому наличие резонанса в системе, свободные процессы в которой представляют собой сумму экспонент и корни характеристического уравнения которой отрицательны, несколько расширяет наше представление о резонансе в линейной стационарной системе [3].

При этом ошибочно полагать, что любая пара экспонент будет обладать свойствами выражений (6) и (9). Полученные свободные процессы (7),(8),(10),(11) для индуктивности и ёмкости системы также являются парами экспонент. Однако, их временные зависимости не имеют «положительных нулей», а их спектральные плотности не имеют максимумов ни на одной частоте, как бы свидетельствуя об отсутствии резонанса в системе, в то время как резонанс в системе имеет место (рис.2). Индуктивность и емкость системы, как частотно-зависимые элементы, трансформируют поведение слабого резонансного тока в соответствии со своими свойствами. Поэтому характер напряжения на этих элементах может быть отличным от характера поведения тока в системе. Отсюда следует различный характер спектров свободного процесса, относящихся к этим элементам [4].

Выводы

Во-первых, на примере простейшей линейной стационарной динамической системы, с которой, казалось бы, всё давно понятно, были выявлены некоторые особенности её резонансного поведения, на которые не было обращено должного внимания при формировании теории резонанса.

Во-вторых, показана роль потерь и их влияние на резонансные частоты системы без идеализации самой системы.

В-третьих, проведённый анализ позволяет объяснить природу резонансных явлений в RC-системах при отрицательных корнях характеристических уравнений, свободные процессы в которых представляют собой сумму экспоненциальных собственных процессов.

В-четвёртых, подтверждена конструктивная роль потерь, указывающая на возможность формирования резонансных систем, обладающих свободными процессами, собственные процессы в которых имеют характер экспонент [5].

Библиографический список

1. Папалекси, Н.Д. Эволюция понятия резонанса / Н.Д. Папалекси // Успехи физических наук. 1947. Т. 31. Вып. 4.

2.Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: ГИФМЛ, 1959.С.68.

3. Зельманов, С.С. Резонанс в линейной стационарной системе с экспоненциальными собственными процессами //Известия ЮФУ. Технические науки-Таганрог:Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010.-12(113).С.116-125.

4. Зельманов, С.С.Особенностиапериодическогорежималинейнойстационарнойсистемы / С.С. Зельманов // Latvian journal of physics and technical science. 2003. № 2,С31.

5. Зельманов, С.С. Синтез резонансных систем с апериодическими собственными процессами / С.С. Зельманов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2001: тезисы докладов научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2001.С20-21.

S. S. Zelmanov

FEATURES OF THE RESONANCE IN THE LINEAR STATIONARY DYNAMIC SYSTEM

Moscow technical University of communications and Informatics
(Volgo-Vyatsky branch, G. N. Novgorod)

The traditional theory of resonance in linear stationary system built in vibration theory based on a single resonator, which in a sense was an exception from the rest of the totality of linear systems. On the basis of his determination of the resonant frequency is based on the alleged only LC-parameters and the frequency of the normal vibrations. The dependence of resonance frequency on resistive losses, however, appeared in theory and in practice. With the losses in the resonant system can be considered, can be neglected in some cases when they are not significant. But the unacceptability of losses in the origins of the theory of resonance and transition to the aperiodic and critical modes in the resonant system of the second order is not quite correct. The article is devoted to clarifying the nature of the oscillation circuits in resonant mode, when accounting for losses regardless of their size and the constructive role of losses in the theory of resonance and its applications.

Key words: aperiodic mode, critical mode, the spectral criterion,exponential components, own process free process.

УДК 621.37

Д.В. Калинин, Н.А. Макарычев, А.В. Назаров

ДЕКОДЕР КВАДРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

В докладе приводится описание декодера квадратурных сигналов преобразователя линейных перемещений, реализованного на базе ПЛИС фирмы Alterac использованием встроенного программного процессора NiosII.

Ключевые слова: квадратурный декодер, преобразователь линейных перемещений, ПЛИС, программный процессор.

Преобразователи линейных перемещений обеспечивают информационную связь между позиционируемым объектом и устройством числового программного управления (УЧПУ) или устройством цифровой индикации (УЦИ). Благодаря высокой степени защищенности, а также высокой устойчивости к внешним воздействиям преобразователи линейных перемещений находят широкое применение в различных областях науки и техники.

Преобразователь имеет два кинетически связанных функциональных звена: растровую шкалу и растровый анализатор. Узел считывания позволяет регистрировать величину их относительно перемещения. Шкала содержит две параллельные растровые дорожки регулярного растра и референтных меток. Анализатор содержит четыре окна A, $\overline{A}$, B, $\overline{B}$ инкрементального считывания и окно референтной метки. Периоды растров в окнах равны периодам регулярного растра шкалы. При этом в каждой паре окон растры смещены друг относительно друга на величину, равную половине периода, а взаимный пространственный сдвиг между парами окон составляет четверть периода.

Построенный таким образом канал считывания информации позволяет сформировать два ортогональных периодических сигнала, сдвинутых по фазе на 90^0, исключив из них постоянную составляющую. Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление перемещения, а число их периодов - величину перемещения.

Декодер квадратурных сигналов преобразователя линейных перемещений, разработанный в филиале ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», выполняет декодирование, накопление относительных и абсолютных текущих координат и выдачу накопленных значений по высокоуровневым запросам через USB-интерфейс.

Декодер обеспечивает высокую скорость обработки сигналов преобразователя и фиксирует каждое изменение любого из них.

Декодер реализует 2 реверсивных счетчика, которые содержат текущие координаты каретки преобразователя – относительную и абсолютную. Счетчики работают идентично, с одним отличием: по высокому уровню референтной метки осуществляется обнуление значения счетчика абсолютной координаты.

Декодер по специальному сигналу стробирования сохраняет текущее значение реверсивного счетчика перемещения в отдельную ячейку внутренней памяти. Фиксация текущих значений выполняется с минимальной и строго детерминированной задержкой.

Декодер имеет внутреннюю память позволяющую сохранять до 5000 значений счетчика. Переполнение памяти фиксируется и выдается в качестве ошибки при ответе на запрос-команду.

Декодер обеспечивает прием и обработку запросов-команд. На каждую команду декодер выдает ответ, который зависит от типа команды. Список запросов-команд и их описание приведены в таб. 1.

Таблица 1

Список и описание запросов-команд и ответы на них

Запрос-команда	Ответ на запрос	Описание запроса
GET OTN	ANSWER GET OTN {значениесчетчика}	Запрос текущего значения относительной координаты
GET ABS	ANSWER GET ABS {значениесчетчика}	Запрос текущего значения абсолютной координаты
GET CALIBR	ANSWER GET CALIBR	Запрос флага калибровки абсолютной координаты
GET STROBECOUNT	ANSWERGETSTROBECOUNT {количество накопленных значений}	Запрос количества накопленных значений
GET STROBE{номер строба}	ANSWER GET STROBE {номерстроба} {значение}	Запрос сохраненного значения из буфера по номеру
GET ALLSTROBE	ANSWERGETALLSTROBE {количество значений} {значение 1}…{последнее значение}	Запрос всех накопленных значений
GET SPEEDERRORSCOUNT	ANWER GET SPEEDERRORSCOUNT {значениесчетчикаошибок}	Запрос количества ошибок скорости преобразователя
SET STROBECLEAR	ANSWER SET STROBECLEAR	Установить позицию в буфере накопленных значений в 0
SET STROBECOUNT {индекс}	ANSWER SET STROBECOUNT {индекс}	Установить позицию буфера накопленных значений на конкретную величину
SET OTN {значение}	ANSWER SET OTN {значение}	Установить значение счетчика относительной координаты
SET ABS {значение}	ANSWER SET ABS {значение}	Установить значение счетчика абсолютной координаты
SET CALIBR {true|false}	ANSWER SET CALIBR {true|false}	Установить|сбросить флаг калибровки абсолютной координаты
SET SPEEDERRORSCOUNTCLEAR	ANSWER SET SPEEDERRORSCOUNTCLEAR	Сбросить счетчик ошибок нехватки скорости обработки

Обобщенная структурная схема декодера представлена на рис.1.

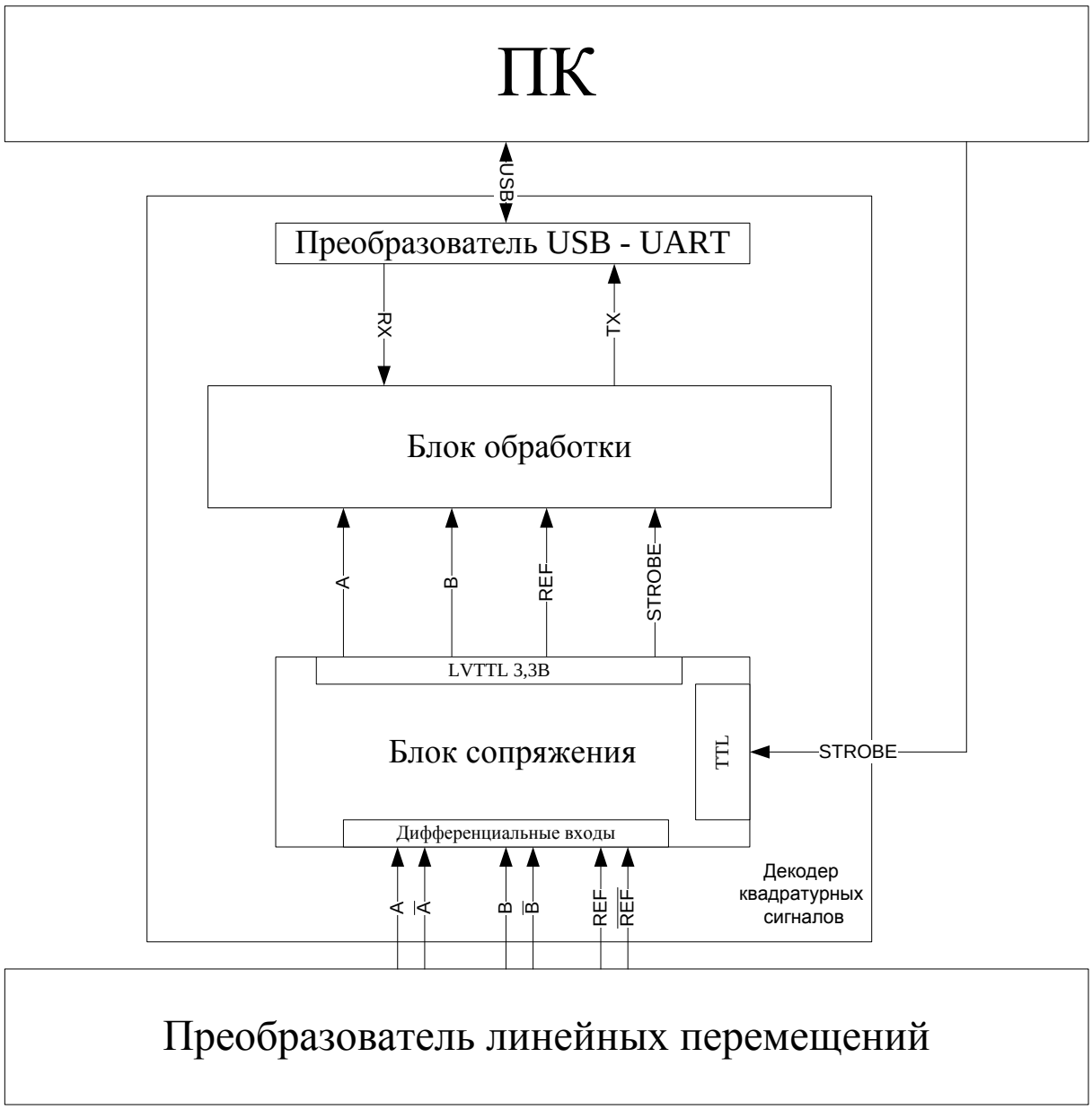


Рис. 1

В декодере квадратурных сигналов можно условновыделить три составные части: преобразователь USB-UART, блок обработки и блок сопряжения.Блок сопряжения преобразует дифференциальные сигналы преобразователя линейных перемещений в сигналы LVTTL 3,3 В, подаваемые на блок обработки.В блоке обработки происходит декодирование и накопление значений по сигналу STROBE, а также выдача ответов на запросы-команды от пользователя. Для удобства пользователя и простоты реализации управления блоком обработки был использован преобразователь USB-UART, выполненный на основе микросхемы CP2102.

Блок обработки является главным блоком. Блок выполнен на базе FPGA ПЛИС фирмы Altera. Данные ПЛИС позволяют применять программный процессорNiosII. Система с процессором NiosII – это эквивалент микроконтроллеру или «системе на кристалле», который содержит процессор и комбинацию периферии и памяти в одном чипе. Она состоит из ядра процессора NiosII, набора периферии на чипе, памяти на чипе и интерфейса с внешней памятью. При этом все размещается в одном чипе Altera. Аналогично семейству микроконтроллеров, система с процессором NiosII использует постоянный набор инструкций и модель программирования.

Процессор NiosII – это процессор с конфигурируемым программным ядром, в противоположность фиксированному ядру готового микроконтроллера. Эта особенность позволяет оптимально подобрать необходимый для решения задачи набор периферии. Схема сконфигурированной системы приведена на рисунке 2. В ней присутствуют ядро процессора NiosII, блок памяти RAM, UART–контроллер, EPCSFlashController (для загрузки файла прошивки в конфигурационное ПЗУ), блок JTAG-UART (используется для отладки) и набор портов ввода-вывода.

Процессорной системе требуется не менее одного блока памяти под данные и инструкции. Для этого в систему был добавлен блок памяти RAMOn-ChipMemory (RAMorROM).

Добавление блока JTAG-UART позволяет осуществлять обмен символьными данными с процессором NiosII посредством загрузочного кабеля USB-Blaster.

Для источника конфигурации ПЛИС было использовано конфигурационное ПЗУ EPCS16SI8N. ПЗУ также хранит код программы процессора NiosII. Для загрузки кода программы в RAMпроцессора необходимо подключение к системе EPCSFlashController. EPCSFlashController проверяет, виден ли объектный файл программирования образа конфигурации ПЛИС, расположенный в начале чипа EPCS16SI8N. Если он находит этот файл, то считывает заголовок файла, чтобы определить размер конфигурации ПЛИС. Затем EPCSFlashController ищет запись загрузки программы, следующуюсразу за последним байтом образа конфигурации ПЛИС. Если запись загрузки найдена, EPCSFlashController читает ее и копирует код программы в RAM. После завершения копирования EPCSFlashController читает точку входа кода программы из записи загрузки, далее выполняет переход на этот адрес, и программа процессора NiosII начинает исполняться.

Система с процессором NiosII обрабатывает запросы-команды, пришедшие от пользователя. В зависимости от типа запроса-команды выполняет обращение либо к памяти напрямую, либо к блоку декодирования.

Блок декодирования представляет из себя квадратурный декодер, на входах которого установлены цепочки последовательно соединенных Д-триггеров для защиты от метастабильности. Также в блок декодирования входит цифровой фильтр, применение которого обусловлено наличием возможных наводок (например от шаговых двигателей или поворотных устройств). Схема соединения блоков представлена на рис.3.

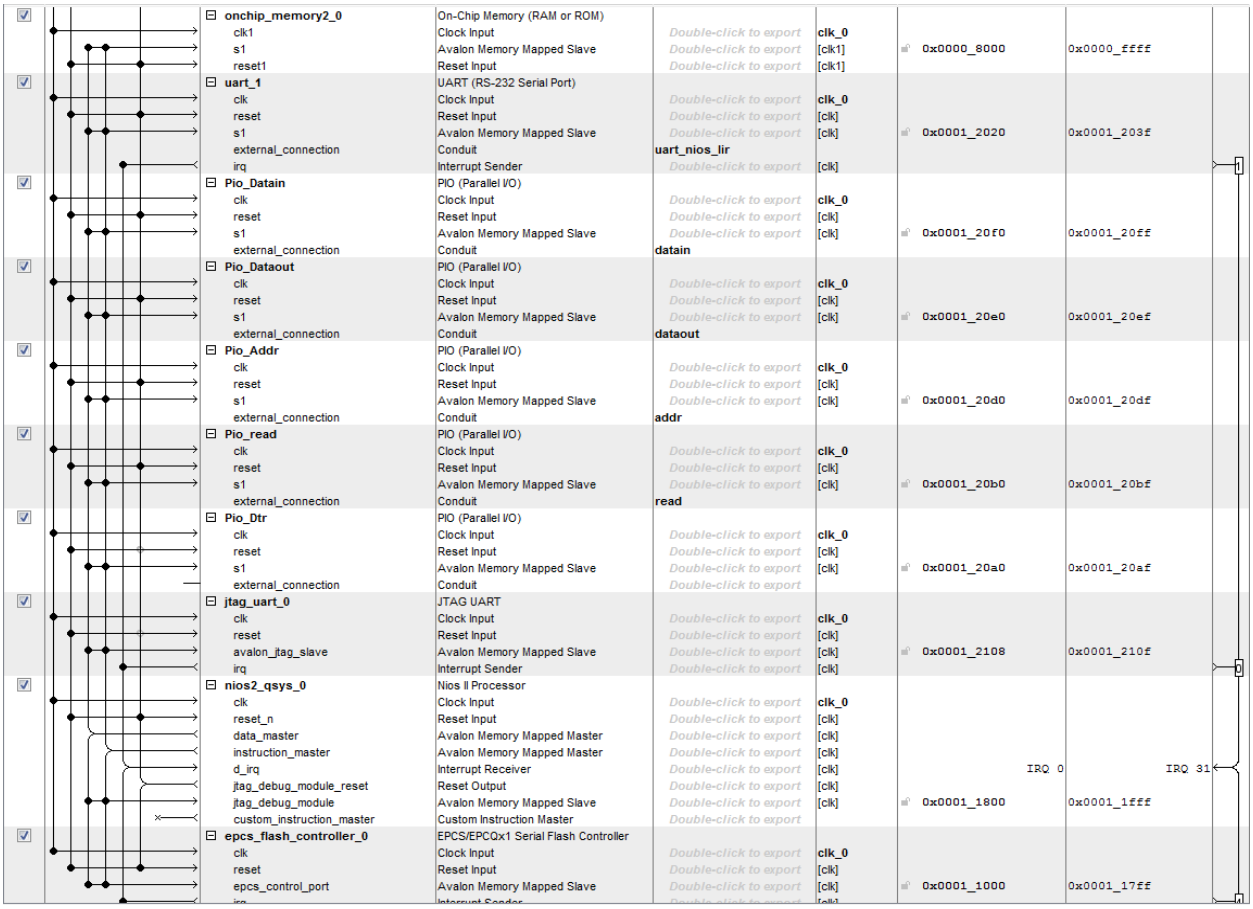


Рис.2

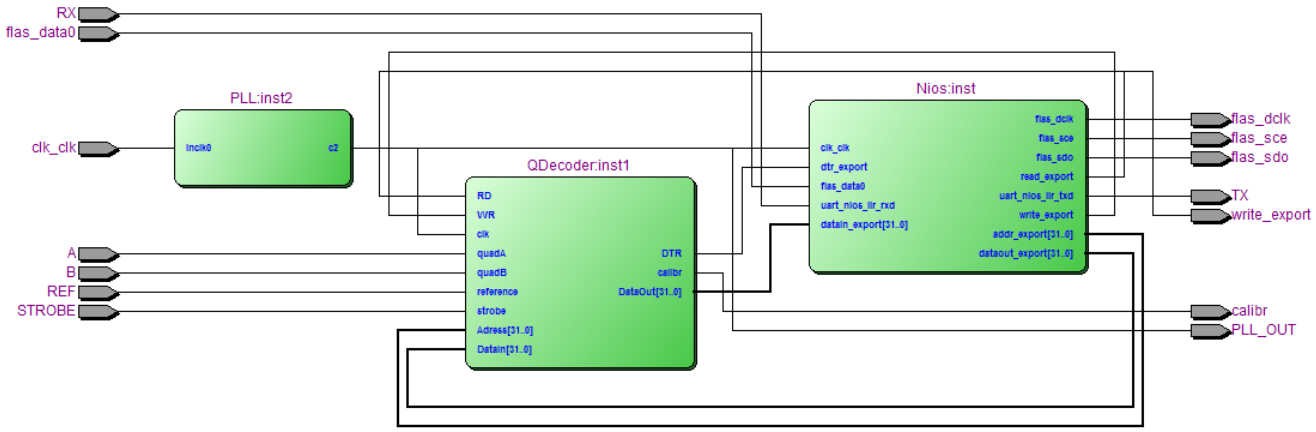


Рис.3

Для реализации данной схемы оптимальным решением является использование FPGA ПЛИС фирмы AlteraCycloneIII EP3C25. Выбор данной ПЛИС обусловлен наличием:

- необходимого объема внутренней памяти, позволяющей сохранять до 5000 значений счетчика;

- необходимого количества логических элементов (минимум 2500 при использованииNiosII);
- компактного корпуса EQFP-144, удобного для монтажа.

Таким образом, был реализован декодер квадратурных сигналов преобразователя линейных перемещений. Декодер обеспечивает высокую скорость обработки сигналов преобразователя, защиту от различных наводок, удобство отладки за счет использования встроенного процессора NiosII и возможность быстрого изменения конфигурации.Использование минимального количества компонентов позволяет реализовать декодер с оптимальными массо-габаритными характеристиками.

D.V. Kalinin,N.A. Makarychev, A.V. Nazarov

DECODER OF QUADRATURE SIGNALS OF THE LINEAR MOVEMENTSCONVERTER

Realization of the decoder of quadrature signals of the linear movementsconverteron the FPGA base of Altera firm with use of the built-in program Nios II processor is given in the report.

Keywords: quadrature decoder, linear movements converter, FPGA, program processor.

УДК 621.314

Н.С. Корнев[1], К.В. Минеев[1], А.В. Назаров[1], Р.Р. Османов[1], В.Г. Титов[2]

УМЕНЬШЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» [1],
НГТУ им. Р.Е. Алексеева[2]

Проведено исследование возможности фильтрации выходного напряжения различных топологий импульсных источников питания (ИИП) сверхточной высокочувствительной измерительной аппаратуры. Синтезированы оптимальные фильтры. По результатам компьютерного моделирования проведена оценка уровня пульсаций напряжения на выходах ИИП с синтезированными фильтрами.

Ключевые слова: источник питания, импульсный источник питания, фильтрация, эллиптический фильтр, пульсации.

При разработке сверхточной измерительной аппаратуры особое внимание необходимо уделять возникновению и распространению нежелательных помех в информационных каналах приборов. В большинстве случаев, основным источником помех и шумов является блок питания (БП) прибора. Поэтому, уже на стадии проектирования измерительной аппаратуры необходимо предъявлять требования к уровню шумов и пульсаций его БП.

Так, для разрабатываемого в НИИИС им. Ю.Е. Седакова полигонного радиоинтерферометрического комплекса (РИК), исходя из массогабаритных показателей, значений КПД, простоты и малой цены схемотехнической реализации, наиболее оптимальным типом источника питания (ИП) является импульсный ИП (ИИП) [1], в частности однотактный прямоходовый или обратноходовый преобразователь. Однако, использование ИИП в РИК влечет за собой распространение кондуктивных помех, создаваемых пульсациями выходного напряжения ИП, непосредственно через кабели питания. В дальнейшем помехи усиливаются при прохождении через усилительные элементы прибора и попадают в приемный канал РИК. Таким образом, применение импульсных преобразователей в РИК приводит к резкому увеличению уровня собственных шумов прибора и, как следствие, к увеличению погрешности обработки результатов
измерений [2, 3], что в случае высокоточных измерений является крайне нежелательным.

В настоящее время в качестве ИП РИК используется 4-х канальный линейный источник питания (ЛИП) уровень пульсаций выходного напряжения которого обеспечивает приемлемую точность обработки результатов. Использование ЛИП сопряжено с повышенными потерями в КПД и сложностями в эксплуатации.

Основным источником шума ИИП является входная схема питания. Она содержит ключ – широтно-импульсный модулятор (ШИМ), первичную обмотку трансформатора и конденсатор входного фильтра. Частота работы ШИМ определяет частоту пульсаций выходного напряжения. Другим источником шума являются дорожки печатной платы, на которой расположены компоненты преобразователя. Длина дорожек обуславливает частоты электромагнитных помех (ЭМП), излучаемых в окружающее пространство.

Для предотвращения распространения ЭМП в окружающее пространство (для улучшения электромагнитной совместимости), как правило, используют экранировку ИП.

Основным методом борьбы с высокочастотными пульсациями, создаваемыми ШИМ ИИП, является установка фильтра между источником питания и конечным потребителем, подавляющего шумовые составляющие сигнала.

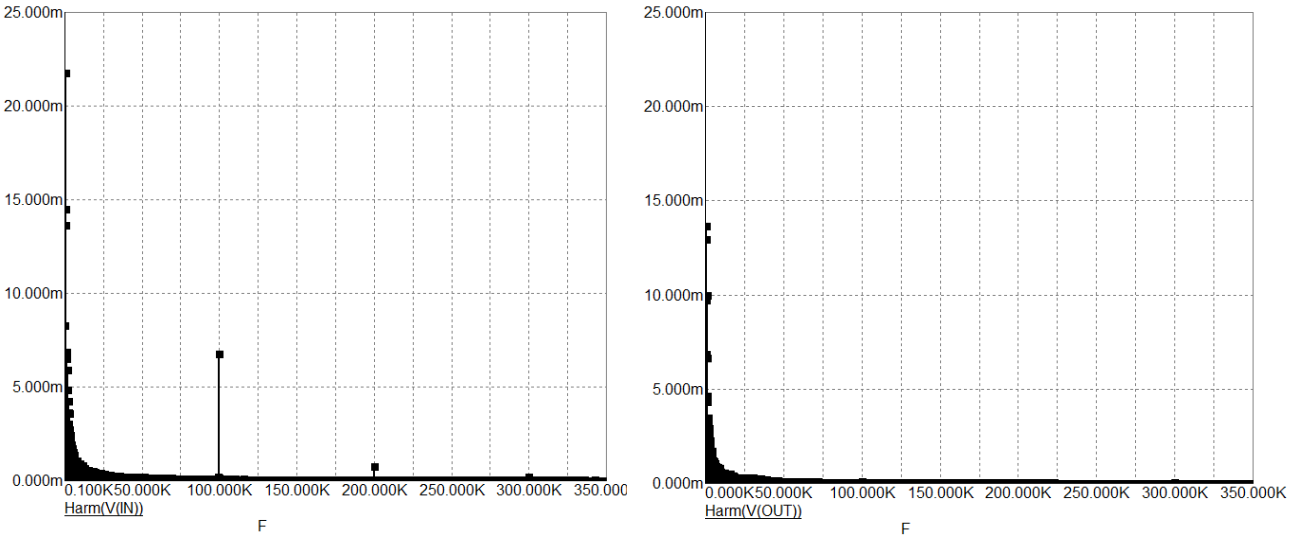
Целью данной работы является математическое моделирование схем фильтрации прямоходовых и обратноходовых преобразователей напряжения.

Из всего многообразия схем фильтров была выбрана топология фильтра нижних частот (ФНЧ) с эллиптической амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Данный тип фильтра имеет наибольшую крутизну АЧХ, при этом обеспечивая минимальный порядок, по сравнению с фильтрами Чебышева и Баттерворта [4]. Это обстоятельство оказалось решающим фактором, так как порядок фильтра напрямую связан с количеством реактивных элементов в схеме. Поэтому увеличение порядка или выбор другого типа фильтра с такой же крутизной АЧХ однозначно приведет к существенному усложнению схемы и удорожанию стоимости всего ИП.

Перед синтезом фильтра был исследован спектр выходного напряжения рассматриваемых ИП. Были выявлены гармоники, вносящие основной вклад в шум выходного сигнала. Как и предполагалось, частоты данных гармоник оказались кратны частоте работы ШИМ каждого преобразователя.

В пакете САПР Microcap были синтезированы ФНЧ с эллиптической характеристикой третьего порядка для прямоходового и обратноходового преобразователей с полосой пропускания до 100 кГц.

На рис.1 представлены спектры выходного сигнала прямоходового преобразователя на входе (рисунок 1(а)) и выходе (рисунок 1(б)) ФНЧ. Можно заметить, что гармоники, кратные 100 кГц, успешно подавляются синтезированным фильтром.



а) б)

Рис. 1 – Спектры сигналов на входе (а) и выходе (б) ФНЧ для прямоходового преобразователя

На рис. 2 показаны пульсации установившегося выходного напряжения прямоходового ИП. Максимальный размах пульсаций не превышает 10 мВ.

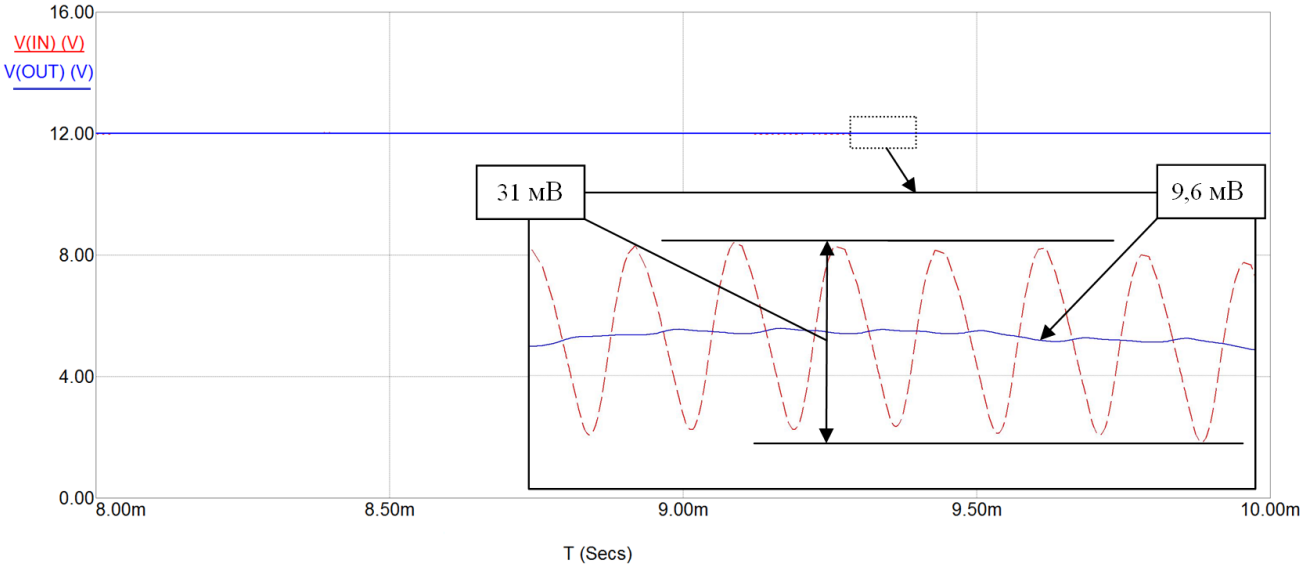
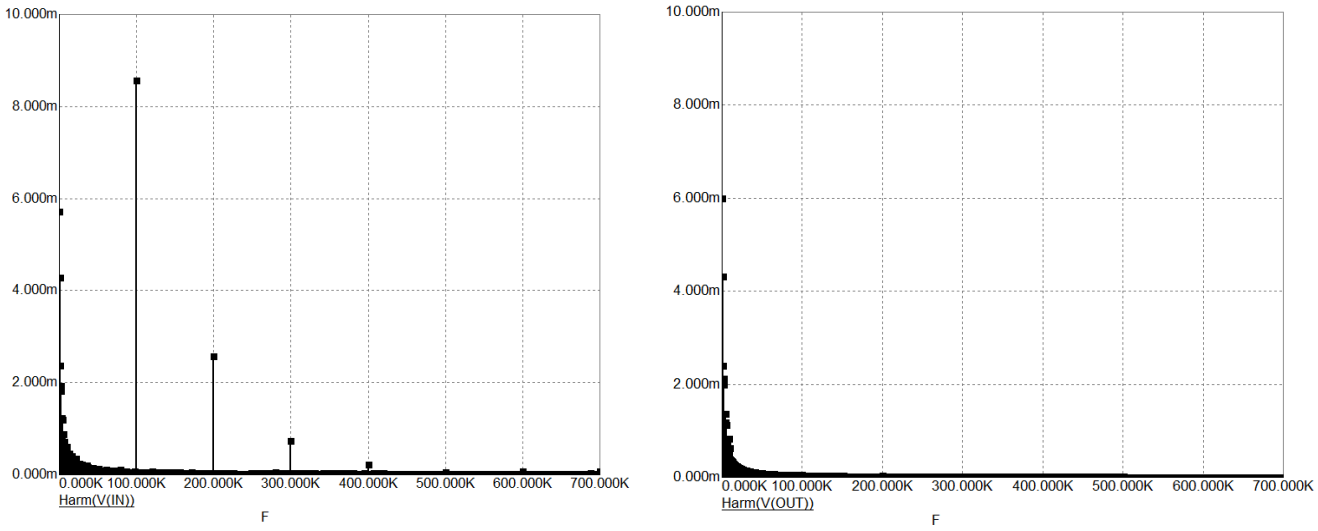


Рис. 2 – Выходное напряжение прямоходового преобразователя до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) фильтрации

На рис. 3 представлены спектры выходного сигнала обратноходового преобразователя на входе (рис. 3(а)) и выходе (рис. 3(б)) ФНЧ. Можно заметить, что гармоники, кратные 100 кГц, также как и в предыдущем случае, успешно подавляются.



а) б)

Рис. 3 – Спектры сигналов на входе (а) и выходе (б) ФНЧ для обратноходового преобразователя

На рис. 4 показаны пульсации установившегося выходного напряжения обратноходового ИП. Максимальный размах пульсаций не превышает 7 мВ.

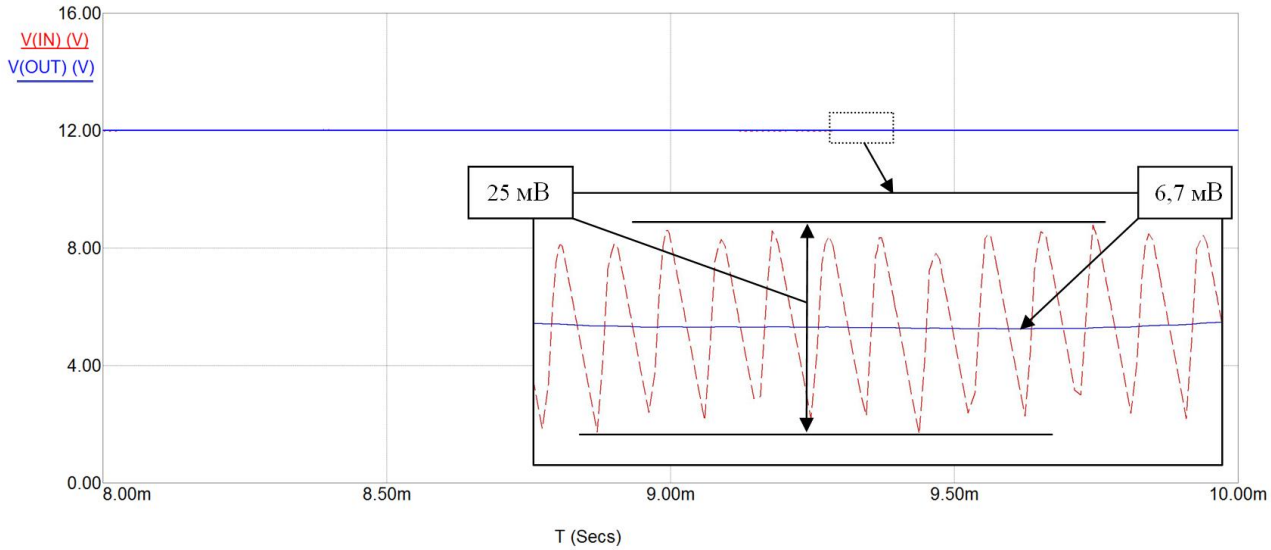


Рис. 4 – Выходное напряжение обратноходового преобразователя до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) фильтрации

По результатам моделирования, представленным на рис. 1-4, можно сделать вывод, что фильтрация выходного напряжения ИП с помощью ФНЧ с эллиптической характеристикой третьего порядка позволяет уменьшить уровень шумов преобразователей более чем в 3 раза – с 31 мВ до 10 мВ для прямоходовой схемы и с 25 мВ до 7 мВ для обратноходовой схемы. В данном моделировании не учитывалось влияние внешних паразитных наводок на схему фильтра и ИП в целом, которые всегда имеют место в реальности. Кроме этого, при практической реализации синтезированных фильтров на сосредоточенных элементах необходимо учесть наличие паразитных сопротивлений и емкостей, электромагнитных наводок, вызывающих активные и реактивные потери, а также тепловые шумы Найквиста, наличие которых может существенно снизить эффективность фильтрации.

В заключение стоит отметить, что для достижения требуемой точности измерений, проводимых с помощью РИК, необходимо обеспечить величину пульсаций выходного напряжения ИП не более 1-2 мВ. Таких значений пульсаций для импульсных ИП можно добиться при использовании фильтров с более крутой АЧХ и узкой полосой пропускания. Однако это приведет к резкому увеличению порядка фильтра, что автоматически повлечет за собой усложнение схемы.

Библиографический список

1. Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Титов В.Г. Проблемные вопросы разработки малошумящего импульсного источника питания для полигонного радиоинтерферометрического комплекса// Информационные системы и технологии. ИСТ – 2016: Материалы XXII Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2016. – С.214. – 1 CD-ROM.
2. Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Титов В.Г. Возможности применения импульсных источников питания в сверхточной измерительной аппаратуре// Информационные системы и технологии. ИСТ – 2017: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2017. – С.1180-1184. – 1 CD-ROM.
3. Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Титов В.Г. Выбор оптимального источника питания для КВЧ радиоинтерферометрического комплекса// Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Нижний Новгород: НГТУ, 2017. – С.13-15.
4. Абросимов А.А., Разинкин В.П. Эллиптические фильтры на сосредоточенных элементах// Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь: доклады ТУСУРа. – № 2 (26), часть 2. – Декабрь 2012. – С.29-31 .

N.S. Kornev [1], K.V. Mineev [1], A.V. Nazarov [1], R.R. Osmanov[1], V.G. Titov[2]

PULSATIONS DECLINE IN OUTPUT VOLTAGE OF SWITCHING POWER SUPPLY

[1)]NIIIS n.a. Yu.Ye. Sedakov, Nizhny Novgorod
[2)]NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

Opportunity of filtration output voltages of switching power supplies with different topologies applied in precision measuring equipments is investigated. An optimum filters are synthesized. The pulsations level in output voltage with synthesized filters is estimated based on the computer simulation results.

Key words: filtration, precision measuring equipment, power supply, switching power supply, elliptical filter, ripple level.

УДК 621.317.799

Н.С. Корнев, С.В. Марьевский, К.В. Минеев, А.В. Назаров

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СТЕНДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

В докладе описывается технический облик стенда, позволяющего оценивать погрешность измерений термодинамической температуры бесконтактными КВЧ радиометрами, а также проводить их метрологическую аттестацию в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: радиометр, яркостная температура, термодинамическая температура, коэффициент отражения, коэффициент поглощения.

НИИИС им. Ю.Е. Седакова в кооперации с ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ и ННГУ им. Н.И. Лобачевского разработан радиометр, позволяющий проводить бесконтактные измерения тепловых характеристик быстропротекающих газодинамических процессов [1, 2].

Важнейшим метрологическим параметром радиометра является погрешность определения термодинамической температуры. Для ее определения разработан стенд (далее РМ стенд), структурная схема которого представлена на рис. 1.

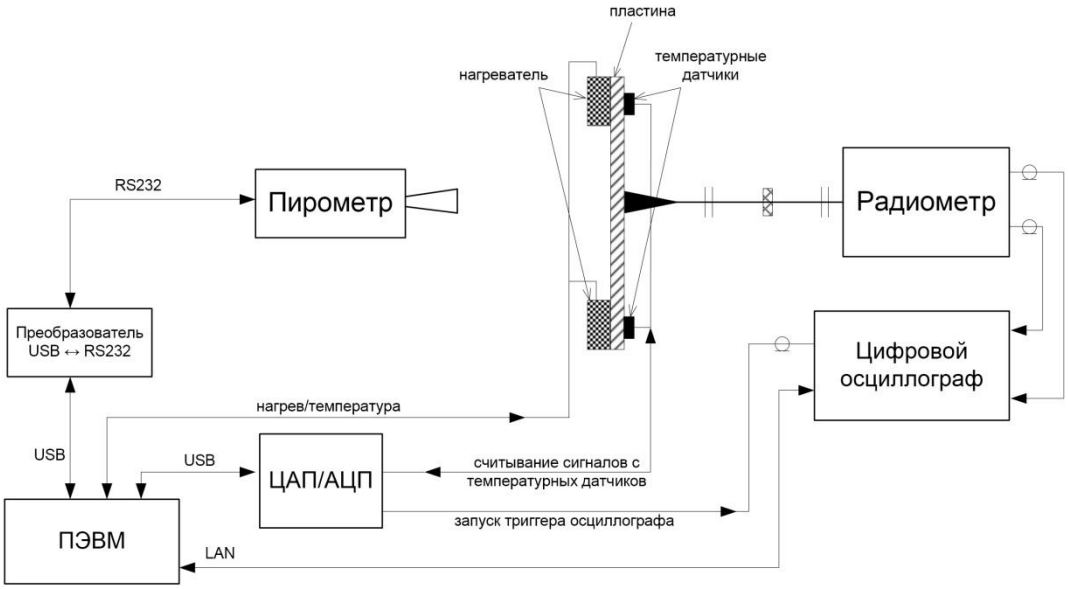


Рис.1 – Структурна схема стенда для оценки погрешности радиометрических измерений

РМ стенд представляет собой комплекс устройств, состоящий из радиометра с антенно-фидерной системой, набора пластин с различными коэффициентами поглощения, системы контроля температуры исследуемого объекта, реализованной на базе инфракрасного пирометра и температурных платиновых датчиков, плоского нагревателя, цифрового осциллографа для регистрации сигналов радиометра и персонального компьютера (ПЭВМ) для сбора, хранения, обработки и визуализации результатов измерений. Эскиз РМ стенда представлен на рис. 2.

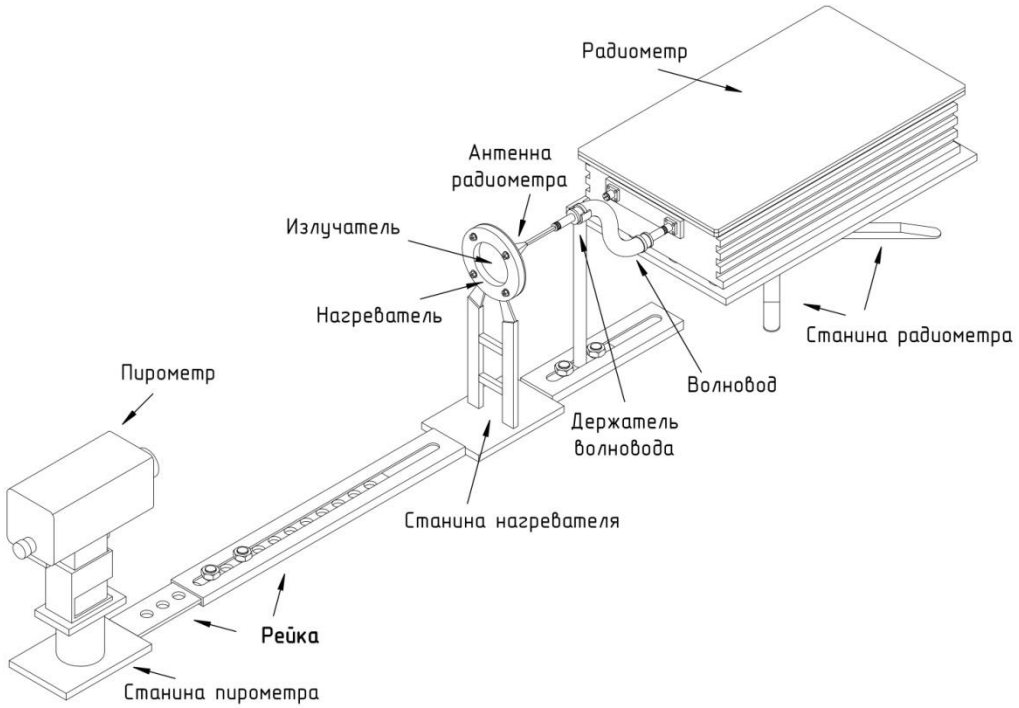


Рис. 2 – Эскиз стенда для оценки погрешности радиометрических измерений

Принцип действия РМ стенда основан на измерении радиометром термодинамической температуры пластины и сравнении полученной температуры с показаниями аттестованного средства измерения, в качестве которого выступает инфракрасный пирометр спектрального отношения семейства «Термоконт» с диаметром пятна визирования 12 мм на расстоянии в 1 м.

Пластины представляют собой плоские металлические изделия с покрытиями, имеющими различные коэффициенты поглощения, нагреваемые до температур 350-400 °С. Диаметр пластин должен быть не менее 100 мм, а толщина не менее 2 мм. Пластины могут изготавливаться из меди, латуни, керамики или прочих материалов, имеющих высокую теплопроводность. Для равномерного нагрева и снижения неравномерности градиента температуры на поверхности пластин их форма должна быть круглой.

Мощность излучения пластины можно описать формулой Планка, скорректировав ее для тела, излучающего лишь часть энергии, в ε^{-1} раз меньшую энергии, излучаемой абсолютно черным телом при той же температуре:

$$P_f = \frac{dP}{df} = \frac{\varepsilon 2\pi hfS}{\lambda^2 \left\{ \exp\left({hf}/{kT} \right) - 1 \right\}}, \quad (1)$$

где ε - коэффициент поглощения, f - частота излучения, h - постоянная Планка, S - площадь излучающей поверхности, λ - длина волны, k - постоянная Больцмана, T - термодинамическая температура излучающего тела.

Максимум спектральной плотности мощности P_f , в соответствии с законом Вина, имеет место на частоте $f_{max} \approx T \cdot 10^{11}$[Гц]. Для частот, много меньших f_{max}, когда справедливо соотношение $hf << kT$, формула Планка удовлетворительно аппроксимируется формулой Релея – Джинса. Учитывая коэффициент поглощения тела, получаем:

$$P_f = {dP}/{df} = {2\pi kTS\varepsilon}/{\lambda^2}. \quad (2)$$

В достаточно узкой полосе частот спектральную плотность мощности можно считать постоянной.

Исследование температурного распределения, возникающего в металлических пластинах при контактном нагревании по периметру плоским нагревательным элементом, производилось в пакете моделирования Elcut. Компьютерная модель представляла собой круглую пластину диаметром 100 мм и толщиной 2 мм, на которую крепился плоский нагревательный элемент в виде кольца шириной 20 мм и толщиной 4 мм. Исследуемой областью являлся круг диаметром 60 мм в центре пластины. В качестве материала пластины была выбрана электротехническая медь с теплопроводностью равной 390 Вт/(К·м). Нагревательный элемент излучал тепло с объемной плотностью тепловыделения равной $6 \cdot 10^6$ Вт/м^3. Установлено, что для модели в виде круглой медной пластины диаметром 100 мм с установленным нагревательным элементом в виде кольца шириной 20 мм, в центральной области диаметром 20 мм обеспечивается разность температур не более 0,5 К.

Температурное распределение, полученное в результате моделирования, приведено на рис. 3.

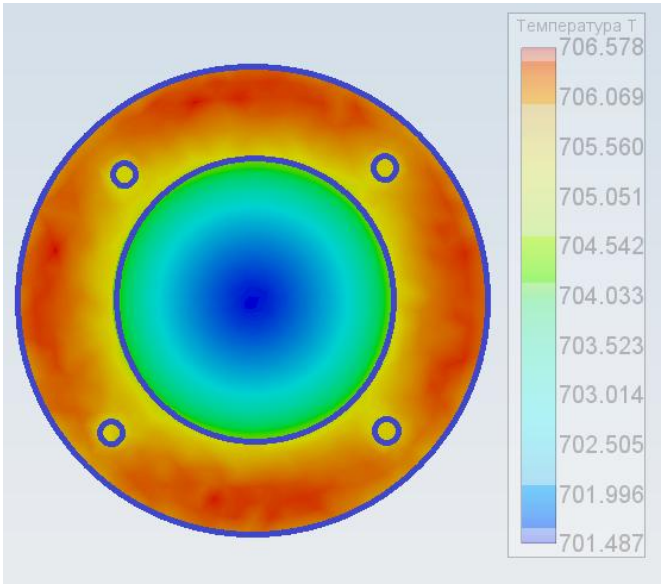


Рис. 3 – Температурное распределение для медной пластины диаметром 100 мм

С целью контроля равномерности нагрева поверхности пластины со стороны радиометра (сторона, обратная нагревателю) по периметру пластины должны размещаться температурные датчики. В качестве температурных датчиков рекомендуется использовать тонкопленочные платиновые термосопротивления Honeywell 700 Series Platinum RTDs, внешний вид которых представлен на рис. 4.

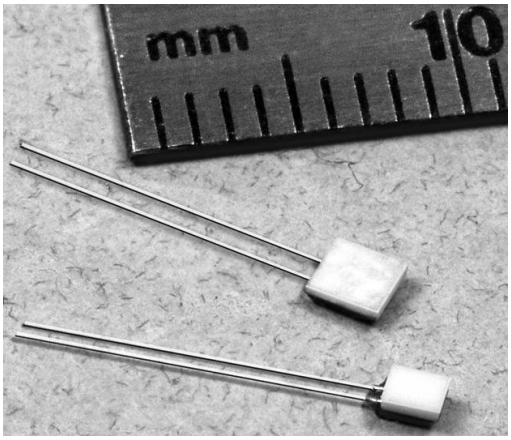


Рис. 4 – Платиновые термосопротивления Honeywell 700 Series

Зависимость сопротивления от температуры для платиновых температурных датчиков Honeywell 700 в рабочем диапазоне от минус 70 °С до плюс 500 °С является квазилинейной. Для температур выше 0 °С она описывается полиномом:

$$R(t) = R_0\left(1 + A \cdot T + B \cdot T^2\right), \quad (3)$$

где R_0 – паспортное сопротивление.

Для термосопротивлений, соответствующих стандарту Pt 3850 ppm/K, коэффициенты полинома следующие: $A = 3{,}9083 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, $B = -5{,}775 \cdot 10^{-3}$ °C^{-2}.

Для температурных датчиков, работающих по принципу зависимости сопротивления от температуры, наиболее рациональным решением является использование четырехпроводной схемы измерений, изображенной на рис. 5, где Rt - сопротивление температурного датчика, r1 - r4 – сопротивления проводов. Принцип действия четырехпроводной схемы основан на измерении напряжения не на выводах источника тока, а на выводах непосредственно сопротивления. При этом падение напряжения на сопротивлении проводов не оказывает влияния на результат измерения. Методическая погрешность в рассматриваемой схеме отсутствует, и относительная погрешность измерения сопротивления определяется только инструментальной погрешностью измерения напряжения и задания тока.

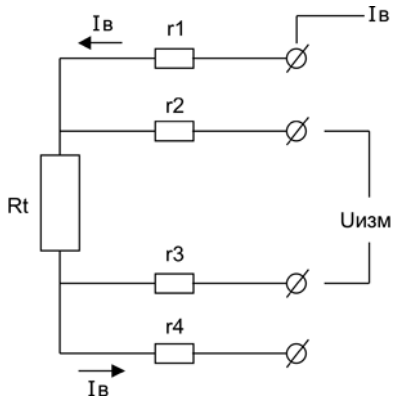


Рис. 5 – Четырехпроводная схема измерения

В качестве источника тока в четырехпроводной схеме предлагается реализовать схему с использованием симметричного преобразователя однополярного напряжения ЦАП в двуполярное на микросхемах дифференциальных усилителей INA 105 фирмы Texas Instruments с единичным усилением с последующей подачей его на токозадающие резисторы. Считывающий каскад, отвечающий за измерение напряжения на термпературном датчике, строится по принципу инструментального усилителя по стандартной схеме на трех операционных усилителях (рис. 6) [3].

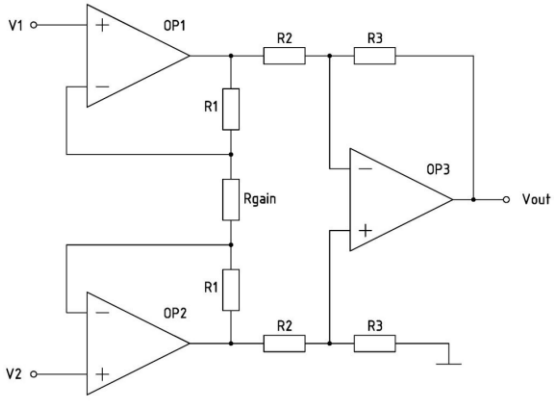


Рис. 6 – Инструментальный усилитель

Инструментальный усилитель – тип дифференциального усилителя с характеристиками, подходящими для использования в измерениях и тестирующем оборудовании. Такие характеристики включают в себя очень малое смещение постоянного тока, малый дрейф, малый шум, очень высокий коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи, очень высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала и очень высокие входные сопротивления. Результирующий коэффициент усиления инструментального усилителя определяется по формуле:

$$K_U = \left(1 + 2\frac{R_1}{R_{gain}}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2}. \quad (4)$$

В качестве операционных усилителей OP1 и OP2 предлагается использовать микросхему AD745 фирмы Analog Device. Микросхема AD745 – прецизионный малошумящий операционный усилитель с FET входом. В качестве операционного усилителя OP3 предлагается использовать микросхему прецизионного усилителя INA105.

Весь процесс оценки погрешности измерения термодинамической температуры должен происходить в автоматизированном режиме: ПЭВМ производит управление температурой пластины, задавая необходимые параметры нагревателя и осуществляя обратную связь с помощью температурных датчиков посредством взаимодействия с ними через модуль ЦАП/АЦП и считывающий каскад.

По команде пользователя ПЭВМ включает запись радиометрических данных в оперативную память цифрового осциллографа, затем ПЭВМ принимает и обрабатывает радиометрические и пирометрические данные, а также данные с температурных датчиков и строит графики зависимостей температуры пластины от времени. Кроме этого, ПЭВМ оценивает погрешность радиометрических измерений, опираясь на показания аттестованного средства измерения, в качестве которого выступает пирометр.

Библиографический список

1. Ботов Е.В., Иконников В.Н., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Седов А.А. Одновременное измерение параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов радиоинтерферометром-радиометром КВЧ диапазона// Информационные системы и технологии. ИСТ – 2017: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2017. – С.1160-1164. – 1 CD-ROM.
2. Богданов Е.Н., Иконников В.Н., Канаков В.А., Кашин А.В., Михайлов А.Л., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И., Седов А.А., Хворостин В.Н. Реализация радиометрического канала в КВЧ интерферометре для диагностики быстропротекающих газодинамических процессов // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения – Саров 2015. – С.442-446.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Москва, «МИР», 1982. – 512 с.

N.S. Kornev, S.V. Marievskiy, K.V. Mineev, A.V. Nazarov

TECHNICAL SOLUTION OF THE STAND FOR ESTIMATING ERROR OF RADIOMETRIC MEASUREMENTS

NIIIS n.a. Yu.Ye. Sedakov, Nizhny Novgorod, Russia

The article describes technical solution of the stand allowing to estimate measurement error of thermodynamic temperature by EHF radiometers, and also to carry out their metrological certification in an automated mode.

Key words: radiometer, brightness temperature, thermodynamic temperature, reflection coefficient, absorption coefficient.

УДК 621.3.049.776

Е.Н. Коршунова, В.Д. Садков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА В ПРОГРАМНОМ КОМПЛЕКСЕ ELCUT

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Построена математическая модель подгонки пленочного резистора, учитывающая ширину лазерной прорези, что важно для современных микроразмерных элементов. Предложен критерий для оценки влияния ширины прорези. Предложенная модель позволяет найти всё множество вариантов прорезей, решающих задачу подгонки.

Ключевые слова: пленочный резистор, лазерная подгонка, моделирование

Характеристики гибридных интегральных схем (ГИС) зависит от точности параметров составляющих их пассивных компонентов, особенно пленочных резистивных элементов (РЭ). Разброс в значениях параметров и нестабильность технологического процесса (ТП) не позволяют воспроизводить РЭ с высокой точностью сопротивлений, из-за чего уменьшается выход годных ГИС [1, 2]. Лазерная подгонка, повышающая точность сопротивления РЭ, является одним из методов увеличения выхода годных ГИС и регулирования ТП их изготовления [3].

Достижение нормативной точности сопротивлений при подгонке зависит как от топологии пленочного РЭ, так и от формы и структуры (непрерывный, точечный) применяемых лазерных резов. Обоснование формы, структуры и последовательности лазерных резов, координат начала и конца обработки для конкретной топологии РЭ составляет сущность подгонки и применения ее как средства регулирования ТП изготовления плат ГИС.

Решение названных проблем требует разработки гибкой методики моделирования лазерной подгонки пленочных РЭ. Традиционный подход приводит к необходимости разработки методов, алгоритмов и программ моделирования, а также специализированного языка для редактирования сценариев и визуализации результатов имитации подгонки.

В настоящей работе для решения всех перечисленных задач использован аналитический аппарат теории функций комплексного переменного (для выявления всего множества вариантов подгонки) и отечественный программный комплекс *Elcut* компании ООО «ТОР» (г. Санкт-Петербург), в котором процесс моделирования подгонки сводится к рисованию топологии РЭ и проведению над ней экспериментов по подгонке в условиях, когда контролируется не только величина сопротивления, но и структура поля потенциалов и градиентов потенциалов, плотностей токов, мгновенной мощности в любых точках и по любым линиям, чего нет в известных методиках подгонки.

Методика построения модели подгонки

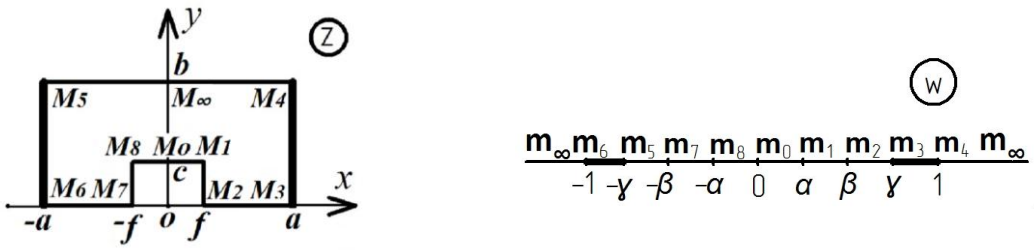
Структура РЭ с прорезью длиной c и шириной $2f$ приведена на рис. 1,а. Задача решается методом конформных отображений [4, 5]. Многоугольник $M_1M_2M_3M_4M_5M_6M_7M_8$ в плоскости z отображаем на верхнюю полуплоскость $Imw \geq 0$ с указанным на рис. 1,б соответствием точек с помощью интеграла Кристоффеля – Шварца [4-6]:

$$z = A\int_0^w \sqrt{(w^2-\alpha^2)/(w^2-\beta^2)(w^2-1^2)(w^2-\gamma^2)}\,dw, \qquad (1)$$

где A – константа отображения.

Константы α, β, γ определяются из системы уравнений

$$f/c = I_1/I_2\,,\ f/(a-f) = I_1/I_3\,,\ , \qquad (2)$$



a *b*

Рис. 1. РЭ с прорезью (*a*) и его отображение на верхнюю полуплоскость (*b*).

$$I_1 = A\int_0^{\alpha}\sqrt{(w^2-\alpha^2)/(\beta^2-w^2)(1^2-w^2)(\gamma^2-w^2)}dw,$$

$$I_2 = A\int_{\alpha}^{\beta}\sqrt{(w^2-\alpha^2)/(\beta^2-w^2)(1^2-w^2)(\gamma^2-w^2)}dw,$$

$$I_3 = A\int_{\beta}^{\gamma}\sqrt{(w^2-\alpha^2)/(w^2-\beta^2)(1^2-w^2)(\gamma^2-w^2)}dw,$$

Гиперэллиптические интегралы $I_1 - I_3$ вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей степени точности после приведения интервалов интегрирования к стандартному (-1, 1) и выделению особенностей в весовую функцию $1/(1- w^2)^{1/2}$ [7]:

$$\int_{-1}^{1}\frac{g(w)dw}{\sqrt{1-w^2}} \cong \frac{\pi}{N}\sum_{n=1}^{N} g\left(\cos\frac{2n-1}{2N}\pi\right). \qquad (3)$$

Тогда сопротивление R ПР рис. 1,а вычисляется так [4] :

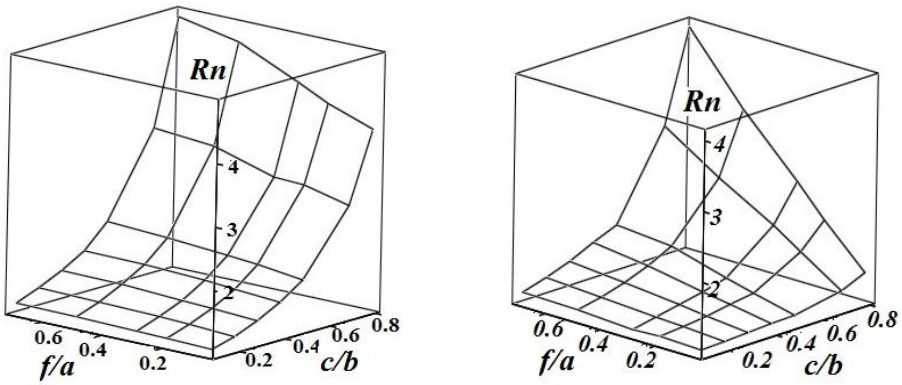
$$R_f = 2\rho K(\gamma)/K'(\gamma), \qquad (4)$$

где ρ – удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки.
Результаты расчетов нормированного сопротивления $R_n = R_f/(2\rho a/b)$ приведены на рис. 2.

В частном случае узкой прорези $f = 0$ $\alpha = 0$ и интеграл (1) приводится к виду

$$z-(a+ib) = A\int_1^{w}\frac{wdw}{\sqrt{(w^2-\beta^2)(w^2-1)(w^2-\gamma^2)}} = \frac{A}{\sqrt{1-\beta^2}}F\left(\arcsin\sqrt{\frac{w^2-1}{w^2-\gamma^2}},k\right), \qquad (5)$$

где A – константа отображения;
$F(\varphi, k)$ – эллиптический интеграл 1-го рода модуля $k = [(\gamma^2 - \beta^2)/(1 - \beta^2)]^{1/2}$.



a *b*

Рис. 2. Зависимость нормированного сопротивления резистора от параметров прорези при *f/a* = 0,005; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7 и *c/b* =0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 при *b/a* =3 (*a*) и *b/a* = 0,5 (*b*)

Из соответствия точек $z = ib$ и $w = \infty$ получаем

$$A = -\frac{a\sqrt{1-\beta^2}}{K}, \tag{6}$$

где K – полный эллиптический интеграл 1-го рода модуля k.
Обращая (5) и используя далее эллиптические функции Якоби, получаем:

$$\sqrt{\frac{w^2-1}{w^2-\gamma^2}} = sn\left[\left(1+\frac{ib-z}{a}\right)K, k\right]. \tag{7}$$

Из соответствия точек $z = a$ и $w = \gamma$ следует

$$b/a = K'/K\,, \tag{8}$$

где K' - полный эллиптический интеграл 1-го рода дополнительного модуля $k' = (1 - k^2)^{1/2}$.
Из соответствия точек $z = ic$ и $w = 0$, $z = 0$ и $w = \beta$ с учетом (8) получаем:

$$\gamma = dn\left[(1-c/b)K', k'\right],\ \beta = \gamma sn\left[(c/b)K', k'\right], \tag{9}$$

Тогда для (4) получаем окончательно

$$R_0 = 2\rho\frac{K\{dn[(1-c/b)K', k']\}}{K'\{dn[(1-c/b)K', k']\}}. \tag{10}$$

Степень влияния толщины прорези $2f$ для произвольного прямоугольного резистора можно оценить по соотношению, полученному из (4) и (10):

$$\frac{R_f}{R_0} = \frac{K(\gamma)}{K'(\gamma)}\frac{K'\{dn[(1-c/b)K', k']\}}{K\{dn[(1-c/b)K', k']\}},$$

где R_f и R_0 - величины сопротивлений, вычисленные с учетом и без учета ширины прорези; γ - определяется из системы уравнений (2) при заданных размерах a, b и c.

Соотношение $(R_f/R_0 -1)\cdot 100$ показывает в процентах изменение сопротивления с прорезью длиной c за счет её ширины. Результаты таких расчетов при b/a = 0,3 для 0,5% (кривая 1) и 0,1% (кривая 2) приведены на рис. 3.

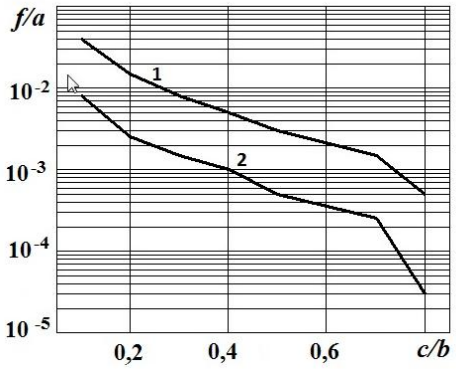


Рис. 3.Влияние нормированной толщины прорези *f/a* на изменение сопротивления в процентах в зависимости от нормированной длины прорези *c/b*: 0,1 % (1) и 0,5 % (2)

При конечной толщине лазерной прорези задача подгонки имеет множество решений, которое легко выявляется. Для этого из соотношения (4) по заданному отношению $R/(2\rho)$ находится γ. Всё множество вариантов прорезей получается при выборе параметров α и β из условия $0 \le \alpha < \beta < \gamma$.

Заключение

Методом конформных отображений построена математическая модель подгонки прямоугольного микроразмерного пленочного резистора с учетом ширины лазерной прорези. Получено соотношение, позволяющее оценить степень влияния ширины прорези и определить необходимость её учета в конкретном случае. Предложенная модель позволяет найти всё множество вариантов прорезей, обеспечивающих процесс подгонки. Работоспособность модели подтверждена расчетами в программном комплексе *Elcut* [8] и экспериментами на образцах резисторов габаритов 0402 и 0201.

Библиографический список

1. Лугин А.Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов: монография. - Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. – 287 с.
2. Седаков А.Ю. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления/ А.Ю. Седаков, В.К. Смолин. - М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
3. Кондрашов В.В. Задача автоматизации процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1. Вып. 2, с. 207 - 214.
4. Ямпурин Н.П., Широков Л.В., Садков В.Д., Потехин В.А. Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. - Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Гл. ред. физ. – мат. лит., 1973. – 749 с.
6. Лаврик В.И. Конформные отображения физико-топологических моделей. / В.И. Лаврик, В.П. Фильчакова, А.А. Яшин. – Киев: Наукова думка, 1990. – 376 с.
7. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.
8. www.tor.ru

E.N. Korshunova, V.D. Sadkov

PROCESS MODELING OF LASER TRIMMING OF RESISTANCE OF THE FILM RESISTOR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The mathematical model of adjustment of the film resistor is constructed. The mathematical model considers the width of a laser gash that is important for microsized elements. The criterion for a gash width impact assessment is offered. The offered model allows to find all the solutions of the problem.

Keywords: film resistor, laser trimming, modeling

УДК 621.396

А.С. Лаврентьева, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РЕФЛЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Получена зависимость изменения ДН в зависимости от смещения облучателя антенны. Рассматривается метод светящихся точек для расчета диаграмм направленности осесимметричной параболической антенны. Проведено сравнение результатов расчетов по методу светящихся точек и по методу моментов.

Ключевые слова: диаграмма направленности, метод светящихся точек, рефлекторные антенны.

Настоящая работа посвящена расчету диаграмм направленности (ДН) рефлекторных антенн. Существуют различные методы расчета диаграмм направленности зеркальных антенн: апертурный метод, метод моментов, метод светящихся точек [1].

Реализация строгих методов расчета диаграммы направленности связана с решением задачи рассеяния. Решение задачи рассеяния сопряжено с большими вычислительными затратами. В некоторых случаях целесообразно для анализа полей рассеяния на объектах сложной пространственной конфигурации применять различные упрощения и допущения.

Некоторые из методов базируется на принципе Гюйгенса–Френеля, согласно которому каждая точка волнового фронта рассеянного поля рассматривается как источник вторичных волн. К этому типу моделей относится модель локальных источников рассеяния [2] и метод светящихся точек.

В настоящей работе исследуется метод светящихся точек. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами расчета диаграмм направленности:

1) простота в реализации
2) метод легко распараллеливается для ускорения работы алгоритма
3) позволяет легко учитывать деформацию рефлектора антенн

Суть метода светящихся точек состоит в том, что каждая точка антенны представляется как элементарный источник сферических волн.

Формула для расчета напряженности электрического поля в точке наблюдения P

$$E_p = \sum_{i=0}^{N} E_i \exp(-j(\vec{kb_i} + \vec{ka_i})) \qquad (1)$$

где E_i- амплитуда напряженности электрического поля; $\vec{a_i}$ - расстояние от точки на антенне до точки наблюдения P; $\vec{b_i}$ – расстояние от облучателя до точки на антенне; $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; N – число точек на антенне.

На поверхности антенны выбирается N точек таким образом, чтобы минимальное расстояние между двумя соседними точками было меньше половины длины волны. Расстояние от точки наблюдения P до точки на антенне должно быть много больше длины волны и размеров самой антенны. Считаем, что точка P находится в дальней зоне.

Границы дальней зоны определяются соотношением размеров антенны и длины волны:

$$r \geq 2\frac{D^2}{\lambda} \qquad (2)$$

где r – расстояние от фазового центра антенны; D – диаметр раскрыва зеркала; λ - длина волны.

Расчет диаграммы направленности проводился для осесимметричной параболической антенны с параметрами: диаметр раскрыва 1 м, фокусное расстояние f = 0.5 м (при этом полный угол раскрыва зеркала равен $2\psi_0 = 106{,}26°$) излучатель находится в фокусе, длина волны 0.1 м.

Диаграмма направленности вычислялась в диапазоне от $-30°$ до $30°$ по углу места и по азимутальному углу. Расчеты проводились с шагом в 2° по θ и φ (где θ и φ – азимутальный угол и угол места соответственно).

Форма рефлектора антенны аппроксимировалась треугольниками. Вершины треугольников расположены в точках, расстояние между которыми не превышает 0,025 м.

Сравнение диаграммы направленности, полученной методом светящихся точек, проведено с диаграммой направленности, полученной с использованием программы MMANA. Расчет диаграмм направленности в программе MMANA базируется на методе моментов.

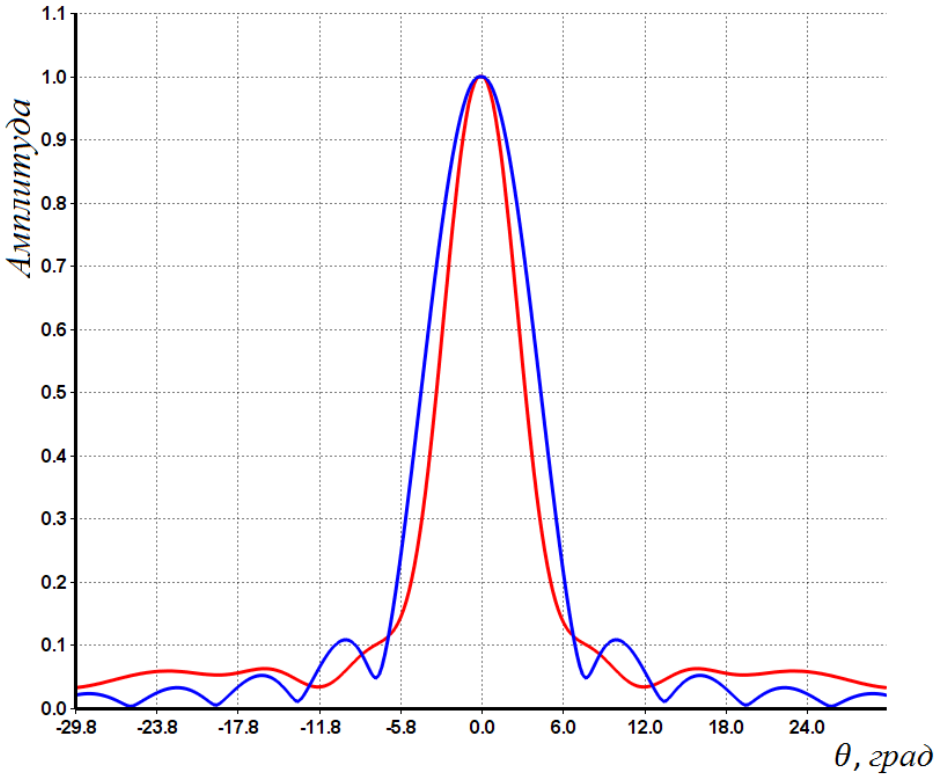


Рис.1. Зависимость диаграммы направленности от азимутального угла при угле места равном 0˚. (где синим цветом обозначена ДН, полученная методом светящихся точек, красным – с использованием программы MMANA)

На рис.1 изображены диаграммы направленности, полученные методом светящихся точек и с использованием программы MMANA.

При сравнении описанных выше способов получения ДН, была получена максимальная ошибка равная 11%.

Рассмотрено влияние смещения облучателя перпендикулярно фокальной оси (по оси OY) на смещение главного лепестка диаграммы направленности. В исследовании использовалась антенна с такими же параметрами, шаг по φ равен 10°, шаг по $\theta = 0.57°$. При исследовании облучатель смещался на интервале от -0.25 м до 0.25 м с шагом 0.05 м.

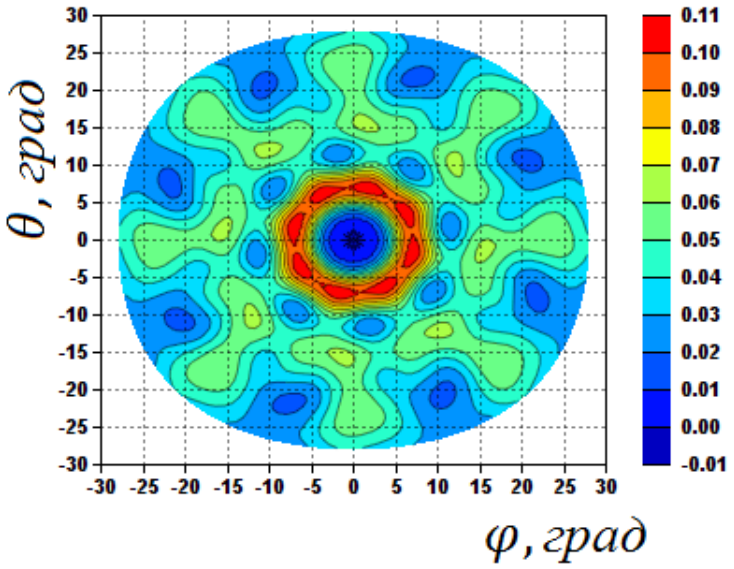


Рис.2. Модуль разности между ДН полученной методом светящихся точек и ДН полученной с использованием программы MMANA

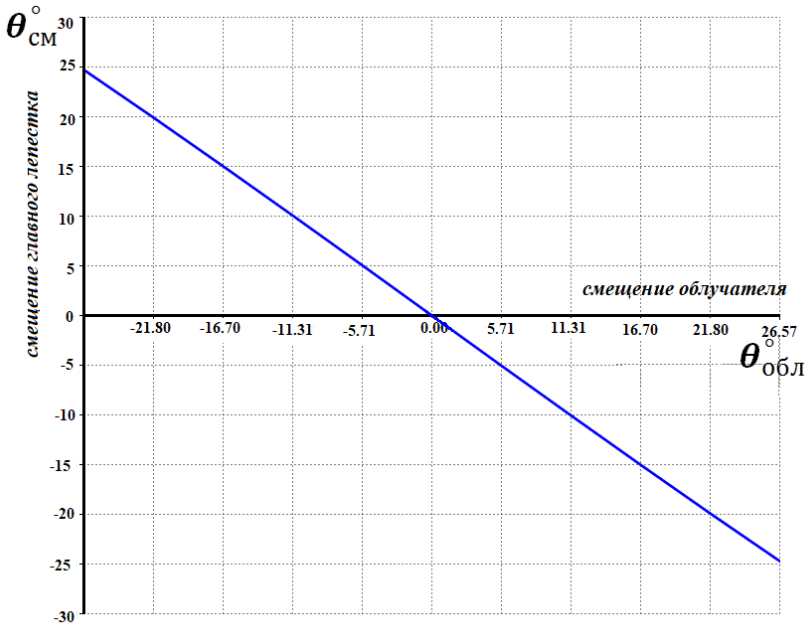


Рис.3. График зависимости смещения главного максимума ДН, $\theta_{см}$, от смещения облучателя, $\theta_{обл}$, из фокуса перпендикулярно фокальной оси

При смещении облучателя в фокальной плоскости, лучи, отраженные в соответствующих точках в верхней и нижней половине зеркала достигают поверхности раскрыва неодновременно – поле в раскрыве зеркала перестает быть синфазным.

Из рисунка 3 видно, что угол смещения максимального излучения диаграммы направленности пропорционален углу смещения облучателя. Также из графика видно, что при смещении облучателя из фокуса перпендикулярно фокальной оси более чем на 5,71° (что соответствует смещению облучателя вдоль оси OY на 5 см) происходит смещение главного лепестка диаграммы направленности на угол в 5°.

Коэффициент корреляции равен -0.99975.

Также рассматривалось влияние смещения облучателя вдоль фокальной оси (по оси OZ) на ширину главного лепестка диаграммы направленности. В исследовании использовалась антенна с такими же параметрами, что и в предыдущем случае. Шаг по φ равен $0.01°$, шаг по θ равен $0.57°$. При исследовании облучатель смещался вдоль фокальной оси в интервале от -0.1 м до 0.1 м с шагом в 0.02 м

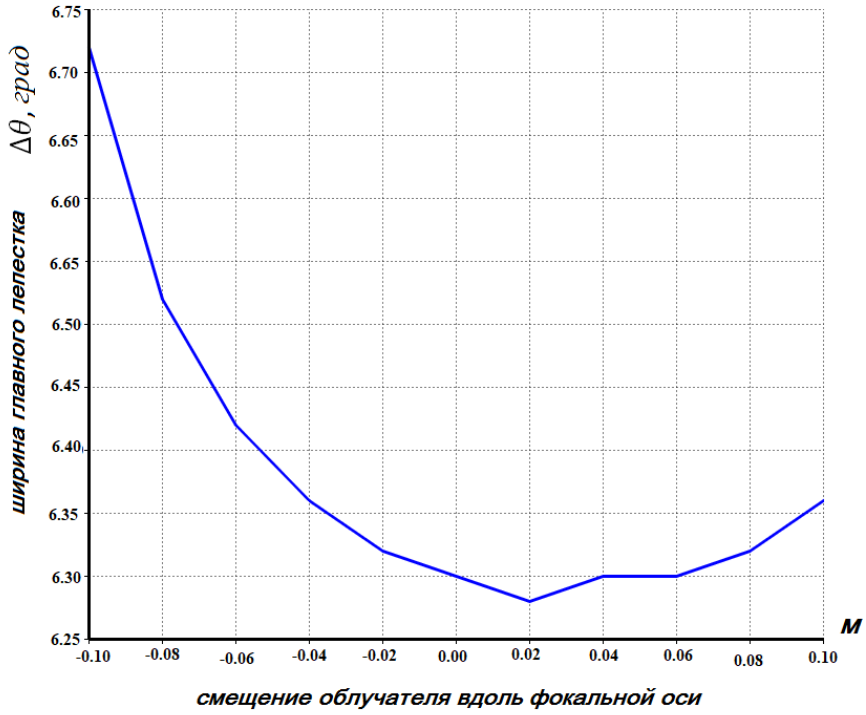


Рис.4. График зависимости ширины главного лепестка от смещения облучателя из фокуса вдоль фокальной оси

Из графика на рисунке 4 видно, что смещение облучателя из фокуса вдоль фокальной оси к зеркалу более чем 10 см для данной антенн приводит к расширению ширины главного лепестка больше чем на $0.4°$.

Исследования показали работоспособность метода светящихся точек для расчета диаграмм направленности антенн.

Библиографический список

1. Драбкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов – М.: "Сов. радио", 1974. – 536 с.
2. Разевиг, В.В. Комплекс математических моделей и программ для исследования и разработки радиоголографических систем малой дальности.: дис. канд.тех.наук / В.В. Разевиг – М., 2015. – 127 с.

A.S. Lavrenteva, V.R. Fidelman, Y.E. Chumankin

RESEARCH OF DEPENDENCE OF DIRECTIONAL PATTERN PARAMETERS AS A FUNCTION OF THE DISPLACEMENT OF THE ANTENNA FEEDER

Dependence of the changes in directional pattern as a function of the displacement of the antenna feeder is obtained. The method of luminous points for the calculation of the directivity pattern of an axisymmetric parabolic antenna is considered. The results of calculations by the method of luminous points and by the method of moments are compared.

Key words: antenna directional pattern, method of luminous points, reflex antennas.

УДК 621.396

Е.А. Маврычев[1], А.Г. Флаксман[1,2], А.В. Елохин[2]

РАЗДЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХЭТАПНОЙ РЕЛЕЙНОЙ MIMO СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ

[1)] Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева
[2)] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В настоящей статье рассматривается проблема оптимизациипередачи и приема сигналов в двухэтапной MIMOсистеме с релейной ретрансляционной станцией по критерию минимума среднеквадратической ошибки (СКО). Релейная станция выполняет линейные преобразования входных сигналов, их усиление и передачу. Предложена раздельная стратегия выбора матриц линейного прекодирования и декодирования, которая разделяет общую оптимизационную задачу на набор последовательно решаемых подзадач для каждого из двух этапов передачи и приема сигналов. Кроме того, рассматривается раздельная независимая оптимизация без использования знания статистик второго порядка передаваемых символов. Использование раздельной оптимизации обеспечивает уменьшение числа вспомогательных линий для передачи канальной информации по сравнению с совместной оптимизацией. Результаты моделирования показывают высокую эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: релейнаяMIMO система, среднеквадратическая ошибка, прекодирование и декодирование, вероятность битовой ошибки

Введение

Технология связи с использованием релейных ретрансляционных станций для передачи данных по беспроводным каналам в настоящее время является быстро развивающейся[1–4] и предполагается ее широкое использование в сетях 5G. Релейные станции оснащаются передающими и приемными антенными решетками (MIMO системы) и выполняют обработку сигналов - прекодирование и декодирование. Известно, что линейные прекодеры и декодеры позволяют достичь оптимальных характеристик релейного канала на фоне гауссова шума [5]. Подход, в котором используется только линейное преобразование сигналов в релейной станции, получил название "усиление и передача" (amplify-and-forward).

Общим критерием для проектирования приемопередатчика в MIMO системах связи является минимум СКО [6–7]. Используются разные целевые функции от матрицы СКО, например, арифметическая и детерминантная функции. Другие критерии, такие как максимум отношения сигнал к шуму (ОСШ), минимум вероятности битовой ошибки (BER) и максимальная пропускная способность, связаны с критерием минимума СКО [7].Совместная оптимизация прекодера и декодера для обычной MIMO системы зависит от того выпуклой или вогнутой является целевая функция и приводит к диагональной структуре для вогнутой целевой функции СКО. Такая структура представляет собой совокупность параллельных независимых подканалов, которые формируются на основе собственных векторов канальной матрицы и, поэтому, называются собственными. Если целевая функция СКО является выпуклой, то диагональная структура также оптимальна, но требуется дополнительное унитарное предварительное кодирование [6–7].

Двухэтапная релейная MIMO система (источник – релейная станция – пункт назначения) рассмотрена в [1, 3, 4], где предложены различные методы поиска матриц прекодирования и декодирования, а также матрицы распределения мощности по собственным подканалам. Приближенное решение в замкнутой форме для совместной оптимизации получено в [1]. Итеративное квазиоптимальное решение для совместной оптимизации двухэтапной системы разработано в [3] и альтернативный метод предложен в [4]. Совместная стратегия оптимизации требует знания всей канальной информации (канальных матриц) на оптимизаторе. Поэтому ее практическая реализация затруднена, так как необходимо собрать всю канальную информацию и передать ее на оптимизатор по вспомогательным линиям связи. Упрощение

оптимизации прекодеров и декодеров на основе раздельной оптимизации рассмотрено в [8] для многоэтапной релейной MIMO системы.

В настоящей работе предложен метод раздельной оптимизации матриц прекодирования и декодирования для двухэтапной релейной MIMOсистемы отдельно для каждого этапа передачи. Рассматривается возможность дальнейшего упрощения системы за счет применения не только раздельной, но и независимой оптимизации для каждого этапа передачи, при которой не используется знание корреляционной матрицы передаваемых символов на втором этапе. Основное преимущество предлагаемого подхода – значительное уменьшение числа вспомогательных линий связи.

Модель двухэтапной релейной MIMOсистемы

Двухэтапная релейная MIMO система связи состоит из источника, пункта назначения и релейной станции (рис.1). Первый этап – передача от источника к релейной станции, а второй – от релейной станции к пункту назначения. Источник, релейная станция и пункт назначения имеют MIMO конфигурацию, то есть содержат антенные решетки (АР).Пусть M_k и N_k– число передающих и приемных антенн на k-ом этапе передачи (k=1,2).Пространственные каналы являются частотно-неселективными, не зависят от времени и описываются комплексными канальными матрицами$\mathbf{H}_1$ размерности $N_1\times M_1$ и $\mathbf{H}_2$ размерности $N_2\times M_2$. Схема релейной MIMO системы показана на рис. 1.

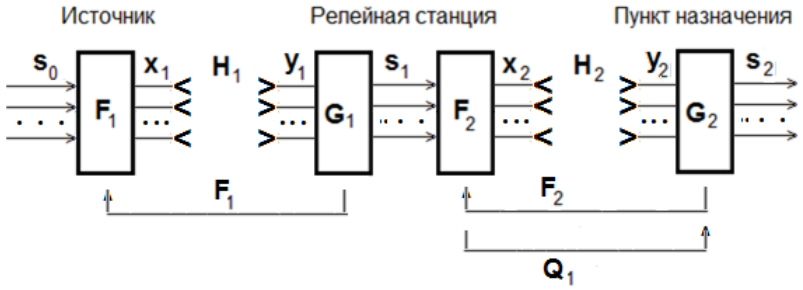


Рис. 1.

Источник передает Lразмерный вектор $\mathbf{s}_0$символов данных, где $L\le min\{L_1,\ L_2\}$, L_k=rank ($\mathbf{H}_k$), k=1,2. Корреляционная матрица символа данных $\mathbf{Q}_0 = E\{\mathbf{s}_0\mathbf{s}_0^H\} = \sigma_s^2\mathbf{I}_L$, где $E\{.\}$– статистическое среднее, $(.)^H$– эрмитово сопряжение, σ_s^2 – дисперсия символов, $\mathbf{I}_L$–тождественная матрица размерности $L\times L$.Далее вектор $\mathbf{s}_0$ преобразуется в вектор передаваемых сигналов

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1\mathbf{s}_0, \qquad (1)$$

где $\mathbf{F}_1$ – $M_1\times L$ размерная матрица прекодирования на источнике.

Вектор $\mathbf{y}_1$ принятых сигналов на релейной станции размерности N_1 равен

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_1, \qquad (2)$$

где $\mathbf{n}_1$– вектор собственных шумов приемника релейной станции с корреляционной матрицей $\mathbf{R}_1 = E\{\mathbf{n}_1\mathbf{n}_1^H\} = \mathbf{I}_{N_1}$. С помощью матрицы декодирования $\mathbf{G}_1$размерности $L\times N_1$вектор $\mathbf{y}_1$преобразуется в вектор $\mathbf{s}_1$ символов данных $\mathbf{s}_1 = \mathbf{G}_1\mathbf{y}_1$. Имеем, что

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{G}_1\mathbf{H}_1\mathbf{F}_1\mathbf{s}_0 + \mathbf{G}_1\mathbf{n}_1. \qquad (3)$$

Корреляционная матрица $\mathbf{Q}_1 = E\{\mathbf{s}_1\mathbf{s}_1^H\}$ декодированных символовравна

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{G}_1\mathbf{H}_1\mathbf{F}_1\mathbf{Q}_0\mathbf{F}_1^H\mathbf{H}_1^H\mathbf{G}_1^H + \mathbf{G}_1\mathbf{G}_1^H. \qquad (4)$$

На втором этапе передачи между релейной станцией и пунктом назначения преобразования сигналов являются аналогичными первому этапу и описываются формулами (1–4), если в них заменить индексы «0» и «1» на индексы «1» и «2», соответственно.

Раздельная оптимизация релейной MIMO системы

В качестве характеристики эффективности релейной MIMO системы используется матрица $\mathbf{\Sigma}_{total} = E\left\{(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_0)(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_0)^H\right\}$ полной СКО между вектором $\mathbf{s}_0$символов данных на источнике и вектором $\mathbf{s}_2$ символов данных в пункте назначения. Другие характеристики, такие как, например, BER и шенноновская пропускная способность, являются функциями от матрицы СКО [7].Оптимизация характеристик системы заключается в выборе матриц прекодирования ($\mathbf{F}_k$) и декодирования ($\mathbf{G}_k$) на основе минимизации некоторой целевой функции $q(\mathbf{\Sigma}_{total})$ от матрицы СКОпри условии заданных мощностей источника (P_1) и релейной станции (P_2). Это условие записывается в виде $Tr\left\{\mathbf{F}_k\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{F}_k^H\right\} = P_k$, где$Tr(.)$ –след матрицы, k=1,2. Строго говоря, оптимизация должна производиться совместно для двух этапов передачи.

Метод раздельной оптимизации основан на минимизации СКО отдельно для каждого этапа передачи. Пусть $\mathbf{\Sigma}_k = E\left\{(\mathbf{s}_k - \mathbf{s}_{k-1})(\mathbf{s}_k - \mathbf{s}_{k-1})^H\right\}$ – матрицы СКО для линий источник $\rightarrow$ релейная станция (k=1) и релейная станция $\rightarrow$ пункт назначения (k=2). Тогда оптимизация k-го этапа передачи заключается в минимизации целевой функции $q(\mathbf{\Sigma}_k)$ от матрицы СКОΣ_k, то есть представляет собой решение задачи вида:

$$\min_{\mathbf{F}_k,\mathbf{G}_k} q(\mathbf{\Sigma}_k), \quad \text{при условии} \quad Tr\left\{\mathbf{F}_k\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{F}_k^H\right\} = P_k \quad (k = 1,2). \tag{5}$$

Сингулярное разложение канальной матрицы $\mathbf{H}_k$ ранга L_k имеет вид [9]

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{U}_k\Lambda_k\mathbf{V}_k^H, \tag{6}$$

где $\mathbf{U}_k$ и $\mathbf{V}_k$ – матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов размерности $N_k \times L_k$ и $M_k \times L_k$, соответственно, $\Lambda_k = diag\{\lambda_{1,k}, \lambda_{2,k},\ldots,\lambda_{1,Lk}\}$ – диагональная матрица расположенных в убывающем порядке сингулярных чисел.

Оптимизация k-го этапа передачи является известной задачей выбора матриц прекодирования ($\mathbf{F}_k$) и декодирования ($\mathbf{G}_k$) в обычной MIMO системе. Минимизацию целевой функции $q(\mathbf{\Sigma}_k)$ можно производить последовательно: сначала найти матрицу $\mathbf{G}_k$, а затем – матрицу $\mathbf{F}_k$. В результате получим, что матрица $\mathbf{G}_k$ равна [6, 7]

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{F}_k^H\mathbf{H}_k^H\left(\mathbf{H}_k\mathbf{F}_k\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{F}_k^H\mathbf{H}_k^H + \mathbf{I}_k\right)^{-1}. \tag{7}$$

Подставляя (7) в (5), для матрицы СКО получим

$$\Sigma_k(\mathbf{F}_k) = \left(\mathbf{F}_k^H\mathbf{H}_k^H\mathbf{H}_k\mathbf{F}_k + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1}\right)^{-1}. \tag{8}$$

Задача минимизации целевой функции $q(\mathbf{\Sigma}_k)$ по отношению к матрице $\mathbf{F}_k$ имеет вид:

$$\min_{\mathbf{F}_k} q(\Sigma_k(\mathbf{F}_k)), \quad \text{при условии} \quad Tr\left\{\mathbf{F}_k\mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{F}_k^H\right\} = P_k \quad (k = 1,2). \tag{9}$$

Решение проблемы (9) зависит от того, вогнутой или выпуклой является целевая функция $q(\mathbf{\Sigma}_k)$. Для вогнутой целевой функции будем иметь [6, 7]

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{V}_k\mathbf{\Phi}_k. \tag{10}$$

где $\mathbf{\Phi}_k = diag\{\phi_{k,1}, \phi_{k,2},\ldots,\phi_{k,L}\}$ – диагональная матрица распределения мощности на источнике (k=1) и релейной станции (k=2).

Учитывая (10) для матрицы декодирования в (7) получим

$$\mathbf{G}_k = \left(\mathbf{\Lambda}_k^2\mathbf{\Phi}_k^2 + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1}\right)^{-1}\mathbf{\Phi}_k\mathbf{\Lambda}_k\mathbf{U}_k^H. \tag{11}$$

Подставляя решения (10) и (11) для матриц $\mathbf{F}_k$ и $\mathbf{G}_k$ в (4), получим, что сигнальнаякорреляционная матрица при вогнутой целевой функции равна

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_{k-1}\Lambda_k^2\Phi_k^2\left(\Lambda_k^2\Phi_k^2 + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1}\right)^{-1}, \quad (k = 1,2). \tag{12}$$

Решение проблемы (9) для выпуклой целевой функции имеет вид [6, 7]

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{V}_k \Phi_k \mathbf{U}_0 , \tag{13}$$

где $\mathbf{U}_0$–унитарная матрица поворота размерности $L \times L$, например, матрица, составленная из коэффициентов дискретного преобразования Фурье: $(\mathbf{U}_0)_{pq} = L^{-0.5} \exp[\, j(2\pi/L)(p-1)(q-1)]$.

Теперь матрица декодирования и сигнальная корреляционная матрица будут равны

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_k &= \left(\mathbf{U}_0^H \Lambda_k^2 \Phi_k^2 \mathbf{U}_0 + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1} \right)^{-1} \mathbf{U}_0^H \Phi_k \Lambda_k \mathbf{U}_k^H , \\ \mathbf{Q}_k &= \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{U}_0^H \Lambda_k^2 \Phi_k^2 \mathbf{U}_0 \left(\mathbf{U}_0^H \Lambda_k^2 \Phi_k^2 \mathbf{U}_0 + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1} \right)^{-1} . \end{aligned} \tag{14}$$

Покажем, что сигнальную корреляционную матрицу на релейной станции можно представить в виде $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{U}_0 \mathbf{\Theta}_1 \mathbf{U}_0^H$, где $\mathbf{\Theta}_1$– диагональная матрица с действительными числами. Корреляционную матрицу символов данных на источнике, равную $\mathbf{Q}_0 = \sigma_s^2 \mathbf{I}_L$, можно записать в виде $\mathbf{Q}_0 = \mathbf{U}_0 \Theta_0 \mathbf{U}_0^H$, где $\mathbf{\Theta}_0 = \mathbf{Q}_0$.Далее в результате последовательных преобразований получим:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_0 \mathbf{U}_0^H \Lambda_1^2 \Phi_1^2 \mathbf{U}_0 \left(\mathbf{U}_0^H \Lambda_1^2 \Phi_1^2 \mathbf{U}_0 + (\mathbf{U}_0^H \mathbf{Q}_0 \mathbf{U}_0)^{-1} \right)^{-1} = \mathbf{U}_0^H \mathbf{\Theta}_0 \Lambda_1^2 \Phi_1^2 \left(\Lambda_1^2 \Phi_1^2 + \mathbf{\Theta}_0^{-1} \right)^{-1} \mathbf{U}_0 , \tag{15}$$

Из (15) видно, что матрица $\mathbf{\Theta}_1$ является диагональной и равна $\mathbf{\Theta}_1 = \mathbf{\Theta}_0 \mathbf{\Lambda}_1^2 \mathbf{\Phi}_1^2 \left(\mathbf{\Lambda}_1^2 \mathbf{\Phi}_1^2 + \mathbf{\Theta}_0^{-1} \right)^{-1}$.

Выражения (13–15) для матриц прекодирования ($\mathbf{F}_k$) и декодирования ($\mathbf{G}_k$), а также для сигнальной корреляционной матрицы ($\mathbf{Q}_k$) обобщают случаи вогнутых и выпуклых целевых функций$q(\mathbf{\Sigma}_k)$. Для вогнутой функции матрица$\mathbf{U}_0$ равна тождественной матрице ($\mathbf{U}_0$=$\mathbf{I}_L$), а для выпуклой функции матрица $\mathbf{U}_0$ является унитарной матрицей поворота.Отметим также, что матрицы$\mathbf{F}_k$, $\mathbf{G}_k$ и $\mathbf{Q}_k$ являются диагональными. Поэтому, релейную MIMO систему можно представить в виде параллельного набора независимых одноканальных систем (подканалов) при вогнутой целевой функции СКО. Если целевая функция СКО является выпуклой, то диагональная структура также оптимальна, но требуется дополнительное унитарное предварительное кодирование с помощью матрицы $\mathbf{U}_0$поворота.

Теперь необходимо найти матрицы распределения мощности $\mathbf{\Phi}_k$ (k=1,2) на источнике и релейной станции.Используя (13–15), матрицу (8) СКОприведем к виду:

$$\Sigma_k(\Phi_k) = \mathbf{U}_0^H (\Lambda_k^2 \Phi_k^2 + \Theta_{k-1}^{-1})^{-1} \mathbf{U}_0 \quad (k = 1,2) . \tag{16}$$

Оптимальные матрицы $\mathbf{\Phi}_k$ (k=1,2) находятся из уравнения

$$\min_{\Phi_k} q((\Lambda_k^2 \Phi_k^2 + \Theta_{k-1}^{-1})^{-1}), \quad \text{при условии} \quad Tr\left\{ \Phi_k^2 \Theta_{k-1} \right\} = P_k \quad (k = 1,2) . \tag{17}$$

Выражение (17) представляет собой проблему выпуклой оптимизации. Заметим, что для решения (17) требуется знание корреляционных матриц $\mathbf{Q}_0$ и $\mathbf{Q}_1$. Матрица $\mathbf{Q}_0$ пропорциональна тождественной матрице, а матрица $\mathbf{Q}_1$ зависит от матрицы $\mathbf{\Phi}_1$ распределения мощности на предыдущем этапе передачи (то есть на источнике). Следовательно, оптимизация двух этапов передачи должна выполняться последовательно.

Обеспечение минимума средней BER основано на минимизации максимальной СКО, то есть $q(\Sigma_k) = \max(\Sigma_k)$ [6]. Такая целевая функция является выпуклой. Задача оптимизации матрицы $\mathbf{\Phi}_k$ имеет вид:

$$\min_{\Phi_k} Tr\{\Lambda_k^2 \Phi_k^2 + \Theta_{k-1}^{-1})^{-1}\}, \quad \text{при условии} \quad Tr\left\{ \Phi_k^2 \Theta_{k-1} \right\} = P_k \quad (k = 1,2) . \tag{18}$$

Решение оптимизационной задачи (18) записывается в виде [6, 7]

$$\phi_{k,m} = \left(\frac{P_k + \sum_{i=1}^{L} \lambda_{k,i}^{-2}}{\sqrt{q_{k-1,m}} \lambda_{k,m} \sum_{i=1}^{L} \frac{\sqrt{q_{k-1,i}}}{\lambda_{k,i}}} - \frac{1}{q_{k-1,m} \lambda_{k,m}^2} \right)^{+} \quad (k = 1,2) , \tag{19}$$

где$\mathbf{\Theta}_k$=$diag\{q_{k\text{-}1,1}, q_{k\text{-}1,2}, \ldots, q_{k\text{-}1,L}\}$, $(a)^+$=$max\{a,0\}$.

Для обеспечения максимума шенноновской пропускной способности целевая функцию $q(\mathbf{\Sigma}_k)$ должна быть задана в виде детерминантной функции от матрицы СКО, то есть $q(\Sigma_k) = \det(\Sigma_k)$. Детерминантная функцияСКО является вогнутой. Тогда задача оптимизации матрицы $\mathbf{\Phi}_k$имеет вид:

$$\min_{\Phi_k} \det(\Sigma_k), \quad \text{при условии} \quad Tr\left\{\mathbf{F}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{F}_k^H\right\} = P_k \quad (k = 1,2). \tag{20}$$

Для матрицы $\mathbf{\Phi}_k$ будем иметь [6, 7]

$$\phi_{k,m} = \left(\frac{P_k + \sum_{i=1}^{L} \lambda_{k,i}^{-2}}{q_{k-1,m} L} - \frac{1}{q_{k-1,m} \lambda_{k,m}^2} \right)^+ \quad (k = 1,2). \tag{21}$$

Отметим, что (21) представляет собой обычное распределение мощности по «водоналиному» алгоритму [10].

При использовании (19) и (21) необходимо учитывать, что канальные матрицы $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$ могут иметь разный рангL_1 и L_2. Распределение мощности в соответствии с (19) и (21) может привести (особенно при достаточно малых P_k) к тому, что мощность будет распределена в меньшее число $L \le (L_1, L_2)$ подканалов для передачи данных.

Оптимизация 1-го этапа передачи требует оценки канальной матрицы $\mathbf{H}_1$на релейной станции. На основе этой матрице вычисляются матрицы прекодирования ($\mathbf{F}_1$) и декодирования ($\mathbf{G}_1$) и затем матрица $\mathbf{F}_1$ должна быть передана на базовую станцию по вспомогательной линии связи в обратном направлении (см. рис. 1). Оптимизация 2-го этапа передачи требует оценки канальной матрицы $\mathbf{H}_2$в пункте назначения для вычисления матриц прекодирования ($\mathbf{F}_2$) и декодирования ($\mathbf{G}_2$) и затем матрица $\mathbf{F}_1$ должна быть передана на релейную станцию по вспомогательной линии связи в обратном направлении. Сигнальная корреляционная матрица $\mathbf{Q}_1$ оценивается с помощью (14) на передатчике релейной станции.Для передачи этой матрицы на приемник необходим вспомогательный канал в прямом направлении, как показано на рис. 1.

Для упрощения системы можно исключить этот вспомогательный канал. Тогда при оптимизации второго этапа передачи вместо сигнальной корреляционной матрицы можно использовать в тождественную матрицу, то есть считать, что $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{I}_L$. В результате оптимизация станет не только раздельной, но и независимой для каждого этапа передачи.

Для упрощения системы связи можно исключить этот вспомогательный канал. Тогда сигнальная корреляционная матрица станет недоступной при оптимизации второго этапа передачи. Вместо нее можно использовать в тождественную матрицу $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{I}_L$. В результате оптимизация станет не только раздельной, но и независимой для каждого этапа передачи, при которой вспомогательный канал в прямом направлении будет отсутствовать.

Результаты моделирования

Рассмотрим две конфигурации релейных MIMO систем, у которых число передающих и приемных антенн на 1-ом этапе –M_1=8, N_1=4 и 2-ом этапе –M_2=8, N_2=4 для первой конфигурации, и M_1=8, N_1=8, M_2=8, N_2=8 для второй конфигурации. Элементы канальных матриц $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$ представляют собой гауссовы независимые случайные величины с нулевым средним и единичной дисперсией. Собственные шумы являются некоррелированными с единичной корреляционной матрицей. Используется 4-х уровневая квадратурная фазовая модуляция (QPSK). В качестве характеристик релейной MIMO системы рассмотрим арифметическую функцию СКО и BER. Эти характеристики сравним для раздельной оптимизации, раздельной независимой оптимизации, а также для обычной MIMO без релейной станции (K=0).

На рис. 2 показаны кривые для арифметической функции СКО и BER в зависимости от ОСШ для $M_{1(2)}$=8 и $N_{1(2)}$=4. Видно, что энергетические потери являются пренебрежимо малыми при замене раздельной оптимизации на раздельную и независимую. Аналогичные результаты приведены на рис. 3 для $M_{1(2)}$=8 и $N_{1(2)}$=8. Теперь потери составляют ≈1 дБ в области BER≤10^{-2}, то есть являются небольшими. Отметим также, что по сравнению с обычной MIMO

системой потери равны ≈3 дБ при $M_{1(2)}$=8, $N_{1(2)}$=4, а при $M_{1(2)}$=8, $N_{1(2)}$=8 потери составляют ≈4 дБ для раздельной оптимизации и ≈5 дБ для раздельной независимой оптимизации.

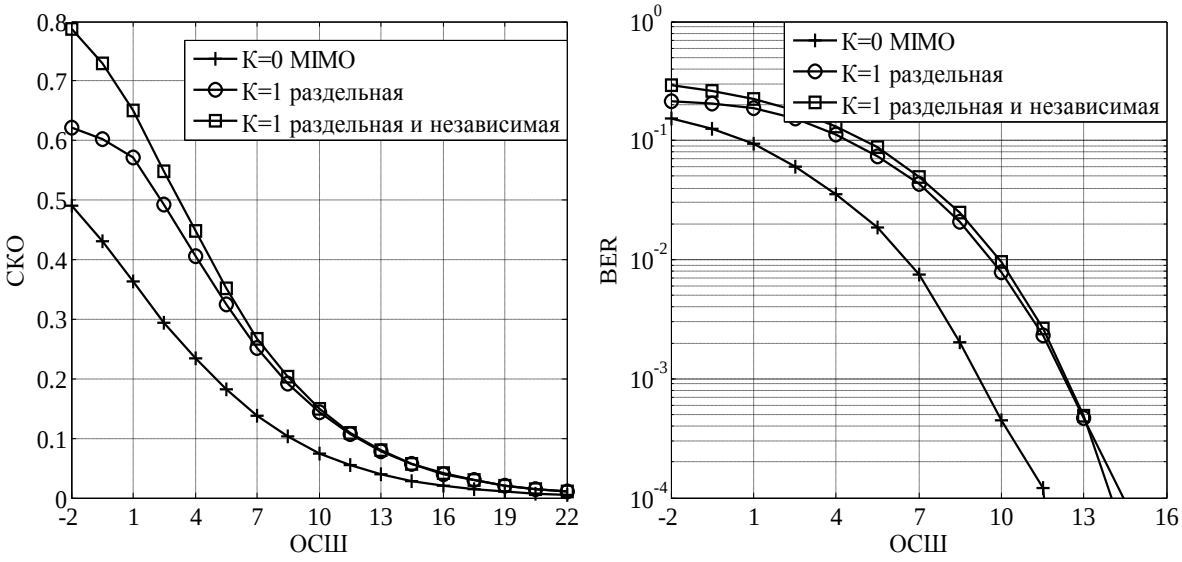


Рис. 2. СКО и BER для разных методов оптимизации при $M_{1(2)}$=8, $N_{1(2)}$=4.

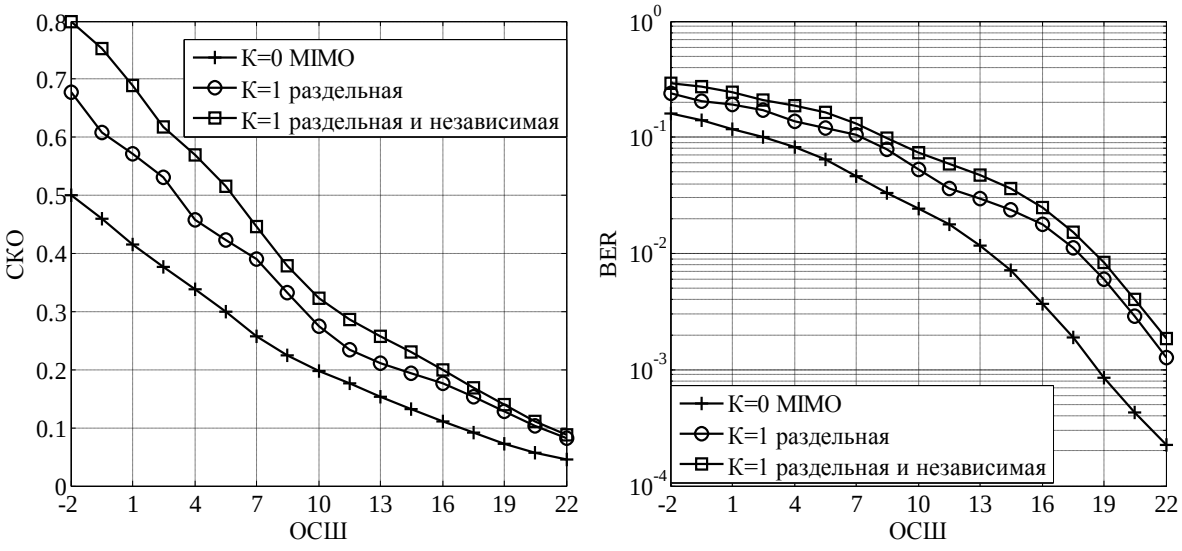


Рис. 3. СКО и BER для разных методов оптимизации при $M_{1(2)}$=8, $N_{1(2)}$=8.

Выводы

Предложен метод раздельной оптимизации по критерию минимума СКО в двухэтапной релейной MIMO системе. Метод основан на разделении задачи общей оптимизации системы на отдельные подзадачи для каждого этапа передачи. Полученоаналитическое решение для линейного прекодера и декодера на каждом этапа передачи. Использование раздельной оптимизации обеспечивает уменьшение числа вспомогательных линий для передачи канальной информации по сравнению с совместной оптимизацией. Показана возможность дальнейшего уменьшения числа вспомогательных линий за счет не только раздельной, но и независимой оптимизации каждого этапа. Представленные результаты моделирования показывают высокую эффективность метода.

Библиографический список

1. Song C., Lee K.-J., and Lee I. MMSE based transceiver designs in closed-loop non-regenerative MIMO relaying systems // IEEE Trans. Wireless Commun. 2010. V. 9. P. 2310–2319.

2. Rong Y. Multihop nonregenerative MIMO relays – QoS considerations. // IEEE Trans. Signal Process. 2011. V. 59. P. 290–303.

3. Mo R. and Chew Y.H. MMSE-based joint source and relay precoding design for amplify-and-forward MIMO relay networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2009. V. 8. P. 4668–4676.

4. Rong Y., Tang X., and Hua Y. A unified framework for optimizing linear nonregenerative multicarrier MIMO relay communication systems // IEEE Trans. Signal Process. 2009. V. 57. P. 4837–4851.

5. Bolcskei H., Nabar R.U., Oyman O., and Paulraj A.J. Capacity scaling laws in MIMO relay networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2006. V. 5. P. 1433–1444.

6. Scaglione A., Stoica P., Barbarossa S., Giannakis G.B., and Sampath H. Optimal designs for space-time linear precoders and decoders // IEEE Trans. Signal Process. 2002. V. 50. P. 1051–1064.

7. Palomar D.P., Cioffi J.M., and Lagunas M.A. Joint Tx-Rx beamforming design for mulricarrier MIMO channels: a unified framework for convex optimization // IEEE Trans. Signal Process. 2003. V. 51. P. 2381–2401.

8. Danilov A.A., Mavrychev E.A. Separate MMSE optimization of multi-hop non-regenerative MIMO relay communication // 17th International ITG Workshop on Smart Antennas. 2013. Stuttgart, Germany.P. 1–8.

9. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

10. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь // М. Сов радио. 1974. 738 с.

E.A. Mavrychev, A.G. Flaksman, A.V. Elokhin

SEPARATE OPTIMIZATION OF THE TWO-HOP RELAY MIMO SYSTEM BY CRITERIA OF A MINIMUM MEAN-SQUARE ERROR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN*)*

In this paperthe problem of optimizing transmission and reception of signals in a two-hop MIMO relay system using the criterion of minimum mean-square error (MMSE) is considered. The relay station performs linear transformations of the input signals, their amplification and transmission. A separate strategy of selecting linear precoding and decoding matrices is proposed, which divides the total optimization problem into a set of consecutively solved subproblems for each of the two stages of signal transmission and reception. In addition, separate independent optimization is considered without using the knowledge of second-order statistics of transmitted symbols. The use of separate optimization reduces the number of auxiliary links for the transmission of channel state information in comparison with the joint optimization. The results of the simulation show the high efficiency of the proposed method.

Key words: relay MIMO system, minimum mean-square error, precoding and decoding, bit error rate

УДК 621.396.96

А.Д. Михайлов, В.Н. Буров

ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МАКЕТА АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА ДАЛЬНЕГО ДЕЙСТВИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: разработка алгоритмов вторичной обработки для макета автомобильного радара дальнего действия.
Методы: экспериментальное исследование и метод математического моделирования.
Выводы (результаты): получены оценки координат и скоростей автомобилей. Показана возможность одновременного обнаружения и траекторного сопровождения нескольких целей (автомобилей). При формировании объединенных отметок значительно сокращается число ложных отметок. Использование алгоритмов калмановской фильтрации позволяет получать оценки траекторных параметров, оптимальные по критерию минимизации среднеквадратического отклонения.
Применение: программное обеспечение для коммерческих автомобильных радаров.
Ключевые слова: автомобильный радар, вторичная обработка радиолокационной информации, отождествление отметок, фильтр Калмана.

Введение

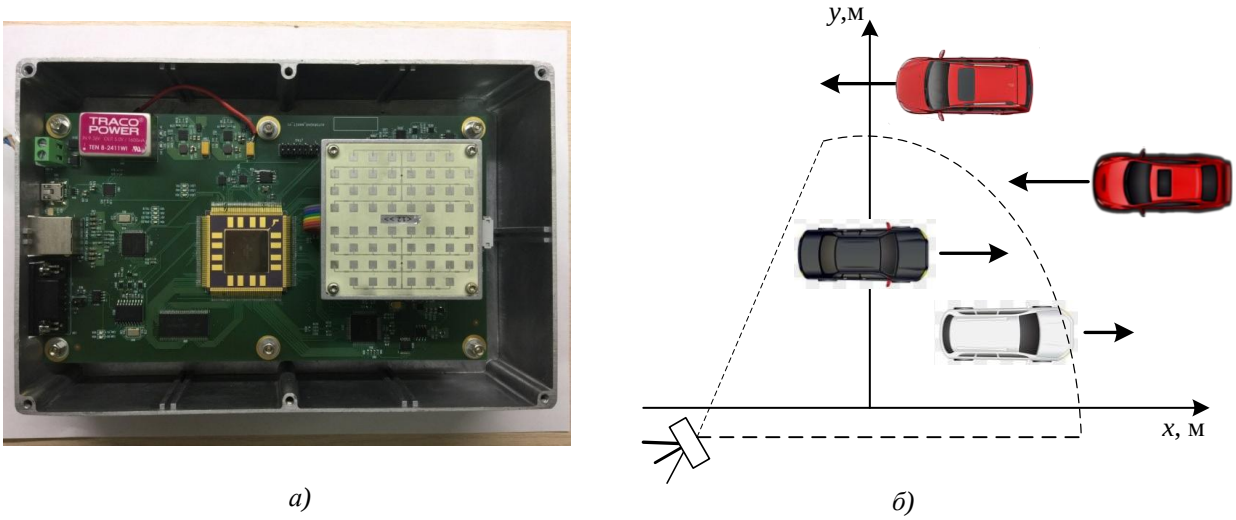
Повышение безопасности дорожного движения является одной из актуальных задач современного автомобилестроения. Традиционные системы обеспечения безопасности, такие как, ремни и подушки безопасности, не обеспечивают желаемый уровень безопасности, поэтому они дополняются активными системами, способными вмешиваться в управление транспортным средством. Активные системы безопасности включают лидары, видеокамеры и автомобильные радары, последние из которых менее подвержены влиянию загрязнения и атмосферных осадков [1].

В настоящее время в автомобильной промышленности распространены радары дальнего действия. Такие радары используются для обнаружения целей на расстоянии от 100 до 300 м и контролируют сектор обзора в пределах 30° впереди автомобиля [1,2]. В автомобильных радарах дальнего действия получил широкое применение сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) ввиду простоты устройств его формирования и обработки. Применение непрерывного ЛЧМ сигнала позволяет определять дальность до цели частотным методом измерения дальности. Применительно к автомобильным радарам известно много методов определения координат целей [3,4].

Описание экспериментального макета

Для исследования алгоритмов обработки сигналов в автомобильных радарах был разработан экспериментальный макет, работающий в диапазоне частот 24 ГГц. На рис. 1.*а* приведена фотография разработанного макета. Экспериментальный макет состоит из антенной решетки и приемопередающего модуля, компании «RFBeam», и платы цифровой обработки сигналов на основе сигнального процессора 1967ВЦ3Т и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) 5101НВ015 компании АО «ПКК Миландр». Экспериментальный макет управляется с персонального компьютера через интерфейс Ethernet. Макет может работать в двух режимах: в режиме передачи данных с выхода АЦП на компьютер и в режиме обработки сигнала. В режиме передачи данных отсчеты записываются во внутреннюю память сигнального процессора и затем передаются на персональный компьютер. В макете осуществляется первичная обработка, формирование отметок, передача их на персональный компьютер и отображение на индикаторе. В рамках эксперимента первичная обработка выполнялась на сигнальном процессоре, а вторичная обработка – на персональном компьютере.

Экспериментальный макет располагался напротив проезжей части, как показано на рис. 1,б. В каждый момент времени в зоне обнаружения наблюдалось сразу несколько движущихся целей (автомобилей). Требовалось разработать алгоритм вторичной обработки, осуществляющий отождествление отметок и их оптимальную фильтрацию с целью получения оценок координат и скоростей цели в двумерной декартовой системе координат, как показано на рис. 1,*б*.



а) *б)*

Рис. 1, *а* – фотография экспериментального макета, *б* – методика обнаружения целей

В известных решениях [5] производилось измерение как азимута, так и расстояния до целей. К наиболее распространенным способам измерения азимута цели можно отнести формирование многолучевой диаграммы направленности (ДН) и использование нескольких разнесенных в пространстве приемных модулей [6]. В работах [3,4] рассматриваются аналитические методы определения координат и рассчитывается потенциальная точность. Угловое положение цели можно измерить, используя антенные решетки с частотным качанием луча [7].

В существующем макете реализовано только формирование одного луча ДН, поэтому азимут цели не измерялся. Для возможности оценивания координат и скоростей целей недостающие измерения азимутальных углов были получены методом математического моделирования.

Вторичная обработка

Задача отождествления(привязки) отметок является первым этапом вторичной обработки. На каждом обзоре длительности T формируется группа отметок дальности, каждая их которых соответствует определённой частоте БПФ принимаемого сигнала. На рис. 2 показана динамика поступления отметок при многоцелевой ситуации. Из рисунка видно, что с большой долей вероятности каждой цели соответствует группа отметок дальности, расположенных на смежных позициях или близко расположенных отметок. Для сокращения вычислительных затрат предлагается заменять такие группы только одной отметкой, полученной усреднением значений дальностей, взвешенными значениями соответствующих амплитуд, как показано на рис. 3,*б*. На рис. 3,*а* видно, что число объединенных отметок значительно меньше, чем исходных.

Процедура траекторной привязки отметок выполняется над объединенными отметками. Сначала по каждой непривязанной отметке формируется строб захвата на следующий временной шаг, затем если следующая отметка попадет в этот строб, то она привязывается. Когда будет привязано несколько отметок, то, используя аппроксимацию линейным полиномом в скользящем окне, все последующие стробы захвата будут корректироваться в

зависимости от направления перемещения цели, как показано на рис. 3,*а*. Размер строба захвата определяется ожидаемой шириной группы смежно расположенных отметок.

На рисунках 2,3 приведены полученные экспериментально отметки. Параметры эксперимента: длительность периода одного обзора $T = 10$ мс; время записи обстановки 15 секунд; критерий завязки траектории – 5/5, критерий сброса траектории – 20/20. Критерий формирования объединенной отметки – 3/5.

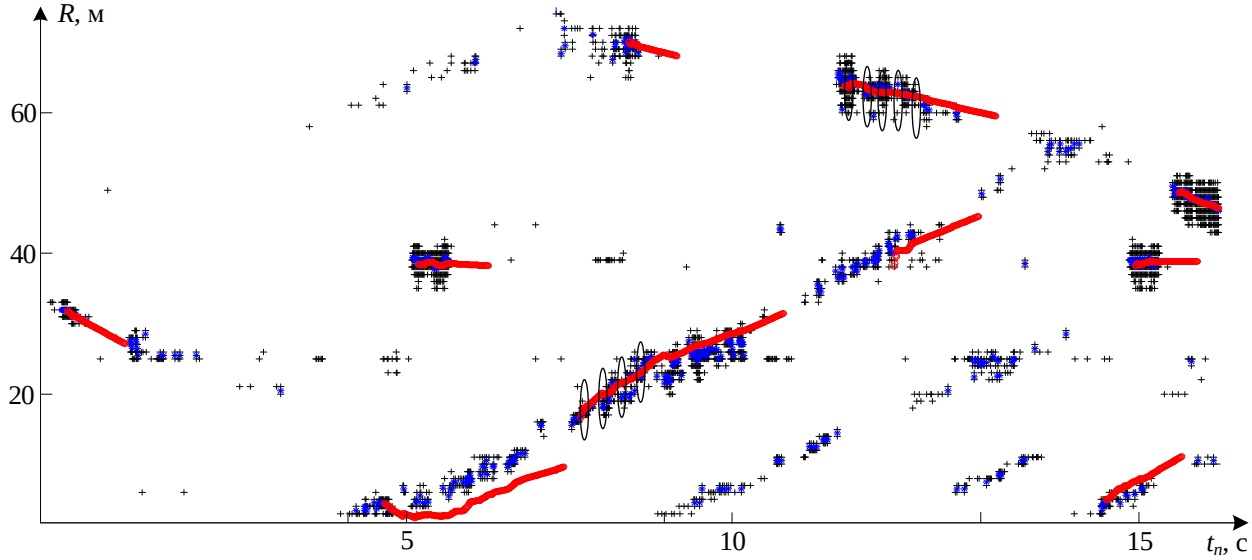


Рис. 2 – Иллюстрация привязки отметок в многоцелевой ситуации

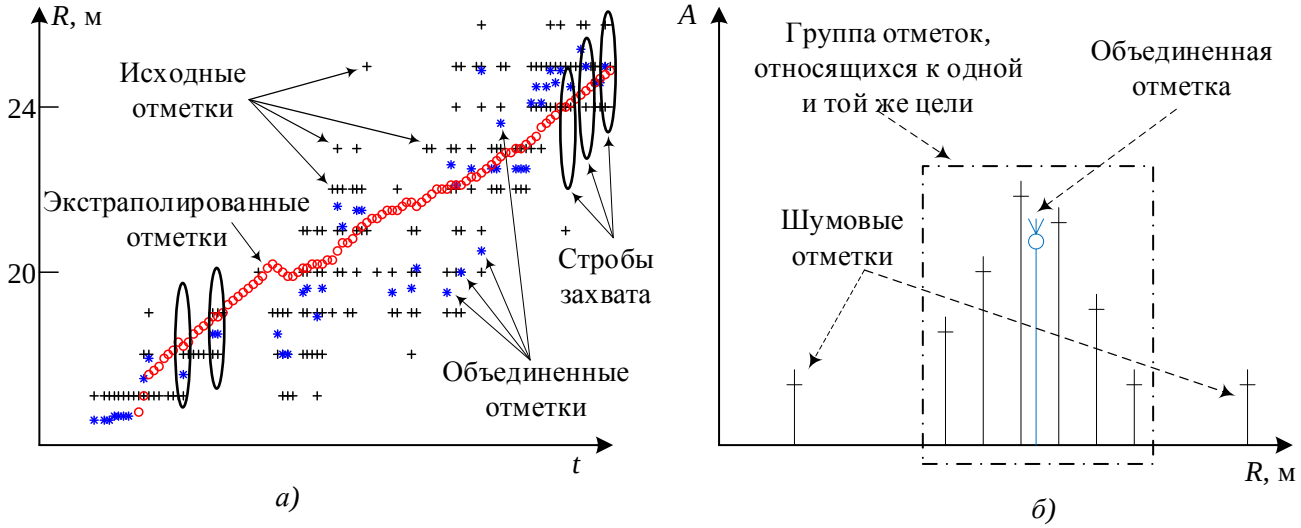


Рис. 3, *а* – иллюстрация процедуры привязки отметок, *б* – методика получения объединенных отметок

Задача траекторного сопровождения относится к классу задач статистического оценивания, которая заключается в непрерывном оценивании состояния динамической системы на основании полученных первичных измерений с известным законом распределения. Уравнение измерений имеет вид

$$\mathbf{z}_n = \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) + \Delta\mathbf{z}_n. \qquad (1)$$

где $\mathbf{x}_n = [x\ y\ v_x\ v_y]^{\mathrm{T}}$ – вектор траекторных параметров цели в момент времени n, где символ «Т» – означает операцию транспонирования, $\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) = [\ R_n\ \alpha_n\ ]^{\mathrm{T}}$ – нелинейная векторная функция, определяющая зависимость истинных значений первичных параметров от истинных значений вектора траекторных параметров, $\Delta\mathbf{z}_n = [\ \Delta R_n\ \Delta\alpha_n\ ]^{\mathrm{T}}$ – вектор случайных ошибок

измерения первичных параметров, распределенных по гауссовскому закону с нулевым матожиданием и соответствующими СКО σ_R, σ_α. Компоненты уравнения измерений имеют вид:

$$\begin{aligned} R_n &= \sqrt{x_n^2 + y_n^2}, & \alpha_n &= \arctan\left(\frac{y_n}{x_n}\right), \\ x_n &= x_i + (n-i)Tv_x, & v_{xn} &= v_{xi} = v_x, \\ y_n &= y_i + (n-i)Tv_y & v_{yn} &= v_{yi} = v_y \end{aligned} \tag{2}$$

где, n – номер текущего временного отсчета, а i – номер предыдущего отсчета, T – интервал поступления отметок.

В качестве основного алгоритма траекторной фильтрации используется расширенный фильтр Калмана, являющийся модификацией фильтра Калмана с целью применения его к нелинейному уравнению измерений [8,9]. Размерность матрицы $\mathbf{z}_n$ 2×1, а для H_n – 2×4. Процедура работы фильтра Калмана состоит из уравнений фильтрации

$$\begin{aligned} &\mathbf{K}_n = \hat{\mathbf{P}}_{n/n-1}\mathbf{H}_n^T(\mathbf{H}_n\hat{\mathbf{P}}_{n/n-1}\mathbf{H}_n^T + \mathbf{R}_n)^{-1}, \\ &\hat{\mathbf{x}}_{n/n}^{j} = \hat{\mathbf{x}}_{n/n-1}^{j-1} + \mathbf{K}_n(\mathbf{z}_n - \mathbf{h}_n(\hat{\mathbf{x}}_{n/n-1}^{j-1})), \\ &\hat{\mathbf{P}}_{n/n} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_n\mathbf{H}_n)\hat{\mathbf{P}}_{n/n-1} \end{aligned} \tag{3}$$

и экстраполяции на следующий шаг

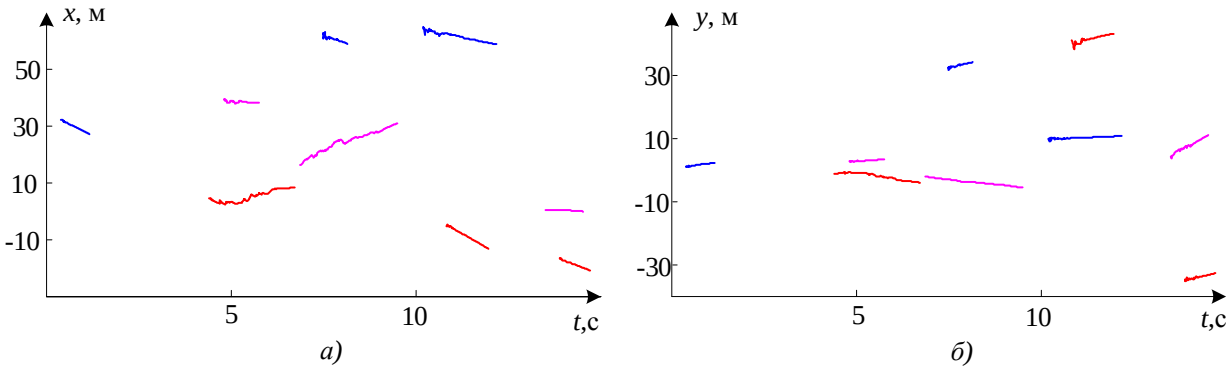
$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{n+1/n} &= \mathbf{F}_n\hat{\mathbf{x}}_{n/n}, \\ \hat{\mathbf{P}}_{n+1/n} &= \mathbf{F}_n\hat{\mathbf{P}}_{n/n}\mathbf{F}_n^T, \end{aligned} \tag{4}$$

где $\hat{\mathbf{P}}_{n/n}$ – корреляционная матрица вектора траекторных параметров, $\mathbf{F}_n$ – матрица динамики движения цели (используется модель постоянного ускорения), $\mathbf{R}_n$ – корреляционная матрица ошибок первичных измерений, имеющая размерность 2×2. Для получения хорошей точности траекторного сопровождения, расширенный фильтр Калмана должен иметь как минимум несколько итераций: j = 3. Используемые в процедуре фильтрации матрицы приведены ниже.

$$\mathbf{F}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_n}{\partial x} & \frac{\partial R_n}{\partial y} & \frac{\partial R_n}{\partial v_x} & \frac{\partial R_n}{\partial v_y} \\ \frac{\partial \alpha_n}{\partial x} & \frac{\partial \alpha_n}{\partial y} & \frac{\partial \alpha_n}{\partial v_x} & \frac{\partial \alpha_n}{\partial v_y} \end{bmatrix} \tag{5}$$

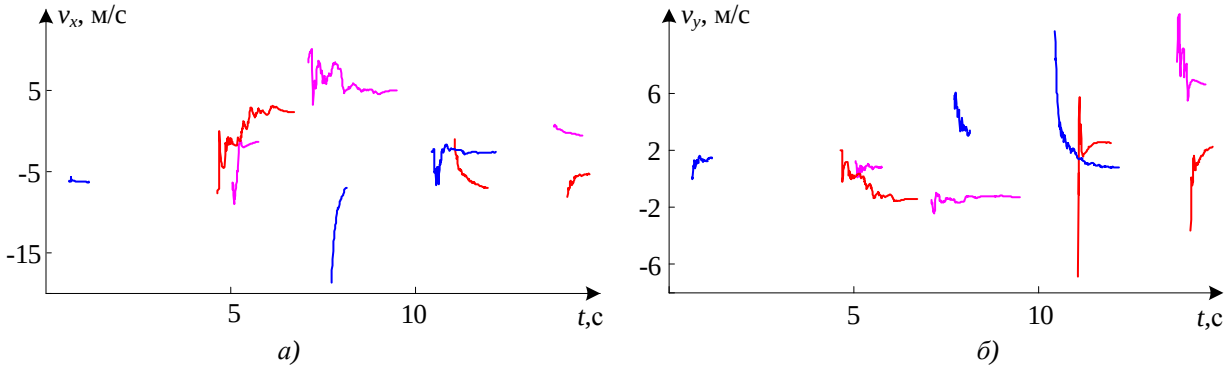
Фильтр Калмана выдает оценку траекторных параметров, оптимальную по критерию минимума среднеквадратического отклонения. Для инициализации расширенного фильтра Калмана необходимо задание начального состояния вектора траекторных параметров $\hat{\mathbf{x}}_{n/n-1}$ и корреляционной матрицы этого вектора $\hat{\mathbf{P}}_{n/n-1}$., вычисление которых основано на использовании алгоритмов первичного приближения. Алгоритмы получения начального приближения основаны на линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов небольшого числа первоочередных первичных измерений.

На рис. 4,5 приведены результаты траекторной фильтрации координат и скоростей наблюдаемых целей. Параметры эксперимента: σ_R = 0,5 м; σ_α = 0,2°.



а) *б)*

Рис. 4 Оценки *x* и *y* –координат нескольких целей



а) *б)*

Рис. 5 Оценки v_x и v_y – компоненты скоростей нескольких целей

Выводы

Применение алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации в экспериментальном макете позволяет одновременно сопровождать несколько движущихся целей, оценивать их координаты и скорости. Обработка экспериментальных значений дальностей в сочетании с измерениями углов, полученных с помощью математического моделирования, позволяет ожидать показателей точности оценивания координат не хуже ±1 м, а скорости – не хуже ±0,5 м/с (±1,8 км/ч).

Библиографический список

1. Implementing Digital Processing for Automotive Radar Using SoC FPGAs, Altera Corporation, 2013– 16 p.

2. Рекомендация МСЭ-R M.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.

3. Система кругового обзора для транспортных средств на основе сверширокополосных датчиков / С.В.Шишанов, А.В.Мякиньков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника, 2015.– Вып. 2.– С. 55–60.

4. Система определения геометрических размеров объектов впереди транспортного средства на основе сверхширокополосных приемопередающих модулей / А.Г.Рындык, А.В.Мякиньков, С.В.Шишанов // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2017.– № 8, т.15.– С. 19–24.

5. F.Folster, H.Rohling. Data Association and Tracking for Automotive Radar Networks, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, №.4, December, 2005.

6. Pedestrian Tracking with Occlusion Using a 24 GHz Automotive Radar. M.Heuer, A.Al-Hamadi, A.Rain, M.Meinecke, H.Rohling. Radar Symposium (IRS), 2014 15th International, Gdansk, Poland, 16-18 June 2014.

7. Применение антенной решетки с частотным качанием луча в автомобильном радаре / С.В.Шишанов, А.В.Мякиньков, А.А.Кузин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника, 2014.– Вып. 5.– С. 31–35.

8. Сейдж, Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс.– Пер. с англ. под ред. проф. Б.Р. Левина. М.: Связь.– 1976.– 496 с.

9. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320с.: ил.

A.D. Mikhailov, V.N.Burov

SECONDARY PROCESSING OF RADAR DATA FOR AUTOMOTIVE LONG-RANGE RADAR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

Purpose: development of secondary processing algorithms for long-range car radar prototype.
Method: experimental research and mathematical modeling method
Conclusions: estimates of coordinates and speeds of cars are produced. A possibility of simultaneous detection and tracking of the trajectory of several targets (cars) is shown. The number of alias marks can be significantly reduced if the combined marks will be formed. Using the algorithms of Kalman filter allows to get optimal estimation of target tracking parameters according to the criterion of minimizing the standard deviation.
Application: software for commercial automotive radar.

Key words: automobile radar, secondary processing of radar information, identification of marks, Kalman filter.

УДК 62-77

И.С. Назмутдинов, Ю.В. Дьяченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Военная приемка 6340 (г. Уфа)

В статье рассмотрены существующие подходы по представлению эксплуатационной и ремонтной документации в электронном виде удобной для работы обслуживающим персоналом.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, информационная поддержка жизненного цикла изделия, эксплуатационно-техническую документацию, интерактивные электронные технические руководства, база данных, база знаний, вооружение и военная техника.

В соответствии с требованиями действующих нормативных документов для новых и перспективных образцов радиотехнических устройств должна быть реализована информационная поддержка жизненного цикла изделий (ИПИ) вооружения и военной техники (ВВТ). Информационная поддержка жизненного цикла (ЖЦ) изделий ВВТ основывается на использовании интегрированной информационной среды или единого информационного пространства Минобороны России и предприятий оборонно-промышленного комплекса. Главной целью внедрения ИПИ ВВТ в Минобороны России является повышение эффективности управления процессами ЖЦ изделий.

Внедрение ИПИ ВВТ требует коренного пересмотра организации информационных процессов на всех этапах ЖЦ ВВТ. Основными ключевыми направлениями развития организации информационных процессов являются:

постепенный переход к стандартизованному электронному представлению всех видов технической документации;

формирование условий для реорганизации функциональных процессов жизненного цикла изделий ВВТ на основе внедрения ИПИ-технологий ВВТ;

создание интегрированной информационной среды ЖЦ ВВТ в качестве высокотехнологичной основы осуществления процессов управления ЖЦ изделий ВВТ.

Переход к стандартизованному электронному представлению всех видов технической документации позволит:

повысить эффективность организации работ по вводу в эксплуатацию, регламенту, ремонту, доработкам, улучшению тактико-технических характеристик ВВТ;

обеспечить сбор достоверной информации об изменении качественного состояния ВВТ с целью оперативного решения задач по поддержанию изделий ВВТ в технически исправном (боеготовом) состоянии;

своевременно предоставлять персоналу, эксплуатирующему, обслуживающему и ремонтирующему ВВТ, актуальную эксплуатационно-техническую документацию (ЭТД), имеющую многократно меньшие по сравнению с бумажной документацией физические объемы и более удобную в практическом применении;

организовывать эффективное внесение изменений в ЭТД на ВВТ и доведение изменений до потребителя;

обеспечить оперативный контролируемый доступ к требуемой информации об образцах ВВТ из любой точки мира, в том числе непосредственно с поля боя;

постоянно совершенствовать системы и методы профессиональной и технической подготовки и переподготовки личного состава по мере поставки новых и модернизации существующих систем ВВТ на основе использования постоянно обновляемых баз данных о ВВТ в соответствии с квалификационными требованиями.

Фундаментом разработки ЭТД служат технологии интерактивных электронные технических руководств (ИЭТР). К представляемой средствами ИЭТР информации относятся данные о составе, структуре изделия, его технических характеристиках, конструкторско-технологических параметрах и эксплуатационных свойствах. В последние годы на базе технологии ИЭТР была сформирована концепция разработки информационных комплексов, использующих корпоративную память. Обобщенная структура, полученная в результате анализа эксплуатационно-технических документов представлена в табл. 1 и на рис. 1. [1].

Таблица 1

Уровни представления информации для ИЭТР

Уровень представления информации	Вид информации		
	Документы	Данные	Знания
Методический	Структуры архивов	Структуры данных	Модели знаний
	4 %	5 %	3 %
Содержательный	Отчеты, методики, инструкции	Справочники, каталоги	Правила вывода, факты
	22 %	10 %	8 %
Программно реализованный	Документы (тексты, рисунки, фотографии, схемы)	БД, файлы	БЗ
	30 %	12 %	12 %
Всего	56 %	27 %	23 %

В результате анализа определено что, ИЭТР эксплуатационно-технических данных представляет собой хранилище, содержащие непротиворечивые консолидированные эксплуатационно-технические данные.

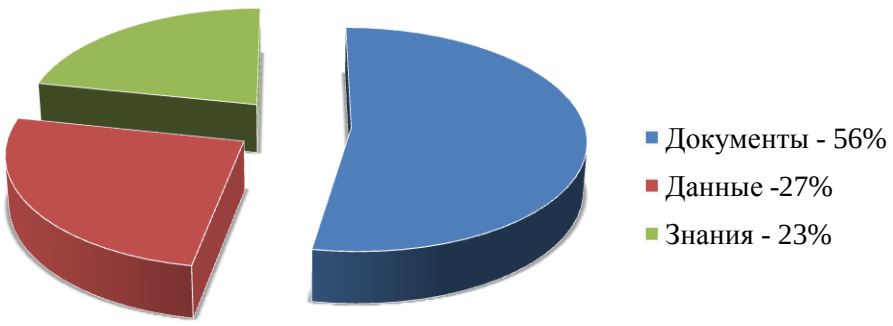


Рис. 1. Структура ИЭТР в процентном соотношении

Но особенно актуальной становится задача использования специализированных баз знаний (БЗ), отражающие состояние изделий эксплуатации за достаточно продолжительный период времени, а также данные о внешней среде, влияющие на процесс эксплуатации.

Объем данных в ИЭТР как минимум на порядок превосходит объемы данных в оперативных баз данных (БД). Создание ИЭТР вызвано тем, что анализировать данные оперативных БД напрямую невозможно или затруднительно, так как они являются разрозненными, хранятся в форматах различных системах управления БД и в разных сегментах корпоративной сети. В целом можно сказать, что данные оперативных БД не ориентированы на потребности аналитиков [2].

Большей сложностью отличаются и запросы к ИЭТР. Названные особенности обусловливают необходимость обеспечения:

высокой производительности обработки запросов;

масштабируемости используемых алгоритмов.

При загрузке в ИЭТР новых данных должна выполняться их верификация, включающая:

выявление и устранение ошибок, а также нарушений ограничений целостности;

выявление и разрешение противоречий в данных, поступающих из разных источников;

выявление и устранение избыточности в данных и т.д.

Различные решения в области представления данных в электронном виде порождают несколько вариантов разделения технических руководств по функциональным признакам [1, 3, 4].

Для представления данных выделим в качестве основы четыре абстрактных класса ИЭТР, каждый из которых использует определенный состав элементарных операций, характеризующийся определенной функциональностью и стоимостью реализации.

Класс 1 – Индексированные цифровые изображения страниц

Этот тип ИЭТР использует ограниченный набор операций абстракции, представляет собой набор изображений, полученных сканированием страниц документации. Страницы индексированы в соответствии с содержанием, списком иллюстраций, списком таблиц и т.п. Индексация должна позволять отобразить необходимое растровое представление раздела документации сразу после его выбора в содержании ИЭТР.

Данный тип ИЭТР сохраняет ориентированность страниц и может быть выведен на печать без предварительной обработки.

Класс 2 – Линейно-структурированные электронные документы

Использует полный набор операций абстракции и ограниченный набор операций функций. Большинство документов данного класса размечены тегами SGML и оглавление документа содержит ссылки в соответствующие разделы технического руководства. Также документ может содержать перекрестные ссылки, таблицы, иллюстрации, ссылки на звуковые и видео данные. Как правило, руководства данного класса позволяют производить поиск данных в документе, могут содержать как растровую, так и векторную графику, сноски и заметки. Данный класс ИЭТР может быть просмотрен на экране целиком и распечатан без предварительной обработки.

Основным недостатком технических руководств первых двух классов является необходимость дублирования однородной информацию. Можно выделить два основных типа дублирования:

однородные данные, такие как замечания, предостережения, заметки, графики, повторяются во всех местах, где они необходимы;

однородная информация повторяется с незначительными изменениями, зависящими только от смыслового контекста.

Класс 3 – Иерархически-структурированные электронные документы.

Этот класс использует полный набор операций абстракции и наследования. Технические данные в документах данного класса организованы как объекты внутри ИЭТРа, имеющего иерархическую структуру [4].

В технических руководствах класса 3 отпадает необходимость многократного повторения идентичной информации: данные создаются один раз, а затем в документе проставляется только ссылка на них, что в свою очередь приводит к значительному уменьшению объема документации. К достоинствам данного типа руководств можно также отнести высокую интерактивность и возможность отбора данных по функциональным признакам при запросах. Так как данные в ИЭТР класса 3 организованы иерархически, документация не может быть распечатана без предварительной обработки.

Класс 4 – Интегрированные ИЭТР

ИЭТР данного класса сочетают в себе функциональность технических руководств предыдущих классов с возможностью прямого интерфейсного взаимодействия с электронными модулями диагностики изделий, что позволяет оператору выполнять задачи более быстро и эффективно. ИЭТР класса 4 позволяют наиболее быстро проводить операции по поиску неисправностей в изделии, локализации сбоев, подбору запасных частей, а также производить подбор информации для анализа состояния изделия в конкретной ситуации.

Также ИЭТР данного класса могут автоматически получать информацию об изделии, анализировать ее и добавлять в свою базу данных для последующего использования. Таким образом, использование ИЭТР при эксплуатации позволит усилить информационное взаимодействие в системе специалист – информационный структурный образец, а оценка перспектив их создания, использования и экономического эффекта является актуальной научно-технической задачей. Класс 4 использует полный набор операций абстракций и функций.

Эксплуатационные документы (ЭД), предназначены для эксплуатации изделий, ознакомления с их конструкцией, изучения правил эксплуатации (использования по назначению, технического обслуживания, текущего ремонта, хранения и транспортирования), отражения сведений, удостоверяющих гарантированные изготовителем значения основных параметров и характеристик (свойств) изделия, гарантий и сведений по его эксплуатации за весь период (длительность и условия работы, техническое обслуживание, ремонт и другие данные), а также сведений по его утилизации. В соответствии с нормативными документами ЭД продолжает оставаться основным источником информации для освоения и эксплуатации сложного технического оборудования.

В настоящее время получили широкое распространение системы управления базами данных основанные на реляционной модели данных. Системы управления базами данных сами по себе не представляют ценности для пользователей. Даже данные, хранящиеся в базах, не представляют особой ценности сами по себе. Основной ценностью обладают законченные приложения, позволяющие пользователям моделировать некоторые аспекты своей деятельности и бизнеса с использованием вычислительной техники. В этом случае, разработчики реляционных БД используют три подхода[5].

Первый подход. Динамическая модификация структуры БД приложением. Этот подход сохраняет нормализацию структуры БД. Он обладает, приведённым ниже списком недостатков (А, Б, В).

А. При изменении структуры БД изменяется структура данных, введенная в БД на предыдущем этапе ее эксплуатации. В некоторых случаях законодательство или бизнес-процесс требуют сохранения исторических данных в неизменном виде.

Б. Отсутствие наследования в классической реляционной модели данных (РМД) не позволяет естественным образом моделировать наследование понятий из бизнес-модели.

В. Большинство современных реализаций РСУБД не позволяют провести модификацию структуры БД в пределах транзакции. При модификации структуры таблиц транзакции завершаются. В случае ошибочной модификации структуры, изменения откатить будет невозможно.

Второй подход. Поворот структуры БД на 90 градусов. Этот подход позволяет избавиться от недостатков предыдущего подхода. Для чистоты концепции все объекты, хранящиеся в БД, приходится размещать всего в нескольких таблицах. Чаще всего это две таблицы – таблица объектов, и таблица значений их атрибутов. Это приводит к декартовому умножению количества объектов на количество их атрибутов и значительному возрастанию строк в таблице атрибутов. Так же, данный подход приводит к возрастанию количества соединений.

Третий подход. Использование таблиц шаблонов. В этом случае в БД создаются шаблонные таблицы с набором колонок «про запас» не сопоставленных с атрибутами бизнес объектов. В каждой шаблонной таблице создается несколько колонок одного и того же типа, например tem1, tem2, tem3, …, tem99, float1, float2, float3, … , float99, varc1, var2, var3, … var99,. Так же в БД создается модель бизнес объекта, которая описывает в какой колонке находится каждый атрибут некоторого объекта. В этом случае одна и та же колонка шаблонной таблицы содержит значения атрибутов объектов разных типов. По сравнению с ранее описанными, этот подход облегчает ситуацию, однако и он не лишен значительных недостатков.

Объектно-ориентированная модель представления данных свободна от перечисленных ранее недостатков РБД. Возможность моделировать сложно-структурированные объекты позволяет объединять несколько экземпляров объектов в единое целое, называемое компонентом. В отличие от РМД, такой компонент может храниться в базе данных как единое целое. Это значительно увеличивает эффективность работы системы. Объектная модель позволяет реализовывать наследование классов и множественное наследование интерфейсов. Дополнительными достоинством объектной модели представления данных является возможность трактовать любую представляемую в БД сущность как объект. Это позволяет сохранять в атрибутах объекта не только простые значения, но и компоненты со сложной внутренней структурой. При этом возникает необходимость в разработке новых объектно-структурных моделей для представления в базе знаний объектно-ориентированного типа.

Выводы

Таким образом, результаты теоретических исследований и практических экспериментов позволяют успешно реализовывать сетевую объектно-ориентированную систему управления знаниями, включающую объектно-ориентированную базу знаний. Такая система окажется полезна не только в решении перспективных задач, но и при решении насущных проблем эксплуатации, традиционно решаемых с использованием БД.

Библиографический список

1. Молодцова Ю.В. Объектно-структурные модели представления и обработки информации по эксплуатации технических средств МЧС. Дисс. … канд. тех. наук. – Пенза, ПГТУ, 2014.

2. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. – М.: Радио и связь, 1992.

3. Горюнова В.В. Логические модели представления знаний в интеллектуальных информационных системах. – Пенза, ПГУАС, 2003.

4. Горюнова В.В. Концептуальные спецификации эксплуатационно-технологических процессов. – Пенза, ПАИИ, 2010.

5. Грейвс М. Проектирование баз данных на основе XML.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильяме», 2002.

I.S. Nazmutdinov, I.V. Dyachenko

STUDY OF THE INFORMATIONAL MODEL OF THE STRUCTURING THE OPERATING TECHNICAL DOCUMENTATION FOR RADIO TECHNICAL DEVICES

Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Military acceptance 6340 (Ufa)

The article reviews the existing methods to provide the operating and maintenance documentation in electronic format to be suitable for the use by the operating personnel.

Keywords: equipment life cycle, data support of equipment life cycle, operating and technical documentation, interactive electronic technical manuals, data base, knowledge base, weapons and military equipment.

УДК 62-77

И.С. Назмутдинов, В.Д. Ведищев, Р.А. Милютин

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

В статье рассмотрены существующие подходы к решению проблемы технического диагностирования: традиционный (допусковый) подход и современный, предполагающий использование количественных оценок состояний.

Ключевые слова: техническая диагностика, алгоритм, традиционный подход, работоспособный, неработоспособный, система технического обслуживания и ремонта, математическая модель, функция принадлежности.

Под процессом технического диагностирования понимается процесс получения и логической обработки информации о состоянии отказавшей системы с целью определения причины ее отказа. Любая отказавшая система, как правило, обеспечивает специалистов комплексом симптомов отказа, признаков нормальной работы (признаков нормы) отдельных ее подсистем (элементов) и неопределенностей, которые были зафиксированы в момент отказа или получены в дополнительных испытаниях [1]. Симптомом отказа технической системы является любая информация, поступающая на ее выход, которая свидетельствует о переходе системы в неработоспособное состояние. Признаком нормы является любая информация, поступающая на выход системы, которая свидетельствует о сохранении некоторыми подсистемами или отдельными ее элементами работоспособного состояния. Неопределенностями являются такие состояния выходных параметров системы, когда они не являются ни симптомами, ни признаками нормы, т.е. в момент отказа эти параметры не могут характеризовать работоспособность системы.

В настоящее время существуют два подхода к решению проблемы технического диагностирования: традиционный (допусковый) подход и современный, предполагающий использование количественных оценок состояний. Рассмотрим их подробнее [2].

На рисунке 1 приведена схема алгоритма решения проблемы технического диагностирования при традиционном подходе. Состояние диагностируемого изделия характеризуется измеренными значениями определяющих (существенных) параметров. По каждому из них известны значения границ полей допусков $[T_{H,i}, T_{B,i}]$.

Результаты измерений y_i, $i = 1, M$ сравниваются со значениями соответствующих границ полей допусков. Если измеренное значение оказалось внутри соответствующего поля допуска, то по нему принимается оценка «годен», в противном случае – «не годен». Аналогично выполняется проверка по каждому из контролируемых параметров изделия. Если все контролируемые параметры оцениваются как «годные», результатом обработки является рекомендация «целесообразно применение изделия по назначению». В противном случае при первом непопадании результата измерения в соответствующее поле допуска, объект характеризуется как «неработоспособный» и дальнейшее управление передается блоку «поиска неисправных элементов объекта». По результатам работы блока формируются рекомендуемые меры воздействия на объект, которые передаются в блок «система технического обслуживания и ремонта» (блоки «поиска неисправных элементов объекта» и «система технического обслуживания и ремонта» не показаны на рисунке 1, т.к. в некоторых случаях они могут отсутствовать, и в этом случае поиск неисправного элемента производится эксплуатационным персоналом).

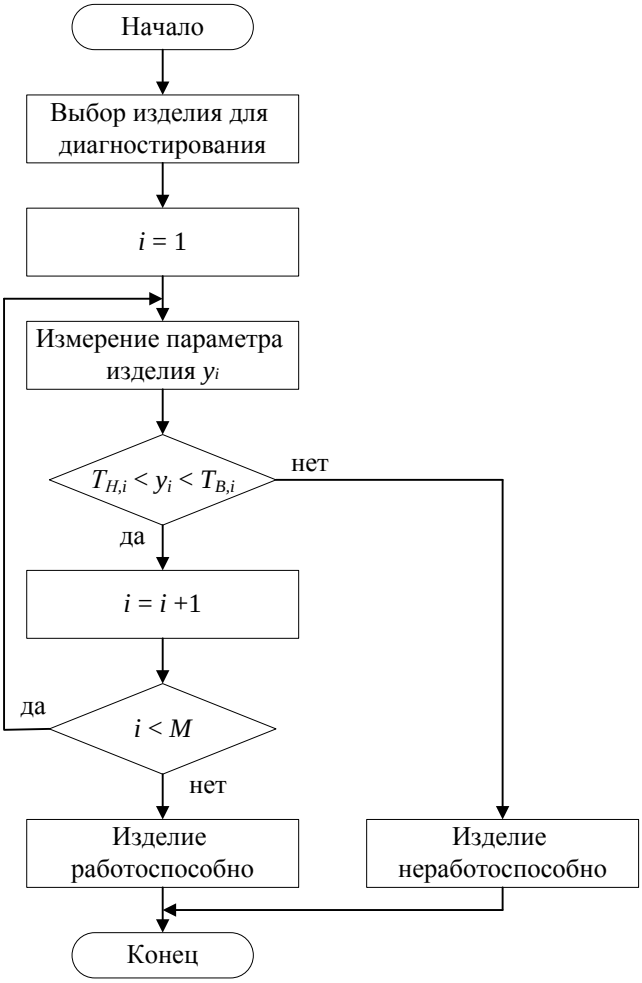


Рис. 1. Допусковый подход в техническом диагностировании

Особенностью описанного решения проблемы диагностирования является разделение множества всех состояний объекта на два непересекающихся подмножества «годных» и «не годных». Математическая модель состояния использует функцию принадлежности с четким переходом между состояниями «работоспособен» и «неработоспособен» (рис. 2). Очевидно, что в рассмотренной оценке реализован критерий принадлежности.

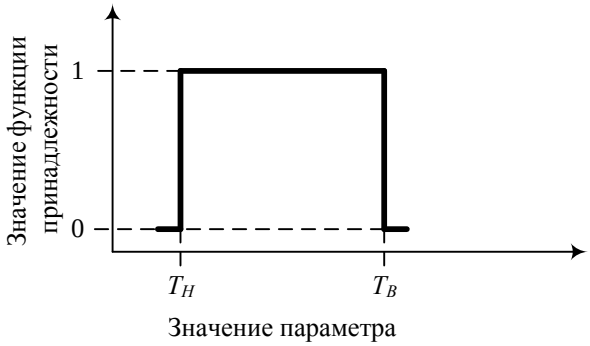


Рис. 2. Ступенчатая функция принадлежности

Недостатком такого подхода является то, что система диагностирования не способна распознать приближение объекта к неработоспособному состоянию при приближении одного или нескольких параметров к границам полей допусков. Соответственно, становится невозможным прогнозирование состояния объекта на упрежденные моменты времени.

Достоинством традиционного подхода являются его относительная простота реализации и общая скорость работы даже при большом числе оцениваемых параметров.

На рисунке 3 представлен алгоритм современного подхода к решению проблемы технического диагностирования. «Грубое» диагностирование основано на проверке нахождения всех измеряемых параметров объекта y_i внутри заданных для них полей допусков $[T_H, T_B]$. По результатам данного диагностирования получается дискретная оценка состояний объекта «годен»/«негоден».

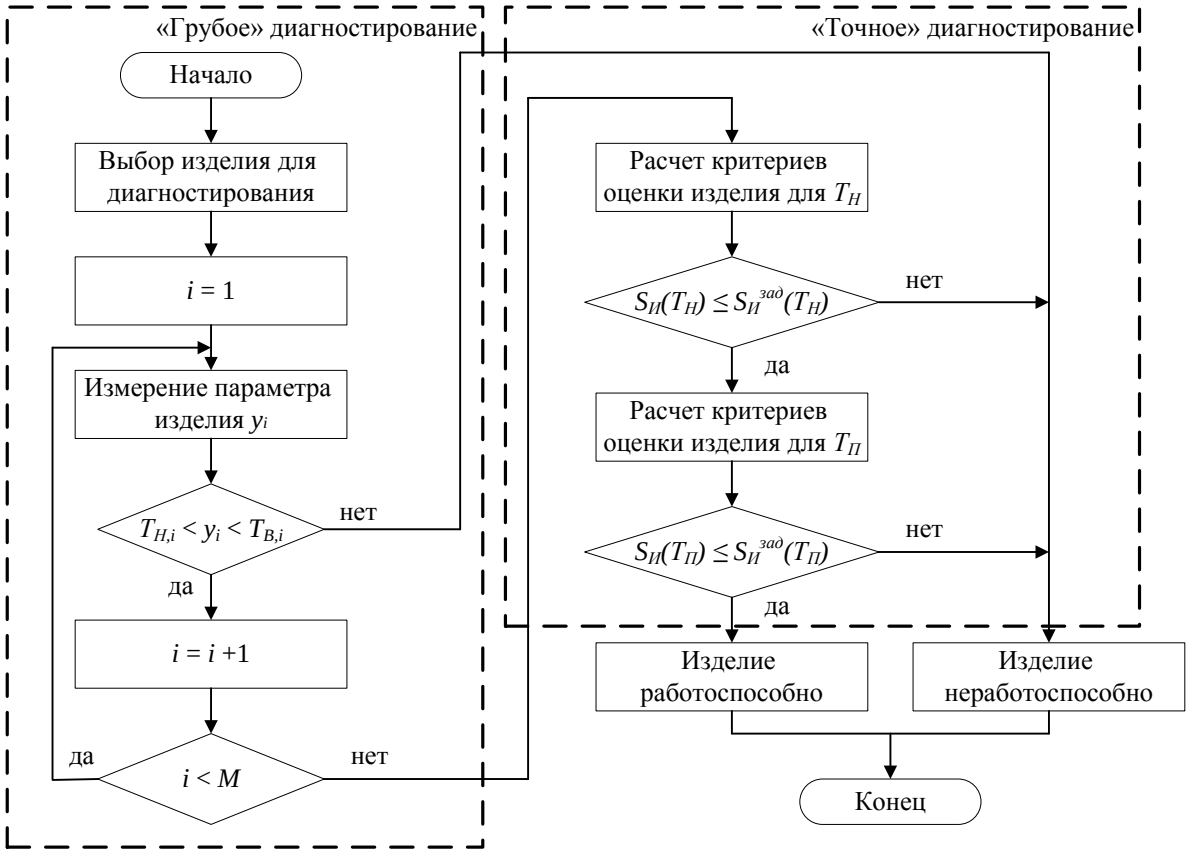


Рис. 3. Современный подход в техническом диагностировании

Однако в современном подходе учтено мнение о том, что для большинства наблюдений [3] не существует строгих границ между названными выше состояниями. Причем, чем больше результаты измерений отклоняются от обычных, тем больше появляется уверенность в том, что имеет место аномальное состояние. Такой подход может быть формализован с использованием функций принадлежности теории размытых множеств (рис. 4).

Пусть поле допуска *i*-го параметра представлено значениями границ $[T_H, T_B]$. Тогда функция принадлежности может быть представлена в виде:

$$\mu(x)=\begin{cases}0, x \le T_H \cup x \ge T_B \\ f_1(x), T_H < x < A_H \\ 1, A_H \le x \le A_B \\ f_2(x), A_B < x < T_B\end{cases}, \quad (1)$$

где $f_1(x)$ и $f_2(x)$ – функции принадлежности. В [4] описаны функции принадлежности различных видов.

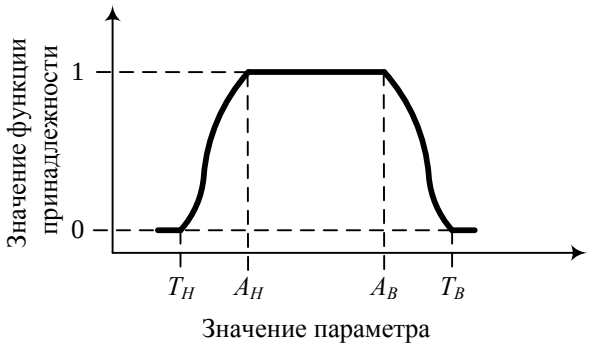


Рис. 4. Функция принадлежности

«Точное» диагностирование заключается в проверке условия $S_И(T_H) \le S_И^{зад}(T_H)$, где $S_И(T_H)$ и $S_И^{зад}(T_H)$ – соответственно рассчитанная и минимально допустимая количественные оценки состояния изделия для настоящего момента времени. При выполнении заданного условия производится прогнозирование состояния изделия для будущего момента времени, состоящее в расчете оценки состояния объекта для будущего момента времени $S_И(T_П)$, которая затем сравнивается с минимально допустимой оценкой для будущего момента времени $S_И^{зад}(T_П)$. По результатам выполнения условия $S_И(T_П) \le S_И^{зад}(T_П)$ делается вывод о способности изделия быть примененным по назначению.

Достоинствами предлагаемого подхода являются возможность обнаружения «миграции» параметров к границам полей допусков и прогнозирование состояния изделия для некоторого времени в будущем. Однако за это приходится расплачиваться более сложной системой диагностирования и увеличенным временем обработки.

По результатам измерений и вычислениям функций принадлежностей для всех параметров рассчитывается оценка состояния изделия в целом. Задавая допустимую минимальную оценку, определяем приближение состояния к критическим значениям.

Вывод о применении объекта по назначению делается только в том случае, когда значения всех параметров попадают в поля допусков, а также количественные оценки состояния объекта в настоящий и в прогнозируемый моменты времени превышают заданный минимальный уровень работоспособности.

Выводы

Таким образом, представленный современный подход к решению проблем технического диагностирования позволит увеличить эффективность функционирования системы технического обслуживания и ремонта.

Библиографический список

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика: термины и определения. – М.: Госстандарт, 1989.

2. А.И. Заковряшин, П.С. Агалецкий Элементы интегрированной логистической поддержки. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №49. 2011.

3. Гиг, Дж. ван. Прикладная общая теория систем 2 кн. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981.

4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств.– М.: Радио и связь, 1982.

I.S. Nazmutdinov, V. D. Vedishchev, R. A. Milyutin

METHODS TO SOLVE THE TECHNICAL DIAGNOSTICS ISSUES OF RADIO TECHNICAL DEVICES

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

The article reviews the existing methods to solve the technical diagnostics issues: traditional (tolerance) method and modern which suggest the use of the quantitative assessment of state.

Keywords: technical diagnostics, algorithm, traditional method, functional, non-functional, technical maintenance and repair system, mathematical model, functional assignment.

УДК 690.192; 623.624.9

Аюуш Насанжаргал, А.И. Казьмин

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ РАЗВЕДЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ТЕХНОЛОГИИ MIMO И УПРАВЛЕНИЯ ЕЕ ДЕМАСКИРУЮЩИМИ ПРИЗНАКАМИ

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

В статье представлена математическая модель для оценки разведывательной защищенности системы ДКМВ радиосвязи. Сформулированы основные направления ее повышения. Предложен способ обеспечения разведывательной защищенности системы ДКМВ-радиосвязи на основе принципов технологии MIMO.

Ключевые слова: ДКМ-радиосвязь, разведывательная защищенность, технология MIMO .

В системах радиосвязи для обеспечения обмена различными видами информации применяются, в основном, диапазоны декаметровых, метровых и дециметровых волн, среди которых диапазон декаметровых (ДКМ) волн (КВ диапазон) имеет важнейшее значение при организации связи на большие расстояния, превышающие дальность прямой видимости. Такие ее отличительные особенности, как высокая мобильность, гибкость, обеспечение прямых связей на большие расстояния при минимальных затратах сил и средств делают ДКМ радиосвязь незаменимой практически во всех условиях обстановки. С развитием объединенной автоматизированной цифровой системы связи (ОАЦСС) ВС РФ средства ДКМ радиосвязи будут применяться прежде всего в качестве оперативного средства управления войсками, при необходимости расширения зоны действия ОАЦСС, а также при невозможности боевого применения или выходе из строя других средств связи.

Ведение противником интенсивной радио- и радиотехнической разведки (РРТР) направлено на своевременное вскрытие противостоящей группировки, ее дислокации и боевых возможностей. Данные РРТР позволяют осуществить целенаправленное планирование применение средств радиоэлектронной борьбы в интересах подавления средств связи, и как следствие, разрушение функционирования системы управления воинскими подразделениями и формированиями [1].

В связи с этим существенно повышается роль разведзащищенности как одного из основных свойств системы связи. Под разведывательной защищенностью (разведзащищенностью) системы связи понимается свойство системы военной связи, характеризующее их способность противостоять соответствующим видам военной разведки противника [2].

Ведение противником РРТР возможно на основе обнаружения и обработки так называемых демаскирующих признаков. Под демаскирующими понимаются признаки системы связи, позволяющие обнаружить и опознать источники излучений, определить их размещение, состояние и принадлежность [3].

К основным демаскирующим признакам (ДМП) относятся: форма огибающей сигнала; спектр сигналов; вид излучения, вид модулирующего сигнала; значения параметров сигнала (несущие частоты, длительности импульса, частоты следования импульсов и др.); величина нестабильности параметров сигнала (несущей частоты, длительности импульса, периода следования); вид поляризации (линейная, круговая, эллиптическая); мощность излучения; количество излучаемых фиксированных частот и величины разноса между ними, величина девиации несущей при частотной модуляции; взаимные удаления элементов СС по пеленгам (средств, комплексов, узлов связи); площадь размещения элементов СС (узлов связи) [4-5].

В зависимости от информативности ДМП бывают мало информативными и информативными. Методика оценки разведзащищенности системы ДКМВ-радиосвязи на основе анализа ДМП может быть сведена к следующему [5]:

1. Определяется информативность демаскирующих признаков по формуле:

$$K_И^a = \frac{M - N_a}{N_a}, \tag{1}$$

где $K_И^a$ – коэффициент информативности признака а, N_a – количество объектов, обладающих признаком а, М – общее количество объектов.

2. Зная информативность демаскирующих признаков, определяется вероятность опознавания объекта

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{пер}}\left[1 - \exp(K_И^a \ln(1 - P_{\text{оп}}^{\text{тр}}))\right], \tag{2}$$

где $P_{пер}$ – вероятность перехвата источника радиоизлучения, $P_{оп}^{тр}$ – требуемая вероятность опознавания источника радиоизлучения

$$P_{пер} = \begin{cases} \dfrac{N_{прм}}{N_{ири}}, & при \quad N_{ири} < N_{\text{прм}} \\ 1, & при, \ N_{\text{ири}} \geq N_{\text{прм}}, \end{cases} \tag{3}$$

где $N_{прм}$ – количество приемников перехвата, $N_{ири}$ – количество источников радиоизлучения.

3. Определяется среднее время, необходимое для опознавания объекта (источника радиоизлучения (ИРИ)) по формуле:

$$t_{оп} = \frac{\bar{t}_{обн}}{P_{пер}\left[1 - \exp(K_И \ln(1 - P_{оп}^{тр}))\right]} \tag{4}$$

$$\bar{t}_{обн} = \frac{1}{\rho_{\text{и}}}\left(\frac{1}{P_{\text{эмд}}}\left(\frac{\bar{t}_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{и}}\beta_{и}} + \frac{\bar{t}_{\text{выд}}}{\beta_{\text{и}}}\right) + \frac{\bar{t}_{\text{пел}}}{\text{P}_{\text{пел}} P_{эмд}^{П}}\right) \tag{5}$$

$$\rho_{и} = \frac{\bar{t}_{и}}{\bar{t}_{и} + \bar{t}_{п}}; \quad \alpha_{и} = \frac{\bar{t}_{и}}{\bar{t}_{и} + \bar{t}_{выд}}; \quad \beta_{и} = \frac{\bar{t}_{и}}{\bar{t}_{и} + \bar{t}_{пел}}, \tag{6}$$

где $\bar{t}_{и}$ – среднее время работы объекта на излучение; $\bar{t}_{п}$ – среднее время паузы между излучениями; $\bar{t}_{выд}$ – среднее время выделения первичных демаскирующих признаков; $\bar{t}_{пел}$ – среднее время пеленгования объектов радиоизлучения; $\bar{t}_{пр}$ – среднее время прохода

приемником перехвата диапазона частот; $P_{пел}$ – вероятность пеленгования; $P_{эмд}^{П}$ – вероятность электромагнитной доступности объекта радиоизлучения для пеленгаторной сети; $P_{эмд}$ – вероятность электромагнитной доступности ИРИ для приемника перехвата.

Таким образом, из выражения (1) следует, что при одиночном проявлении демаскирующего признака, он обладает максимальной информативностью, т.е. при $N_a = 1$, $K_И = K_{Итах} = M - 1$. Следовательно, одиночные признаки являются явно выраженными демаскирующими признаками. Они очень информативны и опасны для средств связи, так как обеспечивают вероятному противнику быстрое опознавание средств связи, а, следовательно, и пунктов управления (ПУ).

Малую информативность имеют типовые демаскирующие признаки, т.е. признаки, которыми обладают все (многие) объекты. В этом случае согласно (1) $N_a = M$. Тогда согласно (2) $P_{оп} = 0$, т.е. такие средства связи, а значит и ПУ опознать трудно.

Из анализа выражений (1) – (4) следует, что основными направлениями обеспечения разведзащищенности системы ДКМ радиосвязи являются:

1. Уменьшение энергетической доступности источников радиоизлучения (ИРИ) для технических средств разведки противника. Действительно, уменьшение $P_{эмд}$ вызовет, согласно выражений (4) и (5), увеличение соответственно среднего времени обнаружения $\bar{t}_{об}$ и среднего времени опознавания $\bar{t}_{оп}$ источников радиоизлучений (объектов).

Таким образом, при низкой энергетической доступности обнаружить и опознать ИРИ (объекты) практически невозможно.

2. Уменьшение временной доступности ИРИ (объектов) для технических средств разведки. Уменьшение среднего времени работы ИРИ на излучение $\bar{t}_{и}$, т.е. уменьшение временного контакта ИРИ с техническим средством разведки (ТСР), приводит к уменьшению согласно выражения (6), параметров $\rho_и$, $\alpha_и$, $\beta_и$, что в свою очередь вызовет увеличение $\bar{t}_{об}$ и $\bar{t}_{оп}$ соответственно.

3. Уменьшение признаковой доступности достигается уменьшением информативности демаскирующих признаков.

Так, например, при $K_и = 0$, согласно выражения (2), распознавание ИРИ (объекта) в этом случае невозможно.

Анализ публикаций в предметной области показывает, что при существующем уровне развития средств РРТР решение задач повышения разведзащищенности только уменьшением энергетической и временной доступности средств ДКМ радиосвязи для систем РРТР практически невозможно. Необходимо проводить комплекс организационных мероприятий и технических мер, направленных не уменьшение структурной и признаковой доступности системы связи и ее элементов.

Повысить разведывательную защищенность системы ДКМ радиосвязи возможно с использованием принципов технологии MIMO и управления ее ДМП. Для возможности использования технологии MIMO для повышения разведывательной защищенности необходимо определенным образом ее адаптировать.

В общем случае узел отправителя сообщения передает свой сигнал, этот сигнал принимается получателем сообщения, а также может быть принят другими узлами в непосредственной близости. 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 (реле) для узла отправителя сообщения.

Таким образом, в общем случае такая система связи представляет собой N-ретрансляторов (отдельные ДКМ радиостанции со своими антенными системами), расположенные определенным образом в пространстве, что схематично представлено на рисунке 1. Принцип работы такой системы заключается в следующем. Одна из N радиостанций работающих в радиосети и являющаяся источником информации назначается главной. Из совокупности радиостанций радиосети, распределенных на некоторой территории, выбирается некоторое количество радиостанций ($M \leq N\text{-}1$) для ретрансляции радиосигналов главной станции. Структура рассматриваемой системы является переменной и изменяется в зависимости от расстояния до абонента, состояния канала связи, оперативной обстановки, важности передаваемой информации и других условий связи.

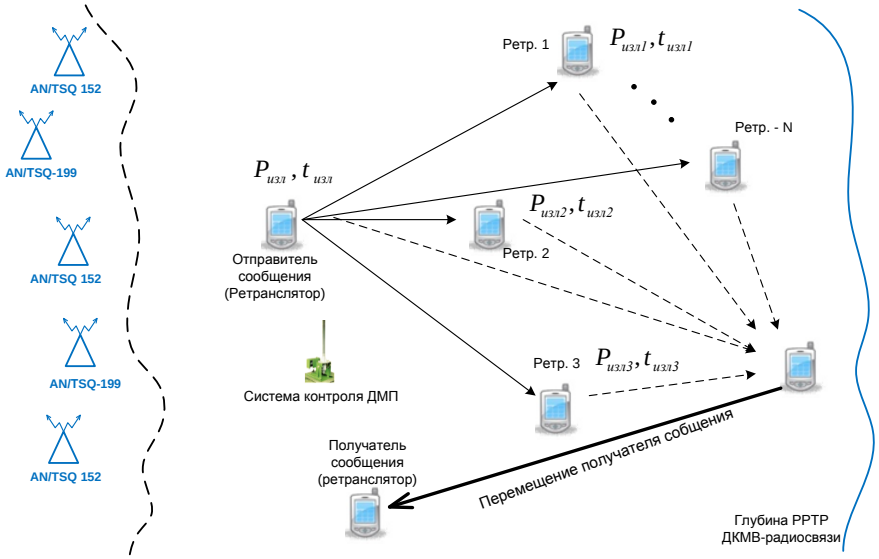


Рис. 1. Принцип применения технологии MIMO для организации ДКМ радиосвязи

Выбор количества и пространственного расположения ретрансляторов – излучателей из общей совокупности M может быть осуществлен по следующей методике.

На основе разведывательных данных о противнике формируют модель системы ДКМ радиосвязи с ДМП ее элементов до начала функционирования. С использованием модели системы связи имитируют возникновение ДМП элементов системы связи, процессы их обнаружения и распознавания, моделируют появление демаскирующих признаков элементов системы связи, таких как узлов связи, линий и каналов связи, образованных элементами системы MIMO, на основе имитации различных мощностей и времени излучения отдельных элементов (рисунок 1). На их основе рассчитывают значения показателей разведзащищенности системы ДКМ радиосвязи на основе предложенной методики и сравнивают с требуемым значением. В случае несоответствия показателя разведзащищенности требуемому значению реконфигурируют моделируемую систему связи и заново имитируют процесс ее функционирования. По результатам моделирования системы связи определяют также набор минимально необходимых элементов системы связи (количество ретрансляторов).

В случае выполнения требований по разведзащищенности развертывают реальную систему ДКМ радиосвязи, на которой контролируют значения параметров ДМП, на основе которых рассчитывают и сравнивают показатель разведзащищенности реально функционирующей системы связи с требуемым значением, в случае невыполнения требования реконфигурируют функционирующую систему связи. Реализовать контроль

ДМП подобной системы радиосвязи возможно с использованием технологии аппаратно-программных комплексов технического контроля декаметровых радиолиний, на основе многоканальных радиоприемных устройств, построенных на SDR-технологиях [7].

Таким образом, использование технологии MIMO и способ управления ДМП подобной системы позволяет повысить реальную разведывательную защищенность системы ДКМ радиосвязи.

Библиографический список

1. Макаренко, С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство. – 2013. – 166 с.

2. Ермишян, А.Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Ч. 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи / А.Г. Ермишян. − ВИ: ВАС. – Санкт-Петербург. – 2005. – 740 с.

3. Горняк, В.Н. Статистическая теория ценности в задачах радиоразведки и безопасности связи / В.Н. Горяник, Л.М. Перерва, В.В.Юдин. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2005. – 202 с.

4. Меньшаков, Ю.К. Защита объектов и информации от технических средств разведки / Ю.К. Меньшаков. – М.: Российск. гос. гуманит. ун-т. – 2002. – 399 с.

5. Меньшаков, Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок / Ю.К. Меньшаков. – М.: МГТУ им. Баумана. – 2011. – 646 с.

6. Клочко, В.А. Обеспечение разведзащищенности объектов / В.А. Клочко, В.Н. Сабынин // ИНФОРМОСТ. Радиоэлектроника и Телекоммуникации. – 2001. – № 2(15). – С.14-18.

7. Жолдасов, Е.С. Аппаратно-программный комплекс технического контроля декаметровых радиолиний / Е.С. Жолдасов, Г.А. Жуков, Н.П. Будко // Мониторинговые системы. – 2013. – № 3. – С. 2427.

Ajuush Nasanzhargal, A.I. Kaz'min

METHOD INCREASING OF SECURITY INTELLIGENCE SYSTEM HF RADIO COMMUNICATION IS BASED ON PRINCIPLES OF MIMO TECHNOLOGY AND ITS CONTROL TELLTALE SIGNS

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

In this paper a methodology for assessment of security intelligence HF radio system is presented. The basic directions of its increase. A method for providing security intelligence HF radio communication system is based on MIMO technology principles is presented.

Keywords: HF**,** telltale signs, intelligence security

УДК 621.3.049.776

А.В. Пилькевич, К.С. Фомина, В.Д. Садков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ ПЛЕНОЧНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММЕ ELCUT

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Строгим методом конформных отображений проведено математическое моделирование лазерной подгонки пленочных поглощающих элементов СВЧ аттенюаторов по ослаблению и входному (выходному) сопротивлению с учетом реальных размеров лазерных резов и последовательности их введения. Модель позволяет получить всё множество решений, отличающихся длиной и шириной центрального реза и длиной подрезки заземленных контактов. Точность подгонки, производительность и выход годных в предложенной модели существенно снижаются.

Ключевые слова: пленочный поглощающий элемент, лазерная подгонка, моделирование с учетом толщины лазерного реза

Пленочные поглощающие элементы (ПЭ) в виде прямоугольных диэлектрических пластин с нанесенной на них резистивной пленкой широко используются в волноводных, коаксиальных и микрополосковых аттенюаторах [1-6]. Качество ПЭ и устройств на их основе существенно зависит от точности воспроизведения входного (выходного) сопротивления $R_{вх}$ (Ом) и ослабления g (дБ). Снижение разброса по $R_{вх}$ и g , обусловленного технологическими погрешностями изготовления, обеспечивается лазерной подгонкой [7], заключающейся во введении прорези симметрично вдоль оси y длиной c и шириной $2e \geq 0$, а также подрезке заземленных контактов на длину f с каждой стороны [8].

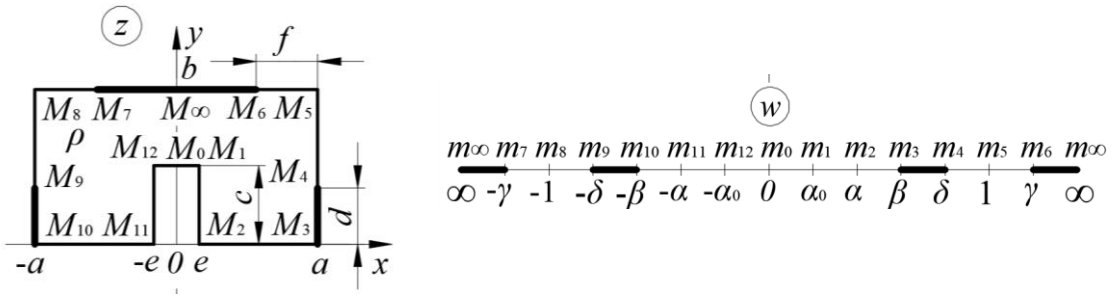
В основе методики подгонки лежит П-образная схема замещения с сопротивлением R_{13} в горизонтальном и $R_{12} = R_{23}$ в вертикальных плечах, причем введение тонкой центральной прорези оказывает влияние на R_{13} , а подрезка заземленных контактов на R_{13} и R_{12} одновременно. Поэтому подрезкой контактов обеспечивают требуемые R_{12} и R_{23} , а введением центральной прорези R_{13} [8, 9]. В случае конечной ширины лазерного реза, что актуально для современных и перспективных малогабаритных ПЭ, и подрезка заземленных контактов и центральная прорезь оказывают влияние сразу на R_{13} и R_{12} , что затрудняет подгонку. Использование только экспериментальных данных из-за ограниченного их объёма оказывается недостаточным для полного анализа процесса подгонки. Требуется построение математической модели лазерной подгонки, которому и посвящена настоящая работа.

Методика расчета

Задача решается методом конформных отображений [9]. Топология несимметричного ПЭ представлена на рис. 1,а. Линии M_9M_{10}, M_3M_4 и M_6M_7 – входной, выходной и заземленный контакты соответственно. В большинстве случаев используются симметричные относительно оси x ПЭ, расчет которых сводится к расчету несимметричных ПЭ с уменьшенным вдвое удельным поверхностным сопротивлением резистивной пленки.

Отображаем многоугольник $M_1M_2M_3M_5M_8M_{10}\ M_{11}M_{12}$ в плоскости z (рис.1,а) на верхнюю полуплоскость $Imw \geq 0$ с указанным на рис. 1,б соответствием точек с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [9]:

$$z = A\int_0^w \sqrt{(w^2-\alpha_0^2)/(w^2-\alpha^2)(w^2-\beta^2)(w^2-1)}\,dw. \qquad (1)$$



а) б)

Рис.1. Пленочный ПЭ с центральной прорезью размерами 2*e*,*c* и длиной *f* подрезки заземленного контакта в плоскости *z* (а) и его отображение на верхнюю полуплоскость *Imw*≥ 0 (б)

В случае симметричного ПЭ нижняя часть (при y ≤ 0) отображается на нижнюю полуплоскость *Imw* ≤ 0 с тем же соответствием точек.

Константы α_0, α, β определяются из системы уравнений

$$e/c = I_1/I_2,\ e/(a-e) = I_1/I_3,\ c/(a-e) = I_2/I_3, \qquad (2)$$

$$I_1 = A\int_0^{\alpha_0} \sqrt{(\alpha_0^2 - w^2)/(\alpha^2 - w^2)(\beta^2 - w^2)(1-w^2)}\,dw,$$

$$I_2 = A\int_{\alpha_0}^{\alpha} \sqrt{(w^2 - \alpha_0^2)/(\alpha^2 - w^2)(\beta^2 - w^2)(1-w^2)}\,dw,$$

$$I_3 = A\int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(w^2 - \alpha_0^2)/(w^2 - \alpha^2)(\beta^2 - w^2)(1^2-w^2)}\,dw,$$

Гиперэллиптические интегралы $I_1 - I_3$ вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей степени точности после приведения интервалов интегрирования к стандартному (-1, 1) и выделению особенностей в весовую функцию $1/(1- w^2)^{1/2}$ [10]:

$$\int_{-1}^{1} \frac{g(w)dw}{\sqrt{1-w^2}} \cong \frac{\pi}{N}\sum_{n=1}^{N} g\left(\cos\frac{2n-1}{2N}\pi\right).$$

После определения констант $\alpha_1 - \alpha_3$ величина α_4 находится их уравнения

$$\frac{d}{b} = \frac{\int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \sqrt{(w^2 - \alpha_1^2)/(w^2 - \alpha_2^2)(w^2 - \alpha_3^2)(1-w^2)}\,dw}{\int_{\alpha_3}^{1} \sqrt{(w^2 - \alpha_1^2)/(w^2 - \alpha_2^2)(\alpha_3^2 - w^2)(1-w^2)}\,dw}$$

Для параметров схемы замещения симметричной относительно оси *x* структуры ПЭ рис. 1,а получаем [9]:

$$R_{12} = R_{23} = \frac{\rho}{2}\frac{K'(m_1)}{K(m_1)},\ m_1^2 = \frac{\beta^2}{\gamma^2}\frac{(\gamma^2-\delta^2)}{(\gamma^2-\beta^2)},\ R_{13} = \rho\Big/\left[\frac{K'(m)}{K(m)} - \frac{K(m_1)}{K'(m_1)}\right],\ m^2 = \frac{\delta^2-\beta^2}{\gamma^2-\beta^2}, \qquad (3)$$

где ρ - удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки; $K(m)$ и $K(m_1)$ – полные эллиптические интегралы 1-го рода модуля m и m_1 соответственно; $K'(m)$ и $K'(m_1)$ – полные эллиптические интегралы 1-го рода дополнительного модуля $m' = (1-m^2)^{1/2}$ и $m_1' = (1- m_1^2)^{1/2}$.

В частном случае узкой прорези $e = 0$ $\alpha_0 = 0$ и интеграл (1) приводится к виду [11]:

$$z-(a+ib)=A\int_1^w \frac{wdw}{\sqrt{(w^2-\alpha^2)(w^2-\beta^2)(w^2-1)}}=\frac{A}{\sqrt{1-\alpha^2}}F\left(\arcsin\sqrt{\frac{w^2-1}{w^2-\beta^2}},k\right), \quad (4)$$

где A – константа отображения; $F(\varphi, k)$ – эллиптический интеграл 1-го рода аргумента φ и модуля $k = [(\beta^2 - \alpha^2)/(1 - \alpha^2)]^{1/2}$.

Из соответствия точек $z = ib$ и $w = \infty$ получаем $A = -a(1 - \alpha^2)^{1/2}/K$, где K – полный эллиптический интеграл 1-го рода модуля k.

Обращая (4) и используя далее эллиптические функции Якоби, получаем:

$$\sqrt{\frac{w^2-1}{w^2-\beta^2}}=\mathrm{sn}\left[\left(1+\frac{ib-z}{a}\right)K,k\right]. \quad (5)$$

Из соответствия точек $z = a$ и $w = \beta$ следует соотношение для определения K и k:

$$b/a = K'/K, \quad (6)$$

где K и K' - полные эллиптические интегралы 1-го рода модуля k и $k' = (1-k^2)^{1/2}$.

Соотношение (5) с учетом условия (6) перепишем в виде

$$\sqrt{\frac{w^2-1}{w^2-\beta^2}}=\mathrm{dn}(zK/a,k)/k\mathrm{cn}(zK/a,k).$$

Из соответствия точек $z = ic$ и $w = 0$, $z = e$ и $w = \alpha$, $z = (a-f)+ib$ и $w = \gamma$, $z = a + id$ и $w = \delta$, $z = e + ic$ и $w = \alpha_0$ получаем [11]:

$$\alpha_0=\frac{\sqrt{1-\beta^2\mathrm{sn}^2\{[1-e/a+i(b-c)/a]K,k\}}}{\mathrm{cn}\{[1-e/a+i(b-c)/a]K,k\}},\ \alpha=\frac{\sqrt{\beta^2-k^2\mathrm{sn}^2[(1-e/a)K,k]}}{\mathrm{dn}[(1-e/a)K,k]},$$

$$\delta=\frac{\sqrt{\beta^2-k^2\mathrm{sn}^2[(d/b)K',k']\mathrm{sn}^2[(c/b)K',k']}}{\mathrm{dn}[(d/b)K',k']},\ \gamma=\frac{\sqrt{1-\beta^2\mathrm{sn}^2[(f/a)K,k]}}{\mathrm{cn}[(f/a)K,k]}, \quad (7)$$

$$\beta=\mathrm{dn}[(1-c/b)K',k'].$$

Как видно, параметр β зависит только от длины прорези; α_0, α, δ – от длины и ширины прорези; γ – от длины как прорези, так и подрезки заземленных контактов. При $e = f = c = 0$ $\beta = k$, $\alpha_0 = \alpha = 0$, $\gamma = 1$, $\delta = k/\mathrm{dn}(dK'/b, k')$ и соотношения (3) приводятся к известным [8]:

$$R_{вх}=\frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{K'(m)K(m_1)}{K(m)K'(m_1)}},\ q=20\lg\left[1+2\Big/\left(\sqrt{\frac{K'(m)K'(m_1)}{K(m)K(m_1)}}-1\right)\right], \quad (8)$$

$$m=\mathrm{cn}[(1-p)K',k'],\ m_1=\mathrm{cn}(pK',k'),\ p=d/b.$$

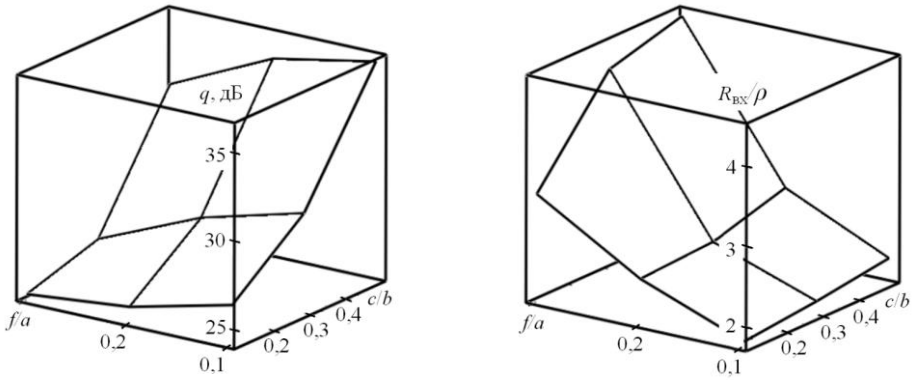
При b/a ≥ 3 $R_{вх}=(\rho/2)\sqrt{(1-p)/p}$ и $q=8{,}68/[\sqrt{(1-p)p}(b/2a)]$ дБ.

При (b-c)/a ≤ 1/3 $R_{вх}=(\rho/2)K'(\sin\pi p/2)/K(\sin\pi p/2)$ и $q=8{,}68\pi a/b$ дБ.

В другом частном случае $f = 0$, $e = a$ и $c < d$ $\alpha_0 = \alpha = \beta$ и для входного сопротивления и ослабления справедливы соотношения (8) при замене d и b на $d - c$ и $b - c$.

Введение узкой ($e \approx 0$) прорези эквивалентно увеличению длины a исходного ПЭ без прорези в $K'(t)/K(t)$ раз при прежних размерах d и b, t = dn[(1-c/b)K', k']. Параметры K', k' находятся из соотношения $K'/K = b/a$.

Результаты моделирования для ПЭ при b/a = 1 приведены на рис. 2 и показывают влияние вводимых прорезей. Подгонка на 10- 15 % по ослаблению и входному сопротивлению обеспечивается введением прорезей c/b и f/a, не превышающих 7 %.



а) б)

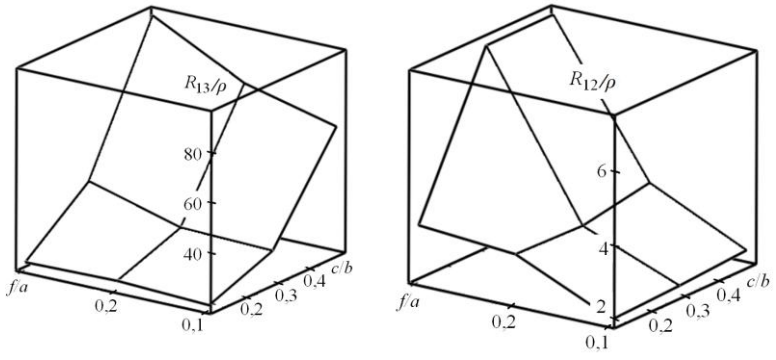
Рис.2. Зависимость ослабления (а) и нормированного входного сопротивления (б) от *f/a* и *c/b* при *b/a* = 1, *d/b* = 0,5 и *e/a* = 0,2.

Задача подгонки имеет единственное решение только при $e = 0$. По заданным величинам $R_{вх}$, g определяются величины R_{13} и R_{12}, m, m_1 и константы β, γ и δ:

$$R_{13} = R_{вх}(A^2-1)/(2A),\ R_{12} = R_{23} = R_{вх}(A+1)/(A-1),\ A = U_{вх}/U_{вых} = 10^{q/20},$$

$$\beta = mm_1/(m'm_1'),\ \delta = m_1/m_1',\ \gamma = 1,\ m_1' = (1-m_1^2)^{1/2},\ m' = (1-m^2)^{1/2}.$$

При $e \neq 0$ множество решений находится следующим образом. Для любого выбранного $\beta < 1$ (задает длину прорези c) определяются величины $\delta = \beta m'/m_1'$,
$\gamma = \delta m_1'/m = \beta m'm_1'/(mm_1)$, а выбором параметров α_0 и α из условия $0 \le \alpha_0 < \alpha < \beta$ находится всё множество решений задачи подгонки с различными размерами прорези и длинами подрезки заземленных контактов. Зависимости нормированных величин R_{13}/ρ и R_{12}/ρ от размеров прорезей для частного случая b/a = 1, d/b = 0,5 приведены на рис. 3. Величины R_{13}/ρ и R_{12}/ρ зависят от всех параметров подгонки (f/a, c/b, e/a), причем для коротких ПЭ ($b/a > 5$) зависимости выражены резче.



а) б)

Рис.3. Зависимость нормированных величин R_{13}/ρ (а) и R_{12}/ρ (б) от от *f/a* и *c/b* при *b/a* = 1, *d/b* = 0,5 и *e/a* = 0,2.

Параметры R_{13} и R_{12} в реальном образце ПЭ определяются путем замыкания соответствующих контактов, при этом в симметричном ПЭ необходимо обеспечить симметрию вводимых прорезей и электрическую симметрию. По измеренным значениям R_{13} и R_{12} с помощью предложенной модели определяются параметры подгонки *f/a* и *c/b* при значении *e/a*, не меньшем диаметра лазерного пятна. Подрезка заземленных контактов для обеспечения требуемого значения R_{12} проводится с учетом последующего его увеличения за счет введения центральной прорези для получения требуемого R_{13}.. При $e/a \geq 0$ точность подгонки, её производительность и выход годных без учета выявленных связей существенно снижаются.

Работоспособность методики проверена моделированием в отечественном программном комплексе *Elcut* и подгонкой образцов навесных ПЭ микрополосковых аттенюаторов габаритов 2х2 и 1х1 мм.

Заключение

Построена математическая модель лазерной подгонки ПЭ для коаксиальных, полосковых и микрополосковых аттенюаторов по ослаблению и входному (выходному) сопротивлению с учетом реальных размеров лазерных резов и последовательности их введения. Показано, что задача имеет единственное решение только в случае тонкого лазерного реза. При конечной ширине реза модель позволяет получить всё множество решений, отличающихся длиной и шириной центрального реза и длиной подрезки заземленных контактов. Приведены зависимости ослабления, нормированного входного сопротивления и параметров П-образной схемы замещения, используемой при подгонке, от размеров лазерных резов. Отмечено, что подгонка невозможна без учета выявленных зависимостей параметров схемы замещения. Работоспособность предложенной методики проверена моделированием в программном комплексе *Elcut* и экспериментами на реальных образцах малогабаритных ПЭ.

Библиографический список

1. Львов А.Е., Рудоясова Л.Г., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Тонкопленочные полосковые аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014, № 5, с. 40 – 46.
2. Шишков Г.И. Широкополосные фиксированные аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011, № 1, с. 110 – 114
3. Чижиков С.В. Анализ тенденций развития чип-резистивных СВЧ-аттенюаторов // Успехи современной радиоэлектроники, 2017, № 8, с. 36 - 42.
4. Гошин Г.Г.. Екимов С.Ю.. Семибратов В.П.. Фатеев А.В. Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенюаторов СВЧ-сигналов // Доклады ТУСУР, 2011, № 3 (24), с. 223 – 226.
5. Бажилов В.А., Михалицын Е.А. Проектирование малогабаритных аттенюаторов с малым уровнем ослабления // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2014, т. 17, № 1, с. 54 – 63.
6. Седаков А.Ю. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления/ А.Ю. Седаков, В.К. Смолин. - М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
7. Кондрашов В.В. Задача автоматизации процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1. Вып. 2, с. 207 - 214.
8. Садков В.Д. Расчет и юстировка тонкопленочных звеньев затухания // Известия вузов СССР – Радиоэлектроника, 1977, т. XX, № 9, с. 115 – 118.
9. Ямпурин Н.П., Широков Л.В., Садков В.Д., Потехин В.А. Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. - Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.
10. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.
11. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971. – 1108 с.

A. V. Pilkevich, K.S. Fomina, V.D. Sadkov

MODEOLING OF PROCESS OF LASER MATCHING OF THE FILM ABSORBING ELEMENTS IN EKCUT

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The method of the conformal mappings has carried out mathematical modeling of laser adjustment of the film absorbing microwave ovens elements of attenuators on easing and input (output) resistance taking into account the real sizes of laser cuts and the sequence of their introduction. Taking into account the identified dependencies allows to improve in the proposed model the accuracy of fit, performance and yield.

The operability of the technique is checked by modeling in the domestic program Elcut complex and also adjustment of real samples of the small-sized hinged absorbing elements of microstrip attenuators.

Keywords: film absorbing element, laser adaptation, modeling taking into account laser cutting thickness, laser trimming, modeling.

УДК 621.317

А.Ю. Пугачев

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ярославское высшее военное училище ПВО

Приведено обоснование целесообразности повышения уровня автоматизации технического диагностирования радиоэлектронной аппаратуры. Показаны основные направления автоматизации и недостатки известных подходов и методов информационной поддержки процесса диагностирования. Предложен способ построения единой диагностической модели радиоэлектронной аппаратуры с применением формализованной концептуализации. Рассмотрены решаемые задачи формирования модели на каждом этапе.

Ключевые слова: диагностическая модель, радиоэлектронная аппаратура, система поддержки принятия решений, автоматизация, формализованная концептуализация.

В процессе эксплуатации сложных технических комплексов обслуживающий персонал сталкивается с нештатными ситуациями, которые связаны с нарушением функционирования радиоэлектронной аппаратуры, входящей в состав этих комплексов. В основе этих нарушений лежат различные факторы, обусловленные особенностями конструкции, сборки и эксплуатации комплексов в процессе их жизненного цикла. Отыскание и устранение причин возникающих в аппаратуре неисправностей составляют одну из важных целей проведения диагностирования. Этот процессследует охарактеризовать как трудно автоматизируемый, поскольку он включает в себя набор разнородных процедур, последовательностьвыполнения которых определяется обслуживающим персоналом. Наиболее типичными диагностическими процедурами являются:

определение диагностических признаков неисправностей – признаков, наличие которых характеризует нарушение в аппаратуре, – на основе противопоставления эталонному признаковому описанию аппаратуры;

составление совокупности диагностических признаков для формирования диагностического портрета, а также поиск взаимовлияний и взаимозависимостей признаков неисправностей;

анализ диагностического портрета и принятие решения о вероятных месте и причине отказа.

Для повышения эффективности процесса диагностирования радиоэлектронной аппаратуры широко применяются средства автоматизации информационной поддержки, влияющие на сокращение времени выполнения отдельных операций диагностирования. Основным назначением таких средств автоматизации является автоматизированное определение эталонных значений диагностических параметров, которые используются при контроле диагностических признаков, связанных с полученным сигналом отказа. Признаки исправной аппаратуры характеризуются номинальными диагностическими параметрами, которые хранятся в базе данных средств автоматизации и становятся доступными по запросу обслуживающего персонала. Общий временной выигрыш от использования средств такого типа по сравнению с традиционными способамидиагностирования проиллюстрирован на рисунке 1 и состоит в сокращении времени $T_{контр.испр.}$, отводимого на контроль диагностического признака для исправной аппаратуры, так как:

$$T_Д = T_{авар.сиг.} + T_{ДПр.связ.} + T_{контр.реал} + T_{контр.испр.} + T_{сост.ДП} + T_{опр.МПО} + T_{ПР}. \quad (1)$$

В связи с этим следует отметить методы и средства информационной поддержки на основе формализованных концептуальных моделей радиоэлектронной аппаратуры [1].

Эффективность применения таких методов обусловлена представлением аппаратуры в пространстве признаков с помощью предметных терминов и понятий, которые приводятся в конструкциях естественного языка. Подобное представление позволяет достаточно свободно формировать запросы к средствам автоматизации, а также получать ответы на запросы в форме конструкций на естественно-подобном языке.

Однако, упомянутые методы не позволяют автоматизировать весь процесс диагностирования, так как имеют существенное ограничение, которое связано с тем, что формируемые признаки описывают исключительно исправное состояние радиоэлектронной аппаратуры. Такое описание используется в качестве вспомогательного в операции4 (см. рисунок 1б), что способствует определению места возникновения неисправности лишь косвенно [2].Упомянутые методы, несмотря на сокращение времени выполнения отдельных операций диагностирования, не позволяют автоматизировать непосредственно саму операцию 6 определения места и причины неисправности. Это приводит к противоречию в науке, которое состоит в том, что существует необходимость комплексной автоматизации процесса диагностирования радиоэлектронной аппаратуры сложных технических комплексов, направленного на определение места и причины возникновения неисправностей, при этом отсутствует научно-методический аппарат для решения данной научной задачи.

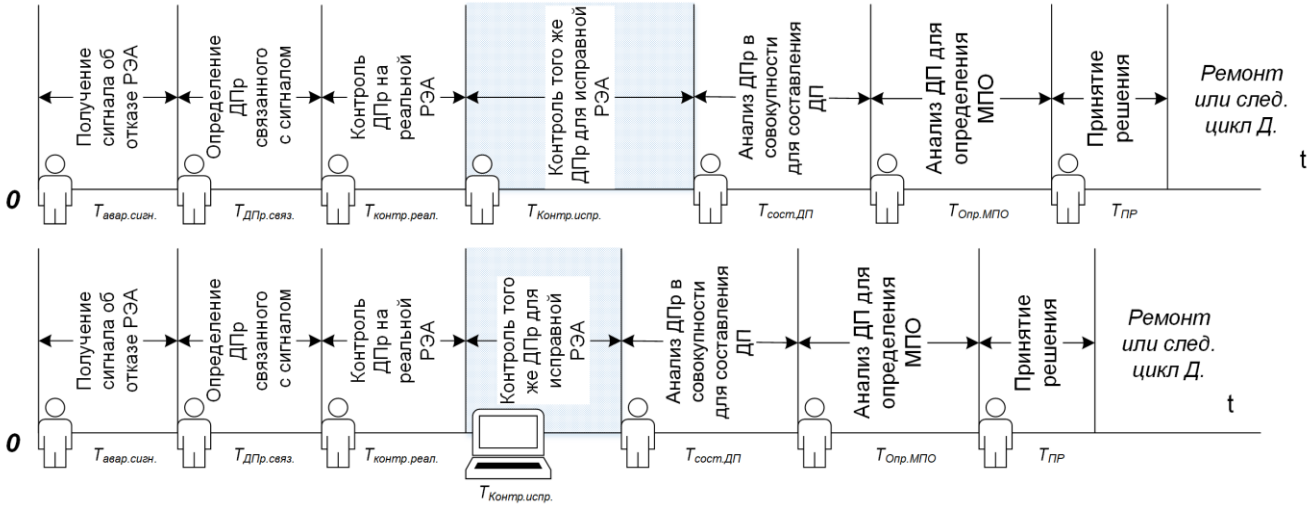


Рис. 1. Временная диаграмма процесса диагностирования:
а) силами обслуживающего персонала традиционными методами,
б) силами обслуживающего персонала с использованием концептуальных моделей

В настоящее время на практике часто применяется комбинированный подход к проведению процесса диагностирования, заключающийся в использовании средств автоматизации для контроля диагностических признаков, и выполнении вручную операций, направленных на формирование потребного диагностического портрета, анализ взаимосвязей и взаимовлияний признаков неисправностей, а также на постановку технического диагноза– процесс принятия решения о вероятных местах и причинах возникновения неисправностей.

В данной работе предлагается способ формирования диагностической модели, обеспечивающий интегрированное представление радиоэлектронной аппаратурыблагодаря единому концептуальному подходу дляих описания в предметных терминах и понятиях. Формализация концептуального представления признаков, описывающих аппаратуру, определяет возможности использования такой модели в средствах автоматизации, что позволит повысить уровень автоматизациидиагностических процедур, направленных непосредственно на определение вероятного места и причины неисправности, а также сократить общее время выполнения процесса диагностирования аппаратуры.

Для определения общей структуры концептуальной диагностической модели целесообразно выделить 2 класса диагностических признаков по критерию описываемого технического состояния:признаки описания исправной аппаратуры и диагностические признаки, описывающие неисправность.

Критерием технического состояния следует также руководствоваться для выделения двух информационных каналов, или двух ветвей представления аппаратуры, при определении общей структуры построения диагностической модели. Первый информационный канал определяет последовательность операций, связанных с формированием представления аппаратуры в исправном состоянии, и предназначен для формирования базового многоаспектного представления аппаратуры на основе признаков неисправностей. Признаки данного типа могут быть востребованы при проведении вспомогательных диагностических процедур, а информационный канал позволяет построить диагностическую модель в «неявной» форме[3].

Действия во втором канале направлены на формирование концептуального описания неисправного состояния аппаратуры, которые в эксплуатационной документации на КСН [4] преимущественно характеризуются признаками неисправностей и связанной с ними причиной. Эта связь позволяет решать задачу автоматизации определенияместа и причины неисправности в процессе диагностирования, что позволяет рассматривать второй информационный канал в качестве основы для построения явных диагностических моделей радиоэлектронной аппаратуры [2, 5].

Следует отметить, что оба информационных канала, поэтапно решая автономные задачи представления данных об аппаратуре в виде формальных конструкций, в совокупности формируют упорядоченноеконцептуальное описаниеаппаратуры в предметных терминах и конструкциях. В результате решения этих задач формируется единая формализованная концептуальная диагностическая модель радиоэлектронной аппаратуры, как показано на рисунке 2.

Процесс формирования данной модели выполняется для каждого канала в несколько этапов:

уровень формирования исходных данных;
уровень первичного лексического анализа;
уровень формального представления;
уровень семантического представления;
уровень объектно-предикатной интеграции.

На уровне формирования исходных данных решается задача сбора начальной информации, составляющей описание аппаратуры, для дальнейшего анализа и обработки. Важным источником исходных данных, используемых при проведении диагностирования радиоэлектронной аппаратуры, выступает комплект эксплуатационной документациина комплекс специального назначения или его составную часть. Документация, в зависимости от уровня разукрупнения, может состоять из следующих частей:инструкция по эксплуатации, техническое описание, комплект электрических схем и руководство по эксплуатации.

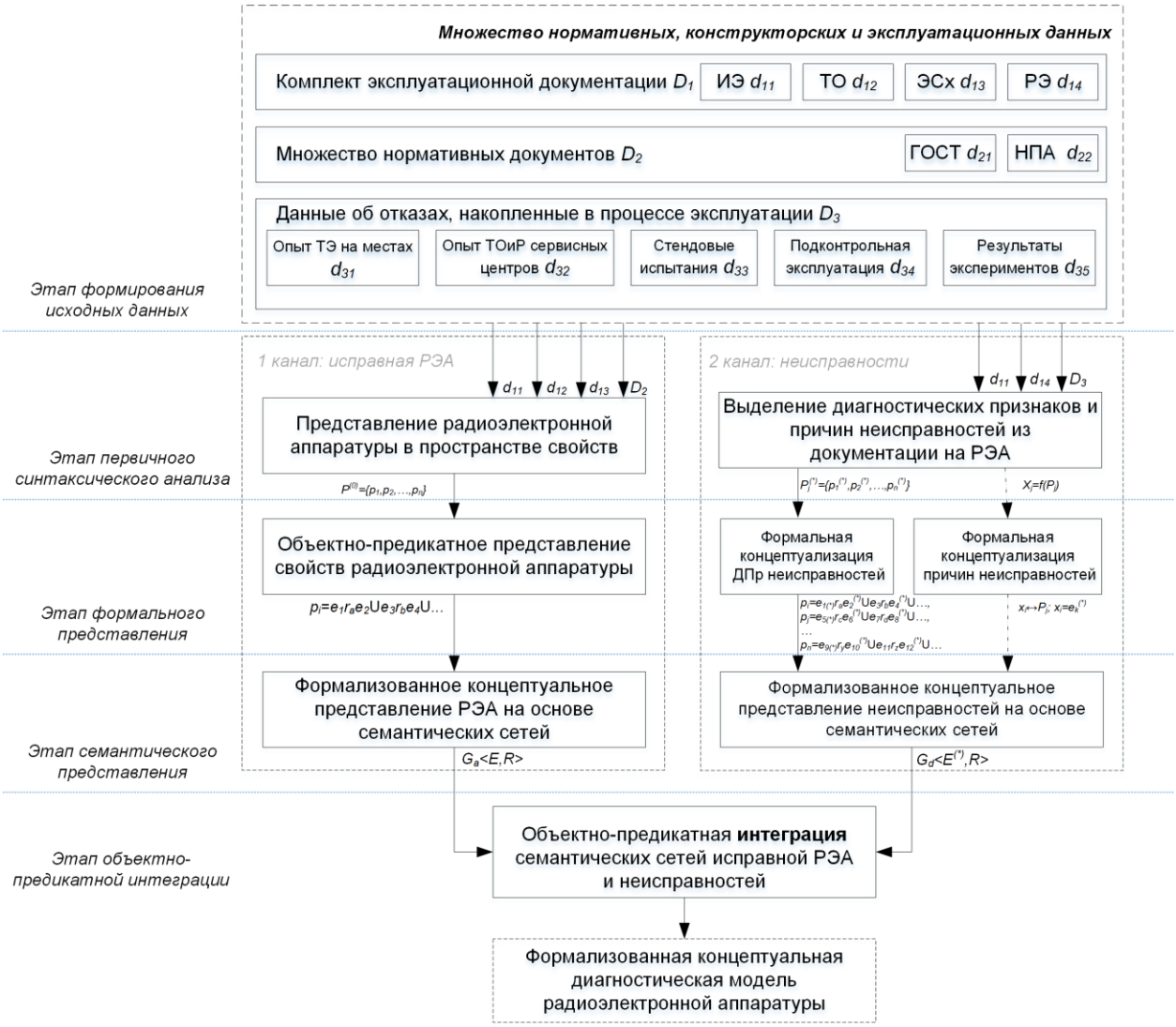


Рис. 2. Общая структура построения диагностической модели РЭА

Для решения задачи этапа формирования исходных данных следует условно разделить все сведения об аппаратуре на 2 основных информационных канала, руководствуясь критерием описываемого технического состояния. В таком случае некоторые виды документов из состава документации будут отнесены к первому каналу (исправное состояние), некоторые – ко второму (неисправности), в отдельных случаях документация содержит информацию для обоих каналов.

Таким образом, процесс подготовки исходных данных для формирования диагностической модели состоит в сборе сведений различного характера об аппаратуре и их поканальном разделениина описание исправной аппаратуры$K^{(0)}$ и описание неисправностей$K^{(*)}$.

На этапе первичного лексического анализа решается задача разбиения сведений об аппаратуре, представленных на естественном языке, на множество фраз и словосочетаний, содержащих многоаспектного описания аппаратуры и неисправностей в виде свойств. Полученные множества, в зависимости от назначения информационного канала, формируют соответственно пространство $P^{(0)}$ свойств p исправной аппаратуры и пространство $P^{(*)}$ неисправностей, также описываемое свойствами $p^{(*)}$ на естественном языке.

Для исправной аппаратуры сведения $K^{(0)}$ на естественном языке представлены в виде повествовательных предложений детерминированной структуры, которая может быть представлена в расширенной форме Бекуса-Наура [6] в следующем виде:

Предложение:=[объект] обладает [характеристика] {союзное_слово обладает [характеристика]}.

Приведенная форма описания, встречающаяся в документации на технический комплекс, не может быть подвержена прямой формализованной концептуализации и подлежит первичному лексическому преобразованию, результатом которого выступает набор высказываний в объектно-предикатной форме:

Фраза:=[объект] предикат [признак].

Такое высказывание составляет базовое свойство аппаратуры, приведенноена естественном языке.

Таким образом, каждая фраза предложения может быть приведена к объектно-предикатной форме и характеризовать аппаратуру в качестве базового свойства$p_i^{(0)}$. Подобная первичная интерпретация применима к любому источнику информации об исправной аппаратуре, в результате которой может быть получено множество свойств аппаратуры:

$$P^{(0)} = \{p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, ..., p_n^{(0)}\}, \quad (2)$$

где $p_i^{(0)}$ – i-ый элемент описания аппаратуры на естественном языке.

Для выполнения задачи первичного лексического разбора данных для информационного канала неисправной аппаратуры проведен анализ источников $K^{(*)}$, результатом которого являетсяналичие в этих сведениях детерминированной структуры.

Причинно-следственную связь в предложениях такого вида целесообразно разделить на диагностические признаки неисправностей и их причины[7]:

Предложение:=[Призн_Неиспр1]{союзное_слово обладает [Призн_Неиспр2]}[связан_с][Причина_Неиспр1]{«или» [Причина_Неиспр2]}.

В процессе приведения признаков и причин неисправностейк объектно-предикатной форме могут иметь место неоднозначности высказыванияна естественном языке, связанные с наличием в одном предложении нескольких вероятных мест и причин неисправности [8].Для снятия таких неоднозначностей целесообразно прибегнуть к разбиению предложения на несколько языковых конструкций по количеству вероятных причин неисправностей:

Предложение1:=Фраза_Призн1{и Фраза_Призн2}[связан_с][Фраза_Причина1],

Предложение2:=Фраза_Призн1 {и Фраза_Призн2}[связан_с][Фраза_Причина1];

где:

Фраза_Призн:= [объект] предикат [признак_нарушения];

Фраза_Причина:= [объект] предикат [признак_нарушения].

Приведенные предложения разрешают неоднозначность этой связи, , что приводит к формированию 4 свойств (по фразам), описывающих неисправное состояние аппаратуры.Подобная операция применима к любому источнику информации о неисправностях, в результате которой может быть получено множество свойств аппаратуры на естественном языке:

$$\begin{aligned} P^{(*)} &= \{p_1^{(*)}, p_2^{(*)}, ..., p_n^{(*)}\}, \\ X_j^{(*)} &= f(P^{(*)}); \end{aligned} \quad (3)$$

где $X_j^{(*)}$ – причина неисправности; $P_i^{(*)}$ – диагностический портрет, состоящий из признаков неисправностей $p_1^{(*)}, p_2^{(*)}, ..., p_n^{(*)}$.

Следует отметить, что такое приведение позволяет перейти к формализованному концептуальному представлению радиоэлектронной аппаратуры в виде свойств, что составляет задачу уровня формального представления.

Переход к концептуальной формализации становится возможен благодаря наличию в модели следующих механизмов:многоаспектность описания аппаратуры, дискретнаяформализация описания и типизация бинарных отношений.

Многоаспектность описания состоит в том, что аппаратура может быть представлена конечным множеством $\bar{E}$ элементов описания, каждый из которых относится к одному из нескольких аспектов[9]:структурный E_s, функциональный E_f, параметрический $E_П$, а также некоторые другие аспекты.

Дискретная формализация позволяет представить описание всякой аппаратуры в виде *n*-мерного вектора, где *n*–количество аспектов описания аппаратуры.

Типизация бинарных отношений состоит в наделении всякого предиката r_iв свойстве p_jсемантической связью определенного типа с признаком e_m, которым характеризуется объектеe_k.

Таким образом, в результате выполнения формализованного концептуального представления совокупность свойств $P^{(0)}$, характеризующих исправную аппаратуру на основе информации из канала $K^{(0)}$ может быть выражена в виде множества бинарных отношенийвида $p_i^{(0)} = e_a r_b e_c$.

Для формализации неисправностей в канале $K^{(*)}$такая запись является справедливой, так как описание неисправного состояния аппаратуры отражает нарушение исправного. Отличие формального представления неисправностей в создаваемой диагностической модели состоит в наличии дополненного описания отклонения от нормы, однако отношения между элементами этого описания базируются на существующих типизированных отношениях, что соответствует объектно-предикатной форме на естественном языке.

Наличие множественных связей между объектами и признаками, а также строгость их типизации позволяет выполнить полное описание признаков исправной аппаратуры на основе семантической сети, что составляет задачу уровня семантического представления.Такой способ формализованного концептуального представления радиоэлектронной аппаратуры имеет вид ориентированного графа G, вершины которого соответствуют объектам на основе предметных понятий $\bar{E}$, а ребра задают отношения $\bar{R}$ [10].

Для информационного канала $K^{(0)}$формирование концептуального семантического представления связано с выполнением следующих действий:

построение множества вершин графа G_a, соответствующего множеству элементов многоаспектного описания аппаратуры;

соединение вершин графа G_a дугами, а также их типизация с учетом имеющихся данных о бинарных отношениях, связанных с признаками описания аппаратуры.

Особенность построения семантической сети G_d информационного канала неисправностей состоит в том, что признак, описывающий нарушение, представляется в виде сателлита «родительского» признака, описывающего исправное состояние аппаратуры. Поэтому для семантического представления вершины $\text{п}_2^{(1)}$ требуется вспомогательная вершина $\text{п}_2^{(0)}$, которая позволяет обозначить связь параметра с другими признаками описания радиоэлектронной аппаратуры.

Наличие в поканальном семантическом представлении общих фрагментов, содержащих идентичные по описанию вершины и ребра позволяет произвести предметно-предикатную интеграцию моделей каждого канала. Для решения этой задачи следует отыскать фрагменты формализованного представления g_a и g_d такие, что $g_a(e_a, r_a) \in G_a(E_a, \text{R}_a); g_d(e_d, r_d) \in G_d(E_d, \text{R}_d)$, и проверить условие $\text{e}_a \subseteq e_d, \text{r}_a \subseteq \text{r}_d$, где e_a, e_d – вершины сетей информационных каналов

соответственно исправной и неисправной аппаратуры; r_a, r_d –ребра сетей информационных каналов соответственно исправной и неисправной аппаратуры.

Такое условие является необходимым и достаточным для проведения предметно-предикатной интеграции двух информационных каналов в единую формализованную концептуальную диагностическую модель аппаратуры. Интегрированное семантическое представление формализованной концептуальной диагностической модели радиоэлектронной аппаратуры графически представлено на рисунке 3.

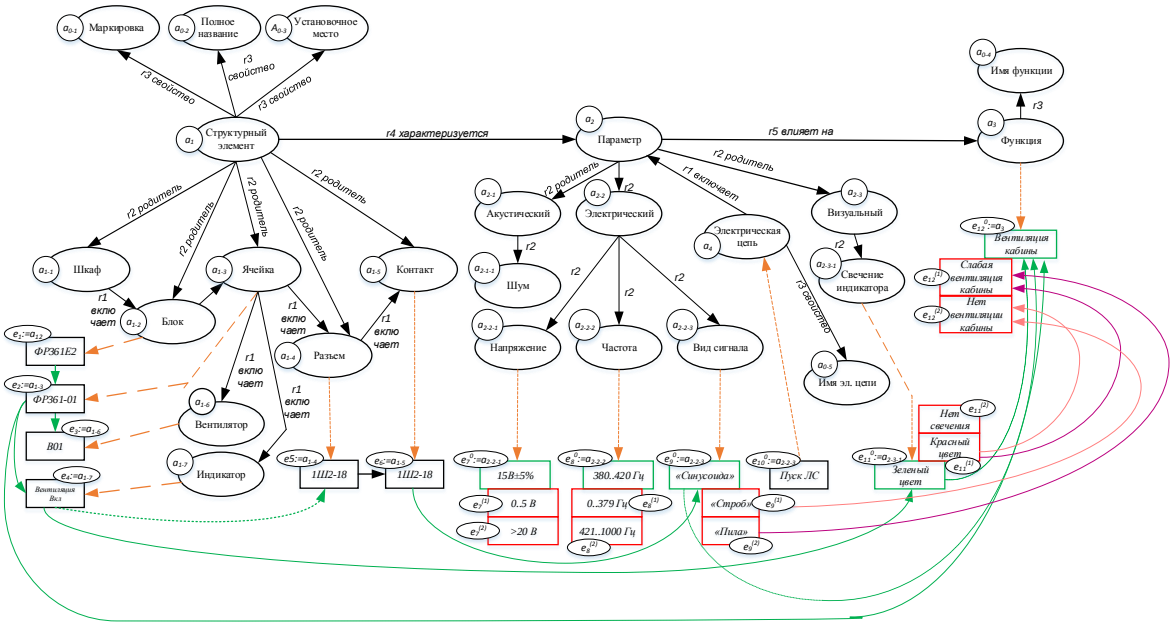


Рис.3. Графическое представление фрагмента диагностической модели радиоэлектронной аппаратуры

Выводы

Полученное формализованное концептуальное представление РЭА в виде семантической сети ориентировано на использование в СА, что позволяет формировать технический диагноз по диагностическому портрету в запросах ОП на естественном языке. Эта особенность использования диагностической модели предоставляет возможность создания автоматизированного интерфейса информационной поддержки процесса принятия решения при определении МПО, который способствует сокращению времени, отводимого на выполнение некоторых диагностических процедур.

Таким образом, предложенный способ формирования формализованных концептуальных диагностических моделей радиоэлектронной аппаратуры выступает основой для формирования автоматизированной системы поддержки принятия решений для определения технического диагноза сложных систем, в роли которых выступают комплексы специального назначения.

Библиографический список

1. Курчидис В. А., Попов Т. А. Предикатная модель схемно-ориентированных запросов обслуживающего персонала в системах информационной поддержки // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 3. С. 30-36.

2. Анисимов О.В., Курчидис В.А., Пугачев А.Ю. Формализованное концептуальное представление неисправностей для построения явных диагностических моделей

радиоэлектронной аппаратуры // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т.9. №6.С.80-89.

3. Глущенко П.В. Техническая диагностика. М.: Вузовская книга, 2008. 248 с.

4. ЫК2.008.209ТО. Изделие 83Ф6Е2. Техническое описание, часть 1.

5. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.

6. ISO/IEC 14977:1996(E). Информационная технология – Синтаксический метаязык – Расширенная Форма Бэкуса-Наура (Extended BNF). Издательствостандартов, 1996.

7. Van de Riet, R. P. Linguistic Instruments in Knowledge Engineering. ElsevierSciencePublishers. 1992. p. 98.

8. Городецкий А.Е., Тарасова И.А., Зиняков В.Ю. Комбинированное логико-вероятностное и лингвистическое моделирование отказов сложных систем // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1(74). С.35-42.

9. Курчидис В. А., Анисимов О. В. Представление процесса технического диагностирования на основе пространства свойств радиоэлектронной аппаратуры // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. 4. С.45-55

10. Roussopoulos N.D. A semantic network model of data bases. — TR No 104, Department of Computer Science, University of Toronto, 1976.

A.Yu. Pugachev

RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT FORMALIZED CONCEPTUAL DIAGNOSTIC MODELS FORMING METHOD

Yaroslavl higher military college of anti-aircraft defense

The substantiation of expediency of increase of a level of automation of technical diagnosing of radio-electronic equipment is resulted. The main directions of automation and the shortcomings of known approaches and methods of informational support of the diagnostic process are shown. A method for constructing a single diagnostic model of radio electronic equipment using formalized conceptualization is proposed.The solved problems of model formation at each stage are considered.

Keywords: diagnosticmodel, radio-electronicequipment, decision support system, automation, formalized conceptualization.

УДК 621.391

Е.Н. Саладаев

АКТИВНАЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена система активной звукоизоляции акустических шумов. Активная звукоизоляция акустических шумов реализуется путем установки на звукоизолирующую панель пъзозлектрических пластин и кристаллов цифровой обработки сигналов (ЦОС). На входы кристаллов ЦОС поступают сигналы с пъеэопластин на обратной стороне звукоизолирующей панели. Выходные сигналы кристаллов ЦОС управляют пъеэопластинами на передней стороне на звукоизолирующей панели. Разработан алгоритм компенсация акустических шумов.

Ключевые слова: звукоизоляция, пъзозлектрические пластины, кристаллы цифровой обработки сигналов, алгоритм настройки.

В настоящее время достаточно часто возникает задача акустической изоляции рабочих и бытовых помещений от источников акустических шумов (работающее оборудование и др.). Традиционно эта задача решается конструктивно с использованием звукоизолирующих материалов. Однако развитие современных технологий микроэлектроники и нанотехнологий позволяет более эффективно решать рассматриваемые задачи путем внедрения в конструктивные элементы миниатюрных кристаллов (чипов), воспринимающих процессы в конструктивных элементах, обрабатывающих эти процессы и формирующих сигналы активного воздействия на процессы в элементах конструкций. Наборы кристаллов, обладающих возможностями восприятия состояния среды, обработки сигналов, обмена информацией и формирования управляющих сигналов, называются сенсорными сетями или “интеллектуальной пылью”. При внедрении микрокристаллов, воспринимающих процессы в конструктивных элементах и воздействующих на эти процессы, имеется возможность создания механических конструкций, обладающих элементами “внутреннего интеллекта”, обеспечивающего целенаправленное управление внутренними процессами и улучшение их характеристик.

Сенсорные устройства, или "моты" (от англ. mote — "пылинка") должны представлять собой интегрированную платформу, сочетающую возможности сенсоров (внешних датчиков, регистрирующих определенные параметры или их совокупность). Крошечные вычислительные устройства содержат элементы, воспринимающие состояние параметров $\vec{\lambda}(t)$ (сенсоры), микропросессоры и коммуникационных устройств. Крошечные вычислительные устройства должны не только опознавать образ и состояние окружающего мир, но и действовать в зависимости от его состояния. При этом с выхода вычислительных передаются сигналы управления контролируемыми объектами $\vec{U}(k) = \vec{F}[\vec{\lambda}(t_k)]$, где k – номер отсчета. И все они должны быть соединены в единую беспроводную сеть, чтобы иметь возможность передавать регистрируемую информацию. Наконец, они должны обладать внушительным запасом энергии для автономной работы и иметь возможность получать энергию от окружающей среды. Эксперты полагают, что распространение небольших сенсорных устройств может создать эффект в сотни и тысячи раз более мощный, чем распространение Интернета. Стремительное уменьшение размеров современных сенсоров вместе с их удешевлением и снижением энергопотребления приближает время прихода сенсорных сетей, а значит, наступление эпохи новой сетевой парадигмы.

Теоретический анализ

Рассматриваемая системе активной звукоизоляции акустических шумов (рис.1) состоит из звукоизолирующие панелей P1 и P2 с встроенными сенсорными элементами, обеспечивающими активное подавление звуковых шумовых сигналов $S_n(t)$. Передняя сторона звукоизолирующей панели P1 содержит пьезопластины *PQS*1, на которые поступают сигналы акустического шума $\mathbf{F_{ns}(t)}$ и электрические сигналы компенсации акустического шума $U_d(k)$, поступающие на пьезоэлектрические пластины (пьезопластины) с выходов D/A кристаллов цифровой обработки сигналов (ЦОС) *DSP* внутри панели.

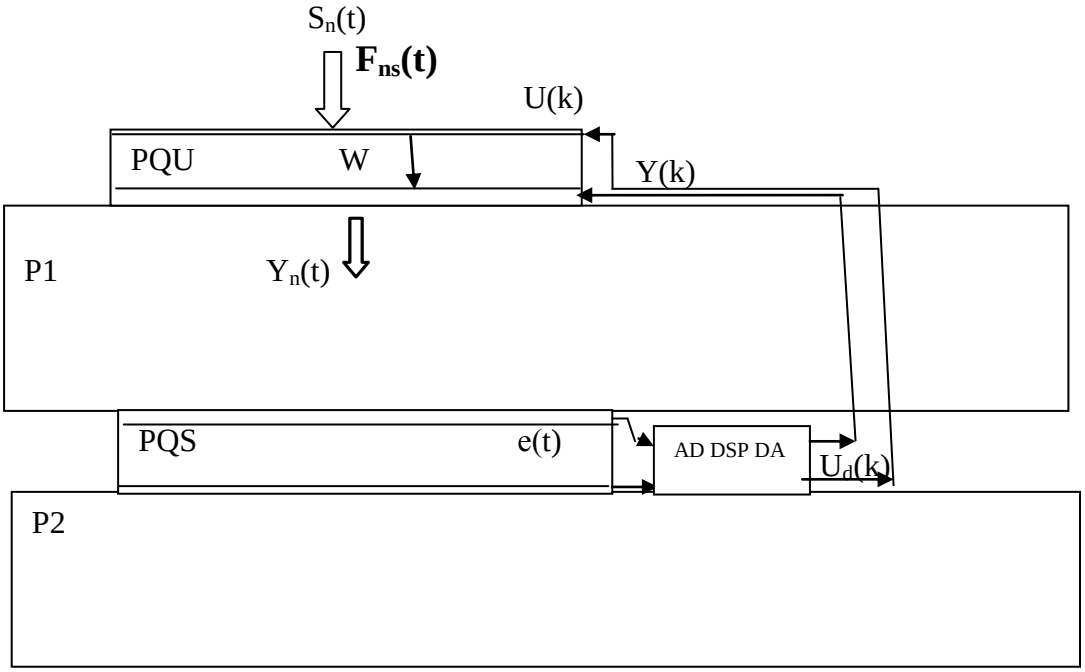


Рис1. Элемент звукоизоляции

На обратной стороне звукоизолирующей панели P1 , между панелями P1 и P2 , располагаются пьезоэлектрические пластины *PQS* , которые приклеены к обратной стороне панели P1 и передней стороне панели P2. Пьезоэлектрические пластины *PQS* зажаты между панелями P1 и P2. Пьезоэлектрические пластины чувствительны к механическим деформациям и формируют электрические сигналы $e(t)$, пропорциональные величине деформации пъезопластины D(t). $D(t) = K_d * F_{ns}(t)$, где $F_{ns}(t)$ – звуковое давление сигналы акустического шума $S_n(t)$, K_d – коэффициент упругости пъезопластины. Электрический сигнал $e(t)$, формируемый пъезопластиной, определяется как $e(t) = K_q * D(t)$, где K_q – коэффициент чуствительности пъезопластины. Пъезопластины покрыты слоем меди, через который снимается формируемый пъезопластиное электрический сигнал $e(t)$. Находящиеся на обратной стороне панели P1 слой пьезопластин *PQS* принимают прошедшие через звукоизолирующую панель акустические шумы и формируют электрические сигналы $e(t)$, поступающие на вход A/D кристаллов цифровой обработки сигналов (ЦОС) *DSP* . Кристаллов цифровой обработки сигналов (ЦОС) формируют сигналы компенсации акустического шума $\vec{Y}(k)$, поступающие на пьезопластины *PQS*1.

Пъезопластины реагируют на электрические сигналы U(k), поступающие на слой меди на поверхности пъезопластины. При изменении напряжения U(k) на поверхности пъезопластины

изменяются геометрические размеры пъезопластины (толщина W). При изменении толщины пъезопластины W формируется акустический сигнал компенсации шумового сигнала $Y_n(t)$.

Внешний вид звукоизолирующей панели P1 с матрицей пъезопластин и кристаллами цифровой обработки сигналов (ЦОС) *DSP* (вид снизу) представлен на рис.2.

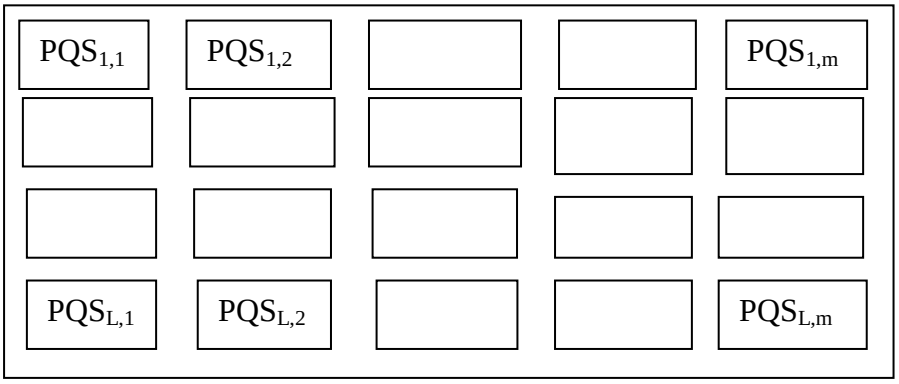


Рис.2. Внешний вид звукоизолирующей панели P1 с матрицей пъезопластин

Между пъезопластинами располагается матрица микрокристаллов цифровой обработки сигналов (ЦОС) DSP_{11} - DSP_{Lm}

При цифровой обработки сигналов (ЦОС) в матрице микрокристаллов DSP_{11} - DSP_{Lm} обрабатываются сигналы $\mathbf{e_{1,1}}$ - $\mathbf{e_{L,m}}$, снимаемые с пъезопластин $PQS_{1,1} – PQS_{L,m}$. В результате обработки и формируемся матрица сигналов компенсации акустического шума Y(L,M). Сигналов компенсации акустического шума Y(L,M) поступают на управление пъезопластинами *PQU* на передней стороне звукоизолирующей панели P1. При этом в рассматриваемой сенсорной сети кристаллы ЦОС совместно с пьезопластинами *PQS* и $PQ\vec{U}$ формирования акустических сигналов компенсации шума $\vec{Y}(k)$ образуют многомерный (матричный) адаптивный фильтр активной компенсации акустического шума (МАКФ). При этом в рассматриваемой сенсорной сети кристаллы ЦОС DSP_{11} - DSP_{Lm} совместно с пьезопластинами *PQS* и *PQU* формирования акустических сигналов компенсации шума $\vec{Y}(k)$ образуют многомерный (матричный) адаптивный фильтр активной компенсации акустического шума (МАКФ).

Методика настройки адаптивного фильтра активной компенсации акустического шума (МАКФ)

Для настройки многомерного (матричного) адаптивный фильтр активной компенсации акустического шума (МАКФ) используем квадратичный критерий качества многомерной компенсации акустического шума $J(W)$ как математическое ожидание квадрата нормы вектора ошибки компенсации $\vec{E}(k) = \overrightarrow{SE}(k) - \vec{Y}(k)$ в гильбертовом пространстве:

$$J(W) = M\{\left\|E_{i,j}(k)\right\|^2\} = \sum_{j=1}^{m} M\{[SE_j(k) - \sum_{i=1}^{n} \vec{W}_{j,i}^T * \vec{X}_i(k)]^2\},$$

где $E_{i,j}(k)$ - сигналы ошибок компенсации шума, воспринимаемые пьезокристаллами $PQ\vec{E}$, $\vec{X}_i(k), SE_j(k)$ - отсчеты сигналов акустического шума на входе и выходе, $\vec{Y}(k)$ - вектор сигналов компенсации акустических шумов, m – размерность МАКФ, $\vec{W}_{j,i}^T$ - вектора параметров цифровых фильтров $C\vec{P}$, n – размерность фильтров ЦОС в процессорах $C\vec{P}$ МАКФ.

Условия минимума функционала качества $J(W)$ представляются в виде:

$$\frac{\partial J(W)}{\partial W_{j,i}} = 0 \qquad j = \overline{1,m},\ i = \overline{1,n}..$$

Параметры МАКФ $\vec{W}_{j,i}^{T}$ при стационарных шумах определяются как:

$$\vec{W}_{j,i} = R_i^{-1} * \vec{P}_{j,i},$$

где R_i - корреляционные матрицы сигналов x_i; $\vec{P}_{j,i}$ - вектор взаимных корреляций сигналов SE_j и x_j; $R_j(l,r) = M\{x_j(k-l) * x_j(k-r)\}$, $j = \overline{1,m}$, $l = \overline{1,n}$, $r = \overline{1,n}$, $P_{j,i}(r) = M\{SE_j(k) * x_i(k-r)\}$, $j = \overline{1,m}$, $i = \overline{1,n}$.

Сигналы на выходе системы многомерной компенсации акустических шумов

$$\vec{Y}^T(k) = \{\sum_{i=1}^{n} \vec{W}_{1,i} * \vec{X}_i(k), \sum_{i=1}^{n} \vec{W}_{2,i} * \vec{X}_i(k), \ldots\ldots\ldots \sum_{i=1}^{n} \vec{W}_{m,i} * \vec{X}_i(k)\}.$$

В случае нестационарных помех текущее значение функционала качества многомерной компенсации акустических шумов представим в виде:

$$J(W,k) = \sum_{r=1}^{k-1} \lambda^{k-1-r} * \left\| \vec{E}(r) \right\|^2,\ 0 < \lambda \le 1,$$

где λ - коэффициент экспоненциального забывания. При использовании метода наискорейшего спуска $\vec{W}_{j,i}(k+1) = \vec{W}_{j,i}(k) - \frac{\gamma}{2} grad(J[W(k)])$ алгоритм настройки МАКФ на каждом отсчете сигналов ***к*** получаем в виде: $\vec{W}_{j,i}(k+1) = \vec{W}_{j,i}(k) + \gamma * SE_j(k) * \vec{X}_i(k)$, где γ - шаг настройки, $j = \overline{1,m}$, $i = \overline{1,n}$. Но при достаточно больших значениях γ алгоритм настройки становится неустойчивым. При малых значениях γ возникают проблемы с отслеживанием алгоритмом настройки нестационарности статистических характеристик компенсируемых шумов и ухудшается качество компенсации шумов.

Для увеличения скорости настройки параметров МАКФ и обеспечения отслеживания алгоритмом настройки нестационарных помех целесообразно использовать для настройки параметров МАКФ модификацию рекурсивного метода наименьших квадратов (алгоритм RLS). Но алгоритм RLS сложнее и требует значительно большего объема вычислений.

Моделирование настройки адаптивного фильтра активной компенсации акустического шума (МАКФ).

Было проведено моделирование настройки адаптивного фильтра активной компенсации акустического шума (МАКФ). Оценка СКЗ ошибки компенсации помехи производились на интервалах по 10000 отсчетов сигналов. На рис.2 и рис.3 представлены результаты моделирования настройки АКФ методом наискорейшего спуска при $\gamma = 0{,}001$.

Настройка параметров МАКФ методом наискорейшего спуска при $\gamma = 0{,}001$ представлена на рис.3. График изменения среднеквадратичного значения (СКЗ ошибки компенсации помехи и изменения параметров АКФ при настройке при $\gamma = 0{,}001$ приведен на рис.4.

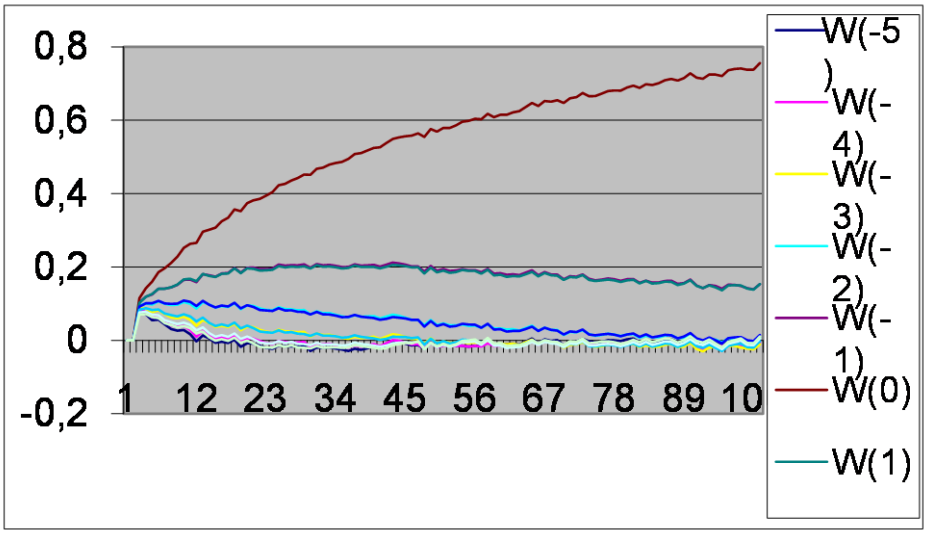


Рис.3. Изменение параметров АКФ при настройке

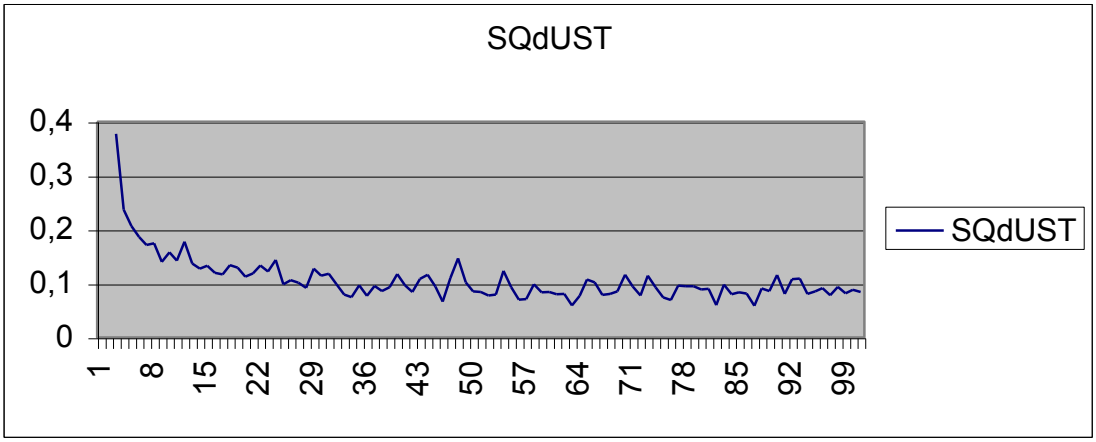


Рис.4. График изменения СКЗ ошибки компенсации помехи

Получаем, что в результате настройки МАКФ за 1000000 шагов при $\gamma = 0{,}001$ отношение сигнал/шум за счет адаптивной компенсации помех в ИК повышается в 12 раз. Результаты моделирования показывают, что при увеличении значения шага настройки γ скорость настройки АКФ увеличивается, т.е. уменьшается время достижения окрестности экстремума рассматриваемого квадратичного функционала. Но при этом ухудшается качество стабилизации вектора настраиваемых параметров АКФ $\vec{W}$ в окрестности оптимального значения вектора параметров $\vec{W}^*$.

От величины шага γ зависит скорость настройки коэффициентов $\vec{W}$ адаптивного фильтра компенсации помех и точность отслеживания экстремума функционала $\vec{W}^*$. С уменьшением γ повышается точность стабилизации коэффициентов МАКФ $\vec{W}$ в окрестности оптимального значения $\vec{W}^*$, но увеличивается время настройки параметров АКФ (время выхода вектора $\vec{W}$ в окрестность $\vec{W}^*$) и ухудшается точность отслеживания экстремума минимизируемого функционала $J(\vec{W})$ в случае его нестационарности (дрейфа). С увеличением γ ускоряется сходимость параметров МАКФ $\vec{W}$ к оптимальному значению $\vec{W}^*$, но увеличивается размер области флюктуаций вектора параметров $\vec{W}$ около оптимального значения $\vec{W}^*$, что приводит к ухудшению качества компенсации помех. При превышении γ

предельного значения $\gamma_{\max}$ (2.33) алгоритм настройки (3.32) будет расходиться, т.е. размер области флюктуаций вектора $\vec{W}$ будет неограниченно возрастать.

Для обеспечения достаточно высокой скорости сходимости алгоритма настройки параметров АКФ и малого уровня флюктуаций вектора настраиваемых параметров $\vec{W}$ в области экстремума $\vec{W}^*$ шаг настройки γ можно сделать переменным, уменьшающимся при приближении к экстремуму $\vec{W}^*$. При этом шаг настройки должен быть монотонно убывающей функцией номера отсчета к. В частности, можно задать закон изменения величины шага в виде:

$$\gamma(k) = \gamma_0 / (1 + D * k) \ ,$$

где γ_0 - начальное значение шага настройки параметров АКФ; D - коэффициент изменения шага настройки, κ – номер отсчета. При этом $\gamma(k) \to 0$ при $k \to \infty$, т.е. после вхождения настраиваемого вектора параметров $\vec{W}$ в окрестность оптимума $\vec{W}^*$ уровень флюктуаций вектора параметров $\vec{W}$ будет постепенно стремиться к нулю.

Подбирая значение D можно обеспечить необходимый компромисс между скоростью настройки параметров АКФ и допустимым уровнем их флюктуаций в области экстремума.

Выводы

В заключение отметим, что рассматриваемая сенсорная сеть, состоит из сенсоров на пьезопластинах $PQ\vec{S}$, компенсирующих акустические шумы, пьезопластин $PQ\vec{U}$ и кристаллов цифровой обработки сигналов $C\vec{P}$, воспринимающих акустические сигналы ошибки компенсации шума с пьезопластин $PQ\vec{U}$ и формирующих сигналы компенсации акустических шумов. Сигналы компенсации акустических шумов, поступают на пьезопластины $PQ\vec{S}$. При этом реализуется активная компенсация акустических шумов в рассматриваемой звукоизолирующей панели.

Библиографическиц список

1.Кропотов Ю.С. Моделирование и методы исследования акустических сигналов, шумов и помех в системах телекоммуникаций: монография: монография / Ю.А.Кропотов, В.А.Ермолаев. – М. Берлин: Директ – Медиа, 2016. – 251 с.

2.Кравчун П.Н. Генерация и методы снижения шума и звуковой вибрации. / - М.: Изд-во МГУ, 1991. – 184 с.

3.Айчифер Э. С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. – Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс, 2004. – 992 с. :ил.”

E.N.Saladayev

ACTIVE SOUND INSULATION OF ACOUSTIC NOISE WITH THE USE OF THE TOUCH NETWORK

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The system of active acoustic insulation of acoustic noise is considered. Active sound insulation of acoustic noise is realized by installing on the soundproof panel of piezoelectric plates and crystals of digital signal processing (DSP). At the inputs of the DSP crystals, signals with pieoplasts on the back of the soundproofing panel are received. The outputs of the DSP chips control the pieoplasts on the front side on the soundproof panel. The algorithm for compensation of acoustic noise is developed.

Key words: sound insulation, piezoelectric plates, crystals of digital signal processing, tuning algorithm.

УДК 534.78

О.В. Садкова

ЭЛЕКТРОННЫЕ УЧЕБНИКИ ПО КУРСАМ «МУЗЫКАЛЬНАЯ АКУСТИКА», «ПСИХОАКУСТИКА»

Нижегородская государственная консерватория им М.И. Глинки

Рассмотрены содержание, структура и дидактические особенности электронных учебников по курсам музыкальной акустики и психоакустики с элементами анимации. углубленным и справочным материалами, заданиями последовательно нарастающей сложности, контрольными заданиями и оценочными тестами. Изложены истории и задачи курсов, важнейшие понятия, вопросы современной обработки звуковых сигналов - характеристики звуковой информации, спектральный анализ и компактное представление звуковых сигналов. Рассмотрены модели и тенденции развития исследований слуховой и голосовой систем. Обобщены известные и полученные автором результаты.

Ключевые слова: музыкальная акустика; обработка звуковых сигналов; модели слуховой и голосовой систем.

Нижегородская консерватория им. М.И. Глинки участвует в подготовке звукорежиссеров, несущих ответственность за звуковой ряд видео- и аудио- программ.

Современная звукорежиссура - профессия, находящаяся на стыке техники, открывающей огромные возможности моделирования звукового пространства и творчества. Звукорежиссер - это гибрид музыканта с серьезной музыкальной подготовкой и специалиста-акустика с хорошей инженерно-технической подготовкой в области физики, математики, электроники, информатики. Здесь велика роль музыкальной акустики - комплексной науки, включающей в себя акустику музыкальных инструментов и певческого голоса, акустику концертных залов, психоакустику, акустику звукозаписи и компьютерные музыкальные технологии.

Компьютерные технологии сами по себе выступают как новые средства обучения, обладающие целым рядом дидактических достоинств и позволяющие качественно изменить не только методы и формы, но и, в определенной степени, содержание обучения.

Автором подготовлен, наряду с бумажным вариантом (374 страницы - 11 глав со 138 рисунками и 340 контрольными вопросами), электронный учебник по музыкальной акустике с элементами анимации, позволяющими реалистично представлять изучаемые процессы в их развитии. Изложена история и задачи курса, важнейшие понятия теории колебаний, рядов Фурье, гармонического анализа и синтеза, обобщенного спектрального анализа, стоячих волн и наборов их собственных частот при различных условиях на границах колеблющихся тел, звукового поля и его линейных и энергетических характеристик, физических явлений при распространении звуковых волн в пространстве.

Особое внимание уделено моделированию звукового поля и специфике звучания в закрытых помещениях, параметрам, характеризующим акустические свойства помещений (реверберация, время запаздывания первых отражений, акустическое отношение, радиус гулкости, субъективные критерии: прозрачность; пространственное впечатление; гулкость; жизненность; интимность; теплота; баланс; тембр), способам управления ими.

В электронном учебнике «Психоакустика» (213 страниц 8 глав со 115 рисунками и 250 контрольными вопросами) рассмотрены проблемы восприятия музыки и различию психоакустики и музыкальной психологии, строению и функционированию нервной системы, функциям сенсорных систем, принципам кодирования информации. Изложена общая схема путей и центров слуховой системы, включая её периферические и высшие отделы, помехоустойчивость слуховой системы, основные механизмы слухового восприятия и их ограничения, механизмы пространственного восприятия звука. Рассмотрены модели и тенденции развития исследований слуховой системы. В разделе, посвященном голосовой системе изложена психофизика речевых процессов, структура голосового аппарата, подробно исследован процесс голосообразования (подстройка формантных частот, разборчивость вокальной речи, резонаторы, механизм дыхания,

атака звука, артикуляционный аппарат). Ряд глав посвящен особенностям звучания музыки в помещении, методам субъективной оценки качества звучания. Рассмотрены технология воссоздания трехмерного звукового поля концертного зала в комнате с использованием компьютерных технологий, акустические особенности конструкций и звукообразования всех основных классов традиционных и электронных инструментов. В заключительной главе учебника рассмотрены вопросы современной обработки звуковых сигналов (характеристики звуковой информации, спектральный анализ и компактное представление звуковых сигналов).

Впечатляют перспективы развития музыкальной акустики и психоакустики. Уже имеющееся программное обеспечение позволяет с помощью компьютера точно определять физические (акустические) параметры каждого синтезируемого или анализируемого звука, соотнести субъективные ощущения с объективными характеристиками звучащего материала, провести изучение различных явлений музыкальной акустики для экспериментальной проверки целого ряда музыкально-теоретических концепций. "Музыкальный компьютер" становится мощной опытной базой для разработки вопросов музыкальной акустики и психоакустики на качественно новом уровне, позволяющем перейти от анализа отдельных явлений к формированию единой теории музыкальной акустики и психоакустики. Такая теория свяжет традиционный музыковедческий анализ, носящий в основном описательный характер, с объективными методами исследований - статистического анализа, математического моделирования, акустических измерений при использовании экспериментальных данных о восприятии звуков - психоакустики, физиологии и других смежных наук.

Находясь на стыке искусства и техники, используя выразительные приемы, технические и акустические средства, звукорежиссер выступает в роли соавтора или интерпретатора художественного произведения. Результатом его работы является фонограмма. Непосредственное исполнение и последующий музыкальный носитель - фонограмма - имеют прямую связь только на первый, поверхностный взгляд. На самом деле это совершенно разные вещи, живущие своей отдельной жизнью.

Фонограмма - это звукозапись исполнения музыкального, драматического и иного произведения или специально созданная и записанная звуковая композиция. Ключевым здесь является понятие «звуковая композиция» как новый объект интеллектуальной собственности. Будучи центральной фигурой современного процесса создания фонограмм, звукорежиссер имеет все основания претендовать на то, чтобы стать субъектом авторского права на фонограмму как на созданную именно его трудом звуковую композицию, что отличает его от композитора как автора музыкального материала и исполнителя, реализующего этот материал.

Успешное воплощение творческого замысла возможно только в том случае, если звукорежиссер знает и учитывает в своей работе комплекс разнообразных факторов, среди которых наиболее важными являются: особенности звуковой структуры конкретного музыкального произведения; динамические, спектральные и пространственно-временные характеристики первичного звукового поля, а также исходного множества первичных звуковых сигналов (речь, музыка, шумы) и искусственных звучаний, из которых формируется звуковая сфера музыкального произведения; комплекс ощущений, свойственных естественному слушанию; особенности восприятия музыкального произведения (эстетические и психофизические); критерии субъективной оценки качества звукозаписи (высота, громкость, тембр, маскировка, локализация) и их связь с параметрами звукового сигнала; психоакустические основы обработки звуковых сигналов; слуховой анализ фонограмм (тембр, музыкальный баланс, пространственное впечатление, раздельность и прозрачность звучания, глубина и ширина панорамы, динамический диапазон и т.п.), микширование звуковых сигналов; художественно-технические приемы звукорежиссуры; акустические свойства ателье, студий, театров и концертных залов; современные технологии работы звукорежиссера при записи фонограмм в студии.

За последние десятилетия в мире звукозаписи накоплен солидный арсенал технических приемов, который позволяет достоверно передавать или создавать заново акустическую реальность, добиваться высокой прозрачности многоплановых полифонических композиций, осуществлять полную реставрацию фонограмм, передавать тонкие оттенки звуковой картины.

Грамотное использование всей технической палитры требует от современного звукорежиссера умения:

- создавать оптимальные условия для передачи звучания различных источников звука;
- выбирать, правильно размещать и профессионально использовать аппаратуру, с помощью которой можно наилучшим образом решить данную задачу;

Звукорежиссер должен знать, что надо делать для повышения качества передачи, как делать и почему именно так, а не иначе.

Кроме того, используемый набор объективных параметров, используемых в аудиотехнике, не дает полной оценки качества звучания и неоднозначно определяет "слуховой образ", воспринимаемый слушателем. Такую оценку можно получить лишь при корректном проведении субъективных испытаний, являющихся обязательной процедурой и главным критерием качества аудиоаппаратуры и её элементов (от студийного микрофона до бытовой акустической системы), музыки, фонограмм.

Методикам организации и проведения субъективных экспертиз уделяется большое внимание. К настоящему времени отработаны правила их проведения, обеспечивающие достоверность и повторяемость полученных результатов оценки.

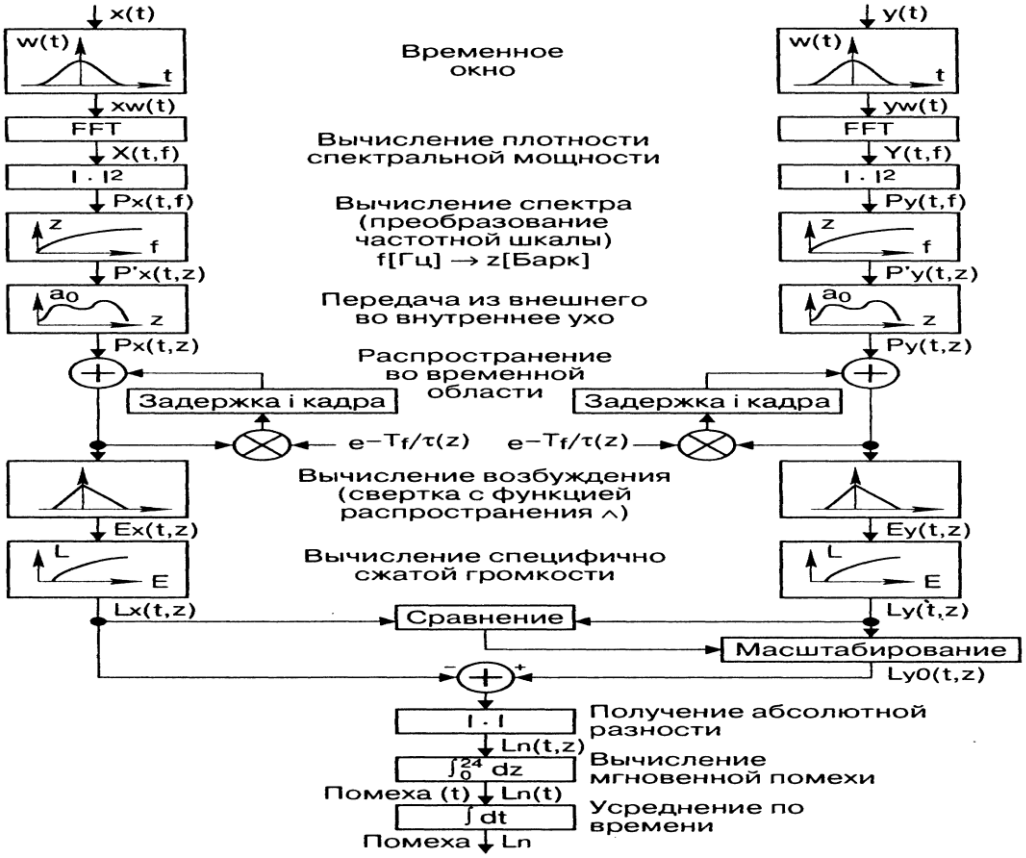


Рис. 1. Алгоритм PAQM (Perceptual audio quality measure - психоакустическое измерение качества звучания) психоакустического измерения качества звучания

Они определяют требования:

- к условиям прослушивания (помещение, порядок отбора и размещения образцов и слушателей, параметры звуковоспроизводящего тракта и т. д.);
- к процедуре тестирования (выбор программного материала, методы оценки, порядок прослушивания, интерпретация полученных результатов);
- к подбору экспертов (проверка слуховых порогов, опыта прослушивания, способов тренировки и т. д.);
- к видам оценочных таблиц и способам статистической обработки результатов.

Основная проблема методов, основанных на использовании психоакустической модели, - слабость теории «критических полос слуха».

При решении проблемы объективной оценки качества звучания намечается переход от набора тестовых сигналов к использованию реальных звуковых сигналов. К настоящему времени принято множество рекомендаций и стандартов, как по субъективным, так и по объективным методам оценки качества передачи вещательного сигнала. Однако проблема оценки качества передачи вещательного сигнала по звуковому тракту еще далеко не решена и остается актуальной.

К настоящему времени не создано модели работы слухового анализатора, которая включала бы все известные свойства слуха.

С учетом инерционности слуха, для восприятия информации необходима относительная стационарность звукового сигнала на длительности, достаточной для его восприятия. Сигнал может быть расчленен на:

• элементарные периодические структуры, формирующие символ - мгновенные спектры;
• звуковые объекты - мельчайшие объекты, воспринимаемые как отдельные события;
• промежуточные структуры - последовательность звуковых объектов, соединенная посредством художественных приемов (ритмом, мелодией);
• макроструктура - произведение в целом.

До настоящего времени в задачах обработки в основном использовалось представление звукового сигнала на уровне элементарных периодических структур. Только сравнительно недавно появилась возможность работы со звуком на уровне звуковых объектов. Очевидно, что дойдет очередь и до промежуточных и макроструктур.

Звуковой объект характеризуется:

• относительной однородностью относительно высоты и средней громкости;
• индивидуальностью, определяемой огибающей амплитудного спектра;
• характерным изменением (развитием) во времени, включающем три фазы: нарастания или атаки, относительной стационарности и спада.

Значимость атаки для восприятия звука становится понятной, если учитывать эффекты маскировки во времени и по частоте в слуховом анализаторе.

Известно, что устранение атак из речевого сигнала делает его полностью неразборчивым, в то же время сохранение только атак, составляющих 10-15% длительности сигнала, позволяет сохранить словесную разборчивость на уровне 85% (несмотря

Сказанное определяет общие черты учебного курса основ психоакустики. Основная задача курса - понять, как слуховая система расшифровывает звуковой образ, установить основные соответствия между физическими стимулами и слуховыми ощущениями, выявить, какие именно параметры звукового сигнала являются наиболее значимыми для передачи семантической (смысловой) и эстетической (эмоциональной) информации. Это принципиально важно как для дальнейшего развития аудиотехники, так и для музыкального искусства в целом и, особенно, для звукорежиссеров, поскольку понимание процессов формирования субъективного "слухового пространства" является необходимой базой их творчества.

Разработанные электронные учебники содержат углубленный и справочный материалы, задания последовательно нарастающей сложности, контрольные задания и оценочные тесты.

O. V. Sadkova

ELECTRONIC TEXTBOOKS FOR COURSES "MUSICAL ACOUSTICS", "PSYCHOACOUSTICS"

Nizhny Novgorod state Conservatory n.a. M. I. Glinka

Reviewed the content, structure and didactic features of e-textbooks in courses of musical acoustics and psychoacoustics elements with animation. advanced and reference materials, tasks sequentially increasing complexity, control tasks and assessments. Outlines the history and objectives of the courses, key concepts, contemporary issues of signal processing - characteristics of audio information, a spectral analysis and a compact representation of audio signals. The models and trends of development studies of the auditory and vocal systems. Summarizes the known and the obtained results.

Keywords: musical acoustics; audio signal processing; models of auditory and vocal systems.

621.382.323:

Ю.М. Туляков, Б.М. Горюнов, А.Е. Шахов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛОШУМЯЩИХ СВЧ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ЗАТВОРОМ ШОТТКИ

Московский технический университет связи и информатики
Волго-Вятский филиал (ВВФ МТУСИ)

Проведен расчет эффективности управления обедненной областью под затвором эпитаксиального канала полевого транзистора с уровнем легирования (2- 3) * 10^{17} $см^{-3}$ при напряжении на затворе около 3-х вольт на глубине 0,1мкми сравнительный анализ эпитаксиальных и ионно легированных слоев, применяемых в производстве полевых транзисторов на арсениде галлия с затвором Шоттки. Показано, что управление областью обедненного заряда при наличии максимальной концентрации электронов внутри канала под затвором Шоттки принципиально отличается от ее управления в случае канала с равномерным распределением примесей. Показано также, чтоэффективность управления обедненной областьюоднородно легированного канала в приведенном примере в полтора раза меньше эффективности для каналов, легированных малыми дозами ионов примесных атомов.Представляется, что использование ионно легированных структур в микроэлектронной технике позволит не только существенно снизить коэффициент нелинейности, но и уровень шумов усилительных устройств по сравнению с имеющимися на сегодняшний день микросхемами СВЧ диапазона.

Ключевые слова: арсенид галлия, полевой транзистор, затвор Шоттки, эпитаксия, ионное легирование, обедненная область, эффективность управления.

Различные приборные структуры на арсениде галлия (GaAs), которые используются при создании аналоговых и цифровых интегральных схем имеют самые разные назначения. Наиболее часто используемым элементом при разработке как цифровых, так и аналоговых интегральных(ИС) является полевой транзистор на GaAs.Как в цифровых, так и в аналоговых ИС СВЧ чаще всего применяют полевые транзисторы с затвором Шоттки. Полевые транзисторы с p--n-переходом могут применяться при создании устройств с малой потребляемой мощностью, но одновременно и с меньшим быстродействием.

Существенные отличияGaAsот кремния (Si) заключаются в характере зависимости энергии зон проводимости от волнового вектора. Из-за большей ширины запрещённой зоны собственная концентрация электронов и дырок в GaAs меньше, чем в Si, поэтому GaAs может обладать очень высоким значением удельного сопротивления. Это позволяет использовать такой материал в качестве диэлектрика в технологии изготовления дискретных полупроводниковых приборов иинтегральных схем,предназначенных для работы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, и для изоляции структур в цифровых ИС.

Важнейшим из свойств материала является высокая (в шесть раз большая, чем в кремнии) подвижность электронов в электрических полях низкой напряжённости, что потенциально позволяет создатвать СВЧ приборы с улучшенными характеристиками. Малая величина времени жизни неосновных носителей и большая, чем у кремния, ширина запрещённой зоны делают GaAs более перспективным материалом для создания радиационно-стойких приборов, интегральных схем (ИС)и приборов СВЧ - электроники.

Из всех типов полевых транзисторов в настоящее время в СВЧ-диапазоне наибольшее распространение получили полевые транзисторы с затвором на барьере Шоткти, изготовляемые из GaAs *n*-типа по планарно-эпитаксиальной технологии.Основным элементом такого транзистора является субмикронный слой n- типа проводимости на полуизолирующем арсениде

галлия толщиной менее 0,2 мкм, по которому протекает рабочий ток транзистора от истока к стоку.

Разработка большей части интегральных схем и приборов СВЧ – электроники, в том числе полевых транзисторов на основе эпитаксиальных структур арсенида галлия, требует использования подложек с хорошими изолирующими свойствами. Чаще всего для этих целей используют полуизолирующие подложки арсенида галлия, изготовленные из монокристаллов, выращенных по методу Чохральского из-под слоя защитного флюса.

Получение совершенных по структуре и однородных по распределению электрофизических параметров легированных эпитаксиальных слоев, служащих для изготовления активного элемента (канала) полевого транзистора, требует предварительного наращивания на монокристаллической подложке буферного слоя для исключения переходного слоя между активным каналом и подложкой. Как правило, этот буферный слой получают в едином цикле эпитаксального наращивания всех слоев структуры.

Изолирующие свойства буферного слоя не должны уступать характеристикам монокристаллической подложки и оказывают очень большое влияние на работоспособность и параметры изготавливаемых приборов. Полуизолирующие эпитаксиальные слои арсенида галлия, изготавливаемые методом пиролиза металлоорганических соединений (МОС) галлия в присутствии гидридных или металлоорганических соединений мышьяка, могут быть получены как с применением легирования примесями с глубокими уровнями для компенсации фона остаточных примесей, так и без применения специального легирования.

При этом легирование арсенида галлия примесями с глубокими уровнями (кислород, хром, железо, никель, молибден и другие переходные металлы) приводит к искажению параметра решетки матрицы кристалла. Кроме того, возможность компенсации остаточного фона мелких примесей ограничена низкой растворимостью примесей с глубокими уровнями. Компенсированные этими примесями слои часто обладают фоточувствительностью, причем генерация носителей глубокими уровнями может наблюдаться при их возбуждении высокими электрическими полями в ряде СВЧ-приборов.

Для малошумящихполевых транзисторов особенно важен рост подвижности носителей в области активного слоя, граничащей с буферным слоем, поскольку эти приборы работают при неперекрытой части канала протяженностью около 100. Ток идет фактически в переходном слое между каналом и буферным слоем.. Изготовленные на основе этих структур малошумящие полевые транзисторы имеют средние характеристики уже на частоте 8 ГГц.

Для уменьшения эффекта управления через подложку и снижения проводимости канала необходимо иметь сильнокомпенсированный буферный слой. Но легировать его примесями с глубокими уровнями нельзя, так как диффузия этих примесей в канал приводит к снижению дрейфовой скорости электронов в канале и, как следствие, к уменьшению крутизны. Поэтому буферный слой должен обладать противоречивыми свойствами иметь хорошие изолирующие характеристики и в то же время не служить источником рассеивающих центров для переходной области активного слоя (URL:http://www.findpatent.ru/patent/177/1771335.html).

Альтернативным методом получения субмикронных слоев арсенида галлия в технологии изготовления плевых транзисторов с затвором Шоттки является ионная имплантация [1].Технология производства приборов на основе полупроводниковых материалов типа AIII BV позволяет применить ряд способов улучшения параметров изделий. Исследования в этой области, проводимые в настоящее время, направлены на совершенствование технологических процессов и использование особенностей переноса носителей в полупроводниках. Ионная имплантация считается одним из перспективных направлений создания новых материалов и основой современной планарной технологии – универсальным и достаточно технологичным методом введения примеси в заданном количестве и с заданной локальностью. Использование имплантации для формирования ***p-n***-переходов и субмикронных слоев затрагивает технологию таких арсенидгаллиевых приборов как лавинно-пролетные диоды, варакторные диоды, биполярные транзисторы, диодоы и полевые транзисторы с барьером Шоттки и интегральные

схемы сверхвысокой степени интеграции на их основе, отличающиеся высоким быстродействием.В СВЧ-системах наноэлектроника обеспечивает переход от приборов см-диапазона к мм - и суб-мм диапазонам. Это означает кардинальное увеличение быстродействия и рабочих частот, объемов и скоростей передаваемой информации, ширины полосы и числа каналов в системах связи, разрешающей способности в радиолокации и в электронных средствах вооружений и т. д.

Интересно применение имплантации элементов IV группы таблицы Менделеева (особенно кремния, донорной примеси с малой массой) в полуизолирующий арсенид галлия для создания малошумящих СВЧ полевых приборов с затвором Шоттки. Так же в приборах формируются низкоомные и контактные области высокодозовой имплантацией примесей. Однако данному методу легирования сопутствует образование радиационных точечных дефектов и для активации примеси в решетке предполагается проведение отжига. Эффективность легирования зависит от реальной структуры ионно имплантированного слоя (состав ансамбля точечных радиационных дефектов и примеси). Поэтому изучение особенностей формирования структуры после имплантации и ее эволюции при отжигах играют важную роль в подборе режимов имплантации и активирующего отжига для создания оптимальной структуры, получения желаемых свойств и качества слоя, а, следовательно, и для обеспечения требуемых пространственных и электрофизических параметров изготовляемых приборов.

Поскольку работа полевого транзистора определяется полевым эффектом перекрытия канала проводимости обедненным слоем полупроводника под затвором, весьма важным представляется закономерность распространения этого слоя вглубь канала в зависимости от контактной разности потенциалов между полупроводником и металлом затвора и управляющего напряжения на затворе. В теории разработан аналитический метод расчета такой зависимости для однородного распределения примесей в эпитаксиальном канале. Однако на практике при использовании ионно легированных субмикронных слоев приходится сталкиваться с сугубо неоднородным распределением примесей и основных носителей заряда по толщине канала, которое не описывается какими-либо аналитическими функциями.

В работе [2] произведен численный расчет глубины залегания и эффективности управления областью пространственного заряда под затвором Шоттки с произвольным распределением носителей заряда в канале полевого транзистора на основе уравнения, полученного в результате решения одного из уравнений Максвелла в интегральной форме.

Эффективность работы полевого прибора существенным образом определяется характером зависимости толщины объемного пространственного заряда под затвором, поскольку именно она определяет проводимость оставшейся под ней части канала, от величины напряжения на затворе. Производная глубины залегания обедненного слоя от напряжения на затворе, которая характеризует эффективность управления областью пространственного заряда под затвором Шоттки определятся формулой (1)

$$\frac{d\,y_{\mathrm{O}}}{dU} = \frac{\varepsilon}{q \cdot y_{\mathrm{O}} \cdot n(y_{\mathrm{O}})}. \qquad (1)$$

Зависимость толщины обедненного слоя от напряжения на затворе определяется формулой

$$y_0 = \left(\frac{2\varepsilon(\varphi + U)}{qn}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

Из уравнения (1) следует, что при однородном распределении примеси под затвором Шоттки.как это имеет место для эпитаксиальных слоев,эффективность управления пространственным зарядом уменьшается с ростом напряжения на затворе обратно пропорционально толщине обедненного слоя. Для затворных частотных детекторов, в частности, это приводит к большим нелинейным искажениям. Причём результаты одинаково плохие для слабых (квадратичная зависимость рабочей характеристики) и сильных (выход в режим отсечки) сигналов.

Управление областью обедненного заряда при наличии максимума концентрации электронов внутри ионно легированного канала под затвором Шоттки принципиально отличается от его управления при однородном распределением примеси. На рис.1 приведено рассчитанное поведение производной глубины залегания обедненного слоя по напряжению на затворе. Видно, что эффективность управления толщиной объемного заряда для большинства доз имплантации имеет достаточно продолжительное плато в зависимости от приложенного напряжения на затворе. При этом для ряда доз она еще и возрастает по мере увеличения напряжения на затворе, что позволяет осуществить оптимальный выбор рабочей точки смещения усилительного устройства на основе полевых транзисторов с ионно легированным каналом на субмикронных слоях арсенида галлия.

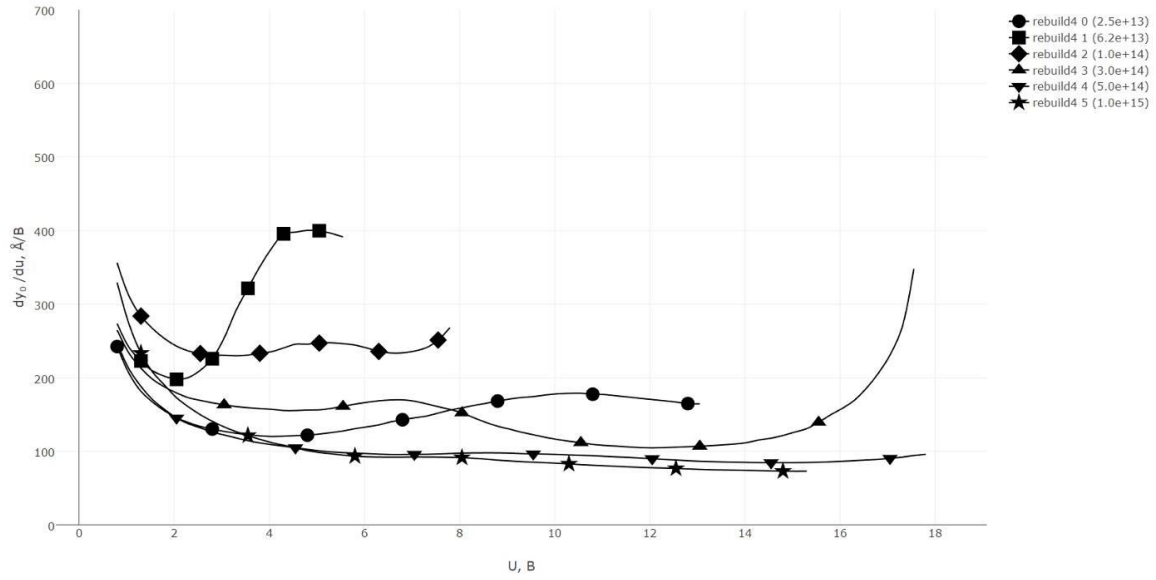


Рис.1

Расчет по формулам (1), (2) показывает, что эффективность управления обедненной областью под затвором эпитаксиального канала с уровнем легирования (2- 3) * 10^{17} $см^{-3}$ при напряжении на затворе около 3-х вольт на глубине 0,1мкм составляет 200 ангстрем/м, что в полтора раза меньше по сравнению с эффективностью управления для каналов, легированных малыми дозами ионов примесных атомов.

По ряду причин все большее распространение при изготовлении цифровых ИС и ИС СВЧ диапазона на полевых транзисторах приобретает использование ионной имплантации непосредственно в подложку. Это обусловлено хорошей воспроизводимостью процесса, возможностью осуществлять селективное легирование, сохранять высокое качество поверхности и возможностью организации массового выпуска недорогих изделий.Представляется, что использование ионно легированных структур в микроэлектронной

технике позволит не только существенно снизить коэффициент нелинейности, но и уровень шумов усилительных устройств по сравнению с имеющимися на сегодняшний день микросхемами СВЧ диапазона.

Библиографический список

1. Горюнов Б.М., Зорин Е.И., Павлов П.В., Сорвина В.П., Туловчиков.В.С., Тяжелова Н.В. Исследование основных электрофизических свойств слоев арсенида галлия, легированного ионами кремния и серы. "Арсенид галлия ", в.4, 102-105, Изд. Томского университета, Томск-1974.

2. Эффективность управления пространственным зарядом под затвором Шоттки на ионно легированных слоях арсенида галлия/ Б.М. Горюнов, М.Г. Тылес, А.Е. Шахов, В.А.Карнаухов, С. А. Секретарев // Сборник материалов XII международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ–2017 / Владимирский государственный университет имени А.Г. и М.Г. Столетовых. – Суздаль, 2017. – Том 2,с. 103-105.

Yu.M. Tulyakov, B.M. Goryunov, A.E. Shakhov

COMPARATIVE ANALYSIS OF GALLIUM ARSENIDE LAYERS IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING LOW-NOISE MICROWAVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH A SCHOTTKY GATE

Moscow Technical University of Communication and Informatics
The Volga-Vyatka branch (VVF MTUCI)

The control efficiency of the depletion region under the gate of the epitaxial channel of the fieldeffect transistor with a doping level (2-3) * 1017 cm-3 at a gate voltage of about 3 volts at a depth of 0.1 pm and a comparative analysis of epitaxial and ionically doped layers used in production of field effect transistors оп gallium arsenide with a Schottky shutter. It is shown that the control of the depleted charge region in the presence of the maximum electron concentration inside the channel under the Schottэ gate is fundamentally different from its control in the case of a channel with a uniform distribution of impurities. It is also shown that the efficiency of controlling the depleted region of a uniformly doped channel in the example given is one and a half times lower than that for channels doped with small doses of ions of impurity atoms. It seems that the use of ion-doped structures in microelectronic technology will allow not only to signiГrcantly reduce the nonlinearity factor, but also the noise level of amplifuing devices in comparison with the currently available microwaче-raпge microcircuits.

Key words: gallium arsenide, field effect transistor, Schottky gate, epitaxy, ion doping, depletion region, coпtrol efficiency.

УДК 621.389

А.А. Терентьев, Е.Р. Долгова

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются физические процессы, протекающие в электровакуумных приборах, обсуждаются особенности и проблемы, возникающие при расчете и моделировании указанных физических процессов. Приведенные в статье формулы и особенности их применения справедливы для широкого круга электровакуумных приборов, работающих в ВЧ и СВЧ диапазонах.

Ключевые слова: электровакуумные приборы, эмиссионные процессы, электростатический расчёт, электродинамический расчёт, высокочастотный расчёт.

Введение

В настоящее время снова становятся актуальными вопросы, связанные с разработкой в области электровакуумной электроники. Данные вопросы касаются создания таких электропроборов с вакуумным каналом, которые бы отвечали следующим требованиям: долговечность, малые размеры, устойчивость к внешним воздействиям (радиационное воздействие, высокая температура).

Долгое время электровакуумная электроника не находила широкого распространения из-за достаточно больших габаритов электровакуумных приборов, а также из-за их большого энергопотребления и малых токов эмиссии.

Однако современные технологии позволяют создать совершенно новые приборы, которые будут иметь ряд преимуществ как перед полупроводниковыми приборами, так и перед старыми вакуумными устройствами, а именно малые линейные размеры, микронные и даже нанометровые масштабы каналов.

Особенности расчета параметров электронной эмиссии

Под электронной эмиссией понимается испускание твердым телом электронов под действием внешних сил.

В узлах кристаллической решетки твердого тела располагаются ионы, а валентные электроны хаотично перемещаются между ними. Для возникновения эмиссии такого движения недостаточно, так как электрону необходимо покинуть тело и преодолеть определенное расстояние до анода. Но действие сил притяжения со стороны ионов не дают электронам выйти за пределы поверхности металла. Однако некоторые электроны всё же могут покинуть металл, но из-за действия всё тех же сил со стороны поверхностных ионов и тех же зарядов, которые возникли в результате потери электронов, они будут вновь возвращаться обратно. В итоге, наступит динамическое равновесие между покидающими и возвращающимися частицами, а у поверхности металла образуется так называемый электронный пар - двойной слой электрических зарядов, который не создает электрическое поле, но является препятствием для выхода электронов с поверхности металла [1] (рис. 1).

Если же частице удалось покинуть тело и преодолеть двойной слой, то данные силы на него уже не действуют, но рассматривается уже другая система. Теперь имеется проводящая заземленная поверхность и отрицательно заряженная частица. В электростатике существует задача "метод изображений" (рис. 2.), которая любую проводящую поверхность представляет собой мнимой частицей, которая имеет заряд противоположный заряду существующей частицы [2]. Между этими частицами так же возникают силы взаимодействия, которые часто в литературе называют "силами изображениями".

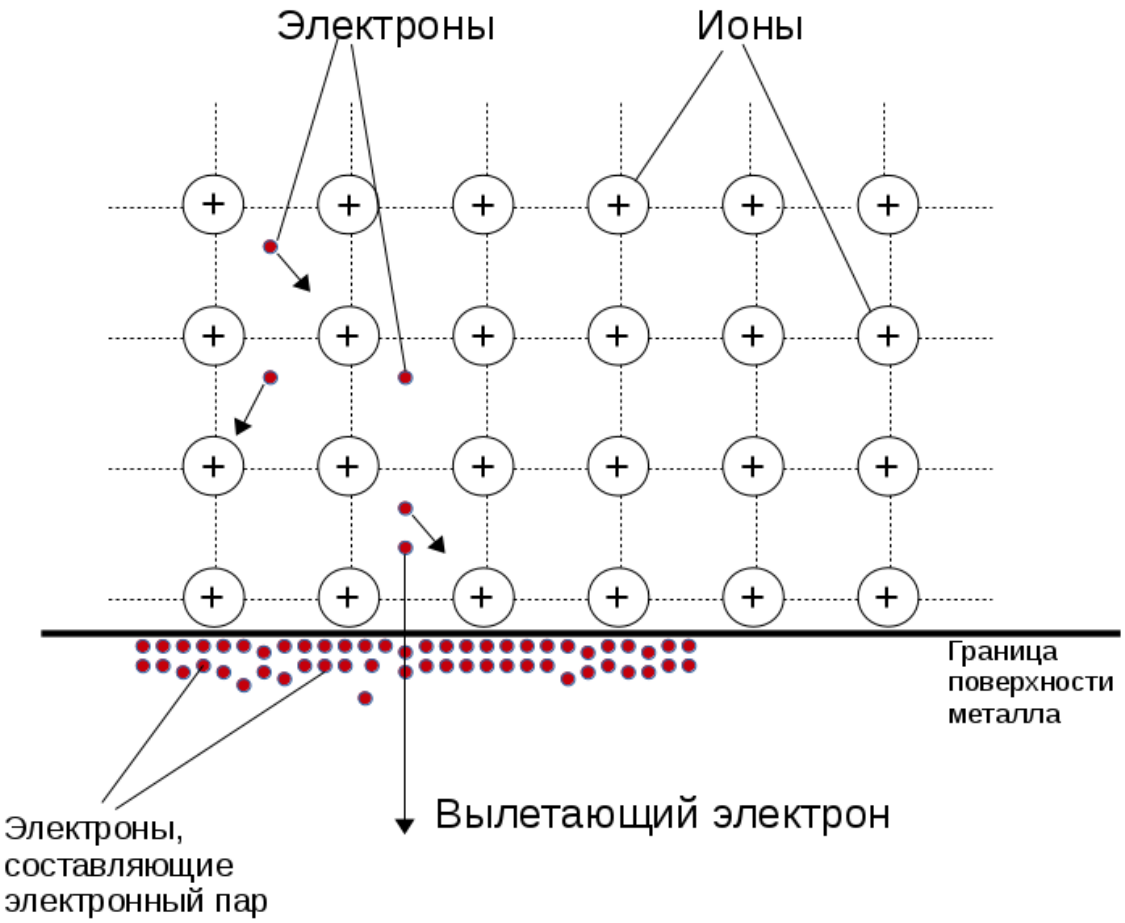


Рис. 1 - Наглядное представление выхода электрона из металла

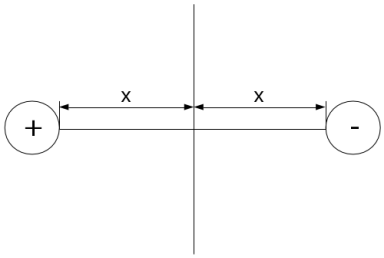


Рис. 2 - Метод изображений

Исходя из этого, электрону необходимо совершить такую работу A_B против сил притяжения со стороны положительных ионов, сил отталкивания от электронного пара и "сил изображения", чтобы покинуть металл и уйти в окружающую среду. Такая работа носит название работы выхода и зависит от характеристик самого металла.

Рассмотрим потенциальный барьер, который возникает из-за действия указанных сил. Эта область характеризуется высотой барьера, которая показывает, какой полной энергией

должна обладать частица, чтобы преодолеть потенциальный барьер, или, иными словами, выйти из металла и улететь на некоторое расстояние.

На рис. 3 схематически изображен потенциальный барьер $U(x)$ бесконечной ширины. Этот график также показывает распределение плотности электронов по энергиям. На уровне Ферми E_f находятся большинство электронов, по мере приближения к уровню E_0 их становятся всё меньше. В данной ситуации эмиссия возможна только при условии, что электрон будет обладать энергией, значение которой превышает E_0. Уровень E_0 определяет полную работу выхода. Разность полной энергии и энергии Ферми определяет эмиссионную работу выхода: $E_0 - E_f = A_B$.

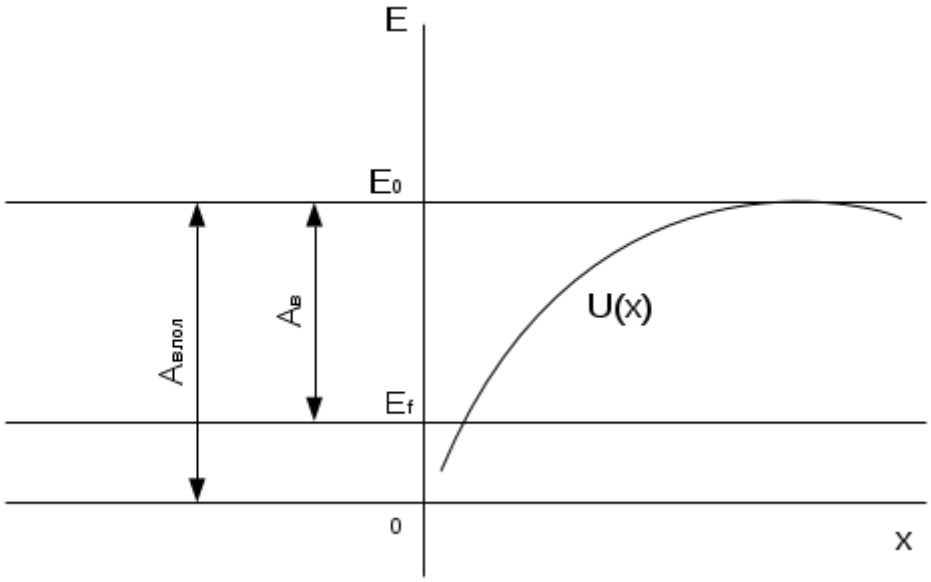


Рис. 3 - Потенциальный барьер без воздействия внешнего поля

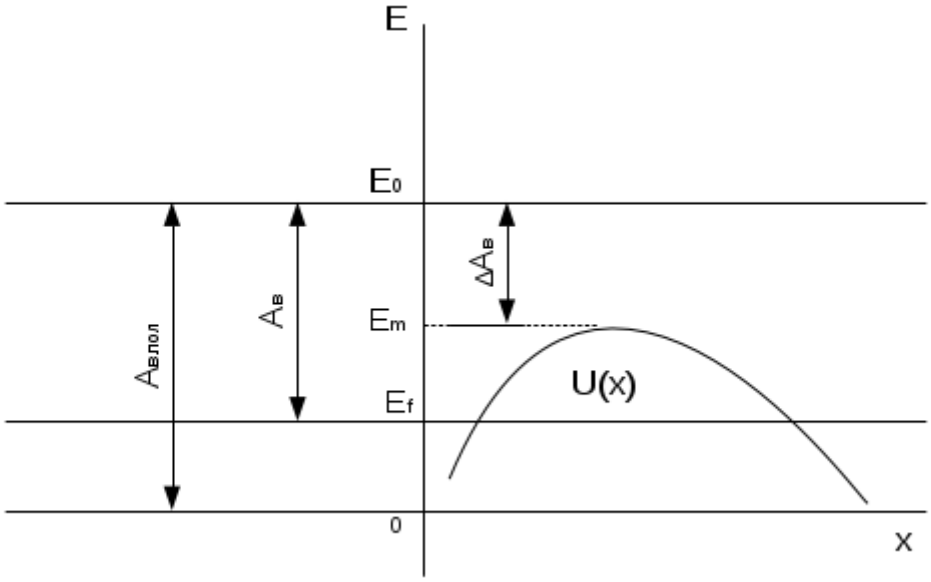


Рис. 4 - Потенциальный барьер при воздействии внешнего поля

На рис. 4 схематически изображен потенциальный барьер $U(x)$ при воздействии внешнего электрического поля. Из рис. 4 видно, что высота данного барьера значительно снизилась, а ширина стала конечной. Таким образом, увеличивается количество электронов, которые могут перелететь барьер, а также за счет конечной ширины открывается туннельный

эффект, при котором частицы пролетают, не встречая препятствий. При этом чем больше электрическое поле, приложенное к металлу, тем уже и ниже становиться барьер. Величина ΔA_B носит название поправки Шоттки и показывает, на сколько снизился барьер. В данном случае имеют место автоэлектронная или термоавтоэлектронная эмиссии.

Значения работы выхода различных материалов приводятся в различных справочных материалах. Но такие значения могут отличаться от реальных для конкретной структуры по ряду причин: работа выхода зависит от формы электродов, от эмиссионной поверхности, от чистоты материала (процент примесей), вида кристалла (монокристалл или поликристалл) и метода измерения данной величины.

Существующие методы измерения работы выхода разнообразны [3] (метод термоэлектронной эмиссии, метод фотоэлектронной эмиссии, метод автоэлектронной эмиссии и т.д.), однако все они являются оценочными и могут использоваться при условии известной формы электрода. Для получения автоэлектронной эмиссии добиваются острийной формы катода для усиления электрического поля у эмиссионной поверхности. В данном случае можно воспользоваться методом автоэлектронной эмиссии, который заключается в том, что на реальную модель подается напряжение, снимаются значения тока и определяется напряженность электрического поля у острия. По полученным данным строиться вольт-амперная характеристика в координатах Фаулера-Нордгейма $\ln\frac{I}{E^2}\left(\frac{1}{E}\right)$ и вычисляется сама работа выхода [4]:

$$\varphi = \left(-\frac{1}{2.84*10^9}\,\frac{d\left(\ln\frac{I}{E^2}\right)}{d\left(\frac{1}{E}\right)}\right) \tag{1}$$

Работа выхода является не единственным важным параметром при расчете данных структур. Также большое влияние оказывает величина напряженности электрического поля $\vec{E}$, которая, в свою очередь, зависит от геометрических параметров и от подаваемого напряжения. Для получения значений $\vec{E}$, при которых может возникнуть эмиссия электронов, необходимо обратить внимание на размер вакуумного зазора (чем он меньше, тем больше величина поля), расположение электродов по отношению друг к другу (расположение катода относительно анода и расположение сеточных электродов, при их наличии, относительно катода) и геометрической формы электродов (для усиления поля и получения эмиссионного тока используют форму острия, тогда как форма анода может варьироваться).

Все выше указанные параметры определяют главную характеристику эмиссии - плотность тока эмиссии. Для автоэлектронной эмиссии это является зависимость Фаулера-Нордгейма [2]:

$$J = \frac{e^3}{16\,\pi^2\hbar t^2(y)}\,\frac{E^2}{\varphi}\exp\left(-\frac{4\sqrt{2m}}{3e\hbar}\,\frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{E}\theta(y)\right), \tag{2}$$

где e - заряд электрона, m - масса покоя электрона, $\hbar$ - постоянная Планка, E - напряженность электрического поля, взятая у острия катода, $t(y)$ и $\theta(y)$ - табулированные значения, которые зависят от $y = \frac{\sqrt{e^3E}}{\varphi}$, φ - работа выхода определенного металла в $[eV]$. Существует расчетная формула с уже посчитанными константами [2]:

$$J = 1.55\times10^{-6}\,\frac{E^2}{t^2\varphi}\exp\left(-\frac{6.85\times10^7\,\varphi^{\frac{3}{2}}}{E}\,\theta\right) \tag{3}$$

Для термоавтоэлектронной эмиссии зависимость будет не только от электрического поля, но и от температуры T [2]:

$$J = 1.55 \times 10^{-6} \frac{E^2}{t^2 \varphi} \exp\left(-\frac{6.85 \times 10^7 \varphi^{\frac{3}{2}}}{E}\theta\right)\left(\frac{\frac{\pi T}{2T_1}}{\sin\left(\frac{\pi T}{2T_1}\right)}\right), \quad (4)$$

где температура инверсии определяется как

$$T_1 = 5.37 \times 10^{-5} \frac{E}{t^2\sqrt{\varphi}} \quad (5)$$

Данный вид эмиссии ориентирован на высокие электрические поля и на температуры до 2000 К.

Моделирование эмиссионных процессов

Первой задачей моделирования поведения электровакуумных приборов для оценки и расчета их внешних характеристик ставится расчет тока эмиссии. Для этого решается задача электростатики [5]. Необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} rot\,\vec{E} = 0, \\ \nabla\vec{D} = -\rho, \\ \vec{D} = \varepsilon_0\,\varepsilon\,\vec{E}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля, $\vec{D}$ - вектор индукции электрического поля, $\rho = e\,n$ - плотность заряда, которая определяется как заряд электрона, умноженный на количество носителей заряда, ε - диэлектрическая проницаемость среды.

Из первого уравнения в системе (6) следует, что

$$\vec{E} = -\,grad\,V, \quad (7)$$

где V – электрический потенциал.

Решение данных уравнений с учетом начальных и граничных условий даст распределение электрического поля по всей расчетной ячейки. Особый интерес представляет распределение поля у острия катода и линии электрического поля от катода к аноду. Благодаря полученным результатам можно вычислить плотность тока по формуле (3). Сам эмиссионный ток можно получить следующим образом:

$$I = \int_0^S J dS, \quad (8)$$

где S – площадь эмитирующей поверхности.

Второй задачей моделирования является расчёт движения заряженных частиц в канале, а точнее построение траектории их движения. Для решения необходимо рассмотреть систему уравнений гидродинамики [5]:

$$\begin{cases} rot\,\vec{B} = 0, \\ rot\,\vec{H} = -\vec{j}, \\ \vec{B} = \mu_0\,\mu\,\vec{H}, \end{cases} \quad (9)$$

при этом $\vec{j} = \rho\vec{v}$, где $\vec{v}$ - вектор скорости носителя заряда, $\vec{B}$ - вектор магнитной индукции, $\vec{H}$ - вектор напряженности магнитного поля, μ_0 - магнитная постоянная, μ - магнитная проницаемость среды.

Уравнение движение, подлежащее расчёту, имеет следующий вид:

$$\frac{1}{2}\,grad(\vec{v}) - \vec{v}\,rot(\vec{v}) = -\frac{e}{m}\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) - \frac{kT}{m}\frac{1}{n}\,grad(n), \quad (10)$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура внутри расчетной области.

Начальная скорость, или скорость, с которой будут вылетать электроны, принимается за ноль. При этом необходимо обозначить границы, где электроны испускаются, а где поглощаются. Совместное решение уравнений (9) и (10) даст направление движения заряженных частиц.

При этом стоит учесть, что рассмотрение данных двух задач не учитывает область высоких частот, тогда как современная электровакуумная электроника направлена на создание

устройств, работающих в ВЧ и СВЧ диапазонах. Для анализа подобных приборов необходимо рассматривать задачу электродинамики, включающую в себя уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} div\,\vec{D} = \rho, \\ div\,\vec{B} = 0, \\ rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \end{cases} \quad (11)$$

а также материальные уравнения для электрической и магнитной индукций:

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon_0\,\varepsilon\,\vec{E}, \\ \vec{B} = \mu_0\,\mu\,\vec{H}, \end{cases} \quad (12)$$

Решение данных уравнений необходимо производить в частотной и временной областях с учетом начальных и граничных условий.

Особенностью решения всех трех задач является минимальный шаг расчетной сетки в области эмиссии для получения более точного результата.

Вывод

Современные средства автоматизированного проектирования (САПР) позволяют без труда решить задачу электростатики, тогда как при решении задачи электродинамики уже появляются некоторые ограничения. В то же время расчет в области высоких частот существующими на сегодняшний день средствами автоматизированного проектирования в общем случае применительно для решения рассматриваемых электровакуумных структур невозможен. В связи с этим встает вопрос о создании отдельных самостоятельных программных средств либо специализированных компонентов (модулей, библиотек функций) для существующих САПР.

Библиографический список

1. Мануилов В.Н. Введение в электронную эмиссию. Учебное пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. - 48 с.
2. Уйманов И.В. Физика электронных и ионных процессов: лекционные методические разработки/И.В.Уйманов. - Екатеринбург: ИЭФ УрО РАН, 2004. - 84 с.
3. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. - Киев: Наукова думка, 1981.— 339 с.
4. Емельянов А.А., Емельянова Е.А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 160 с.
5. Тотаренко Н.И., Кравченко В.Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. - М.:ФИХМАТЛИТ, 2006. - 192 с.

A.A. Terentev, E.R. Dolgova

PROBLEMS OF MODELING AND AUTOMATED DESIGN OF EMISSION-BASED MICROELECTRONIC DEVICES

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

The physical processes occurring in emission-based microelectronic devices are considered, the features and problems arising in the calculation and modeling of these physical processes are discussed. The formulas given in the article and the features of their application are valid for a wide range of vacuum devices working in the HF and microwave ranges.

Key words: emission-based microelectronic devices, emission processes, electrostatic calculation, electrodynamic calculation, high-frequency calculation.

УДК 621.314

М.Г. Тылес, М.В. Полковников, С.П. Груздев, Э.А. Юнусов, С.И. Войтковский

«АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ»

Волго-Вятский филиал Московского технического университета связи и информатики,
НПП «Полет».

На конкретном примере проектирования однотактного импульсного преобразователя напряжения с трансформаторной развязкой первичных и выходных цепей поясняются процессы определения оптимальных электрических параметров элементов выходного фильтра и силового импульсного трансформатора, разработки конструкций. Автоматизация процесса проектирования и оптимизации на первом этапе и последующего проектирования оптимальных (по массогабаритным показателям) конструкций трансформатора и дросселя фильтра с оформлением конструкторской документации достигается в результате применения оригинальных программ для ЭВМ, разработанных авторами.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения с трансформатором, процесс параметрического и конструктивного проектирования, оптимизация

При создании электронных устройств обработки сигналов и коммутации в системах телекоммуникаций, специализированных вычислительных комплексов, и многих других систем часто возникает необходимость разработки стабилизированных источников вторичного электропитания (ИВЭП) с импульсными преобразователями напряжения (ИПН) в качестве силовой части.

Ввиду этого автоматизация проектирования ИПН весьма актуальна. Общие принципы и особенности решения этой задачи описаны в [1].

В настоящей работе рассмотрен конкретный пример проектирования ИПН типа DC/DC, выполняемого по схеме (рис. 1) однотактного прямоходового преобразователя с размагничивающей обмоткой (ПРО) $w3$ в силовом импульсном трансформаторе (СИТ) TV1. Количество витков этой обмотки $w3 = w1$ при обеспечении сильной магнитной связи.

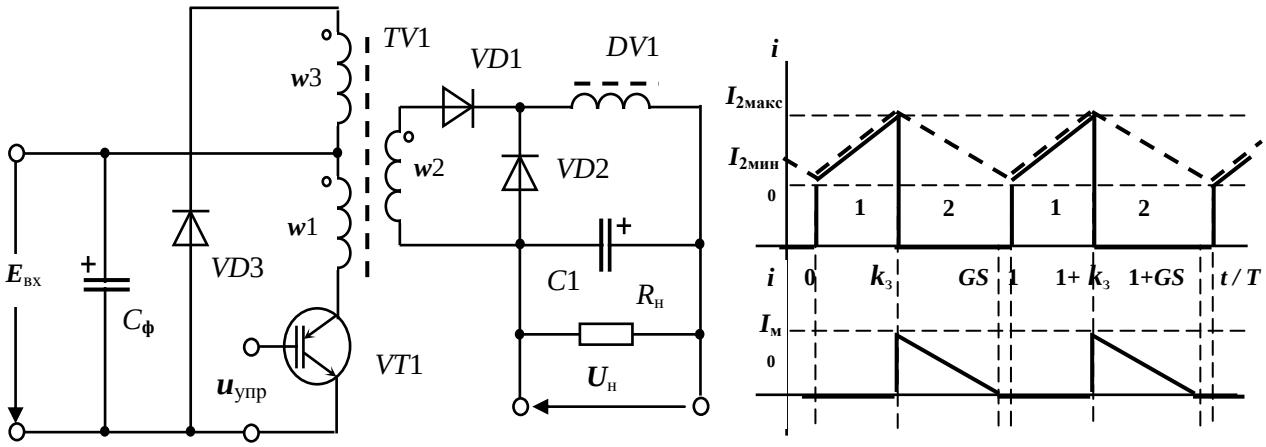


Рис.1. Упрощенная схема однотактного ПРО и формы токов в обмотках СИТ и дросселя

На вход преобразователя подается постоянное напряжение $E_{ВХ}$ от выпрямителя или другого первичного источника. В квазиустановившемся режиме на транзистор VT1 (здесь типа IJBT) поступает периодическая последовательность управляющих (ШИМ) импульсов с тактовой частотой F и коэффициентом заполнения $k_З = t_И F$. Период повторения импульсов $T = 1/F$.

В интервале времени длительностью $t_и$ (помечен цифрой 1 на графиках токов), когда транзистор насыщен, на первичной **w**1 и вторичной **w**2 обмотках СИТ постоянное напряжение положительной полярности, диод VD1 открыт, а диоды VD2 и VD3 заперты. Энергия от источника передается во вторичную цепь, где питается нагрузка $R_н$, заряжается конденсатор $C1$ и накапливается энергия в магнитном поле дросселя DV1.

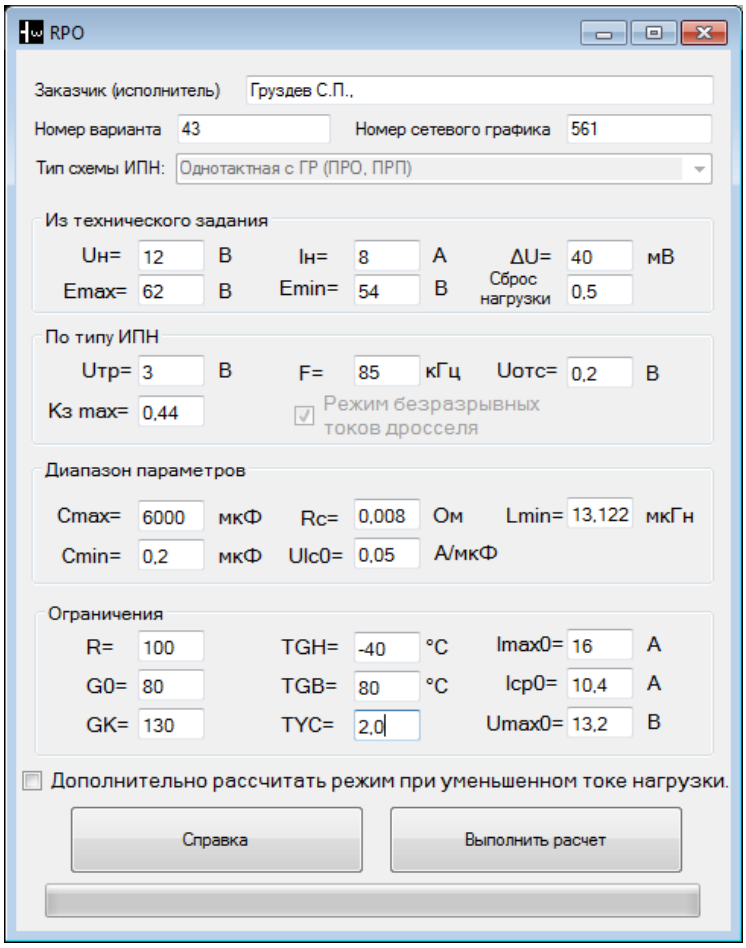


Рис. 2. Основная рабочая форма программы RPO

Токи во вторичной обмотке СИТ (сплошные линии) и в обмотке дросселя (пунктирные линии) равны и постепенно нарастают по мере накопления энергии в сердечнике дросселя (см. рис. 1). Ток в первичной обмотке **w**1 изменяется аналогично, но отличается величиной. Кроме рабочего тока, по первичной обмотке протекает ток намагничивания сердечника СИТ, который тоже нарастает.

В интервале времени длительностью $(1-k_з)T$ (помечен цифрой 2 на графиках токов), когда транзистор заперт, на первичной **w**1, вторичной **w**2 и третьей **w**3 обмотках СИТ появляются напряжения отрицательной полярности, диод VD1 заперт, а диоды VD2 и VD3 открыты. Токи в первичной и вторичной обмотках прерываются (см. рис. 1). Энергия от источника не передается во вторичную цепь, Питание нагрузки $R_н$ происходит за счет энергии, накопленной в конденсаторе $C1$ и дросселе DV1. ЭДС индукции поддерживает в дросселе ток в прежнем направлении, но ток уменьшается, поскольку сердечник дросселя размагничивается. ЭДС индукции на третьей обмотке СИТ открывает диод VD3, ток намагничивания трансформатора перебрасывается в обмотку **w**3 и размагничивает сердечник СИТ до остаточной индукции, перекачивая энергию из сердечника в конденсатор $C_ф$. Ток в обмотке **w**3 показан на рис. 1 (нижний график).

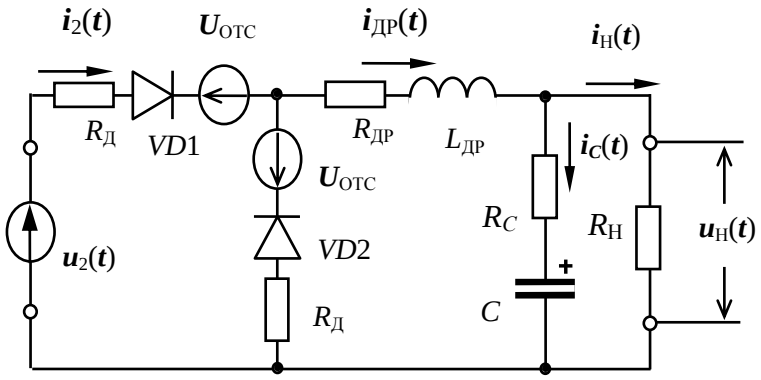


Рис. 3. Эквивалентная схема выходных частей прямоходовых ИПН с гальванической развязкой первичных и выходных цепей

В интервале времени длительностью $(1-k_3)T$ (помечен цифрой 2 на графиках токов), когда транзистор заперт, на первичной **w**1, вторичной **w**2 и третьей **w**3 обмотках СИТ появляются напряжения отрицательной полярности, диод VD1 заперт, а диоды VD2 и VD3 открыты. Токи в первичной и вторичной обмотках прерываются (см. рис. 1). Энергия от источника не передается во вторичную цепь, Питание нагрузки $R_н$ происходит за счет энергии, накопленной в конденсаторе *C*1 и дросселе DV1. ЭДС индукции поддерживает в дросселе ток в прежнем направлении, но ток уменьшается, поскольку сердечник дросселя размагничивается. ЭДС индукции на третьей обмотке СИТ открывает диод VD3, ток намагничивания трансформатора перебрасывается в обмотку **w**3 и размагничивает сердечник СИТ до остаточной индукции, перекачивая энергию из сердечника в конденсатор $C_ф$. Ток в обмотке **w**3 показан на рис. 1 (нижний график).

С поступлением следующего управляющего импульса на транзистор все процессы повторяются.

Пусть имеется задание на проектирование преобразователя:

- постоянное напряжение на нагрузке $U_Н = 12$ В; ток в нагрузке $I_Н = 8$ А;
- пульсации выходного напряжения (размах) – не более 40 мВ;
- напряжение первичного источника изменяется в пределах: $E_{max} = 62$ В, $E_{min} = 54$ В;
- диапазон рабочих температур: $-40^o \div +80^o C$.

Приступаем к проектированию. Открываем программу “RPO” (режим, параметры, оптимизация, гос. регистрация № 2016662659, 2016 г.) и заполняем окошки рабочей формы (рис. 2), руководствуясь предложениями программы и указаниями, которые вызываются на экран, если нажать кнопку «Справка». Кнопка «Выполнить расчет» запускает расчетный процесс.

Программа моделирует динамические процессы во вторичных (выходных) цепях ИПН, используя эквивалентную схему (рис. 3), в которой напряжение на входе $u_2(t)$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов с коэффициентом заполнения k_3 и тактовой частотой F, получаемых с вторичной обмотки СИТ, Моделирование проводится, начиная с первого включения до установления динамического равновесия.

Величины индуктивности L дросселя и емкости C конденсатора выходного фильтра ИПН подбираются для получения требуемой динамики процессов и пульсаций в установившемся режиме по критерию минимальных габаритов и массы выходного фильтра.. При этом контролируется обеспечение допустимых величин выбросов выходного напряжения и токов через ключевые элементы (транзистор и диоды) после первого включения ИПН, величин

выходных напряжения и тока в установившемся режиме. Подбираются величины k_3 и амплитуды входных импульсов, необходимые для обеспечения требуемой величины напряжения на нагрузке во всем диапазоне изменения напряжения первичного источника. Исследуется целесообразность использования в ИПН системы «мягкого пуска» и определяются ее временные характеристики. Определяются группы числовых величин, характеризующих электрические режимы фильтра и силового импульсного трансформатора (СИТ). Эти величины необходимы для последующего автоматизированного расчета конструкций дросселя и СИТ.

Результаты работы программы оформляются в отдельном файле. В данном примере имя файла: «Груздев С.П.,, Вар 43, С граф 561.doc». Заключительная часть файла приведена на рис. 4.

Следовательно, цепь 'мягкого пуска' должна работать в пределах первых
180 квазипериодов и иметь постоянную времени 423,529 мкс
При этом в переходном процессе:
ImaxM = 11,95 А PImaxM = 25 UmaxM = 12,053 В PUmaxM = 140

Установившийся режим (+80°С): N = 185 U2вх = 33,225 В
См = 141,02 мкФ L = 59,049 мкГн Кз = 0,38
Im = 0,781 А UIc = 0,005 А/мкФ Ucp/Uвх = 0,362
Umax = 12,039 В Ucp = 12,03 В Umin = 12,02 В
Imax = 8,803 А Icp = 8,022 А Imin = 7,241 А
dU = 18,571 мВ TIMIN = 1
Величина ёмкости конденсатора при нормальной температуре (+20°С)
равна: 105,765 мкФ. Индуктивность дросселя = 59,049 мкГн.

Данные для расчёта трансформатора:
Напряжение на первичной обмотке U1 = 56 В.
Напряжение на вторичной обмотке U2 = 33,225 В.
Коэффициент трансформации Q2 = 0,593.
Токи, приведённые к первичной обмотке:
I1max = 5,223 А, I1ср= 1,81 А, I1min = 4,296 А.
Относительный интервал существования тока в обмотках Кз = 0,38

Рис. 4. Результаты работы программы ‘RPO”

Теперь, когда определены электрические параметры элементов, приступаем к конструктивному расчету импульсного трансформатора. Используем программный блок «КТД» (конструирование трансформаторов и дросселей), состоящий из двух программ.

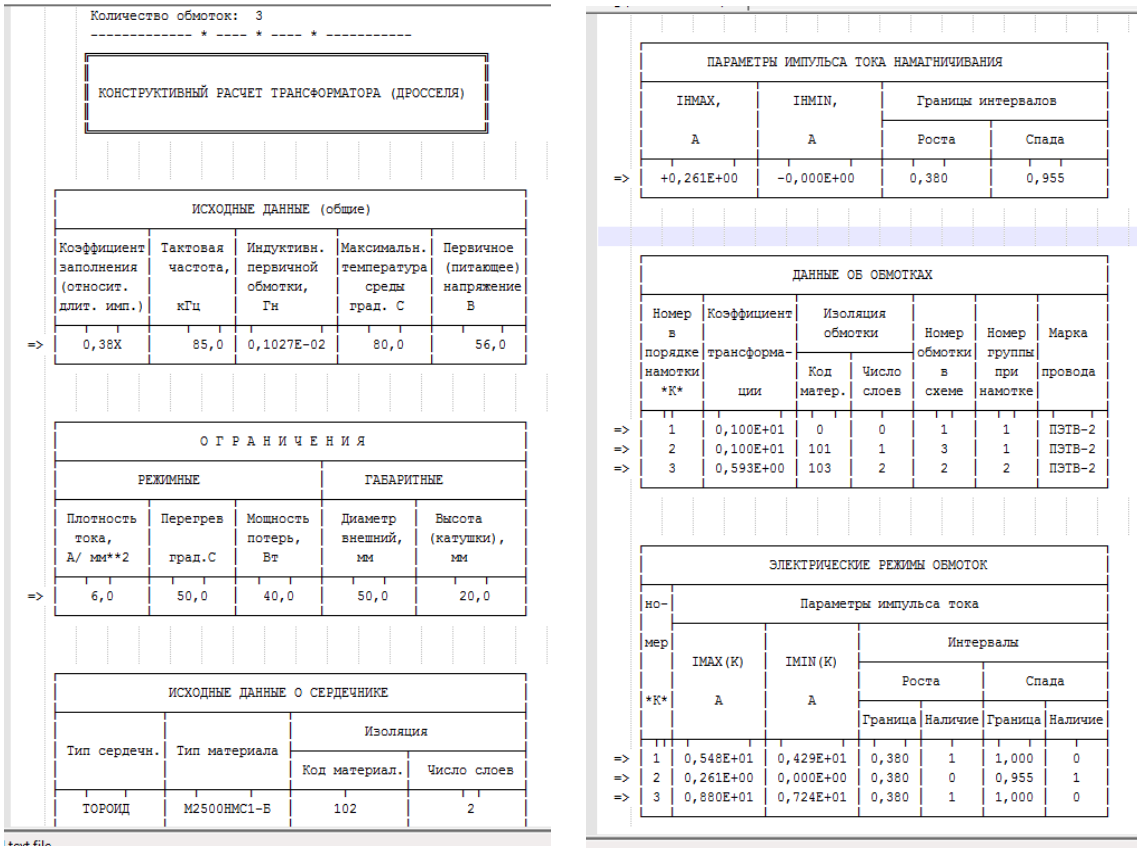
“TRANDR1” (трансформатор, дроссель, гос. регистрация № 2017663550, 2017 г.) - программа формирования исходных данных для автоматизированного конструктивного расчета трансформаторов и дросселей выходных фильтров ИВЭП.

Для обеспечения автоматизации конструктивного проектирования все исходные данные (тип конструкции, материал сердечника и его свойства, требуемые параметры, электрические режимы обмоток, порядок намотки, типы и параметры проводов, материалы изоляции и пр.) необходимо представить в табличной форме, пригодной для редактирования.

Процесс такого формирования исходных данных осуществляется посредством программы “TRANDR1”, результатом работы которой является загрузочный файл с таблицами исходных данных.

Этот файл использует вторая программа блока «КТД» – “TRAN” которая считывает исходные данные, осуществляет конструктивный расчет трансформатора (или дросселя), а затем создает файлы конструкторской документации.

Вызываем программу “TRANDR1” и после появления на экране рабочей формы заполняем ячейки, используя справки с рекомендациями по заполнению таблиц, выпадающие списки материалов сердечников, изоляции, марок проводов. Файл с частично заполненными таблицами выгружается в текстовый редактор и дорабатывается. На рис. 5 представлены сформированные таблицы с данными из загрузочного файла «KTD-zag (01.02.2018).txt».



Количество обмоток: 3

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА (ДРОССЕЛЯ)

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ (общие)

	Коэффициент заполнения (относит. длит. имп.)	Тактовая частота, кГц	Индуктивн. первичной обмотки, Гн	Максимальн. температура среды град. С	Первичное (питающее) напряжение В
=>	0,38X	85,0	0,1027E-02	80,0	56,0

О Г Р А Н И Ч Е Н И Я

	РЕЖИМНЫЕ			ГАБАРИТНЫЕ	
	Плотность тока, А/ мм**2	Перегрев град.С	Мощность потерь, Вт	Диаметр внешний, мм	Высота (катушки), мм
=>	6,0	50,0	40,0	50,0	20,0

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ О СЕРДЕЧНИКЕ

Тип сердечн.	Тип материала	Изоляция	
		Код материал.	Число слоев
ТОРОИД	М2500НМС1-Б	102	2

ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСА ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ

	IHMAX, A	IHMIN, A	Границы интервалов	
			Роста	Спада
=>	+0,261E+00	-0,000E+00	0,380	0,955

ДАННЫЕ ОБ ОБМОТКАХ

	Номер в порядке намотки *K*	Коэффициент трансформации	Изоляция обмотки		Номер обмотки в схеме	Номер группы при намотке	Марка провода
			Код матер.	Число слоев			
=>	1	0,100E+01	0	0	1	1	ПЭТВ-2
=>	2	0,100E+01	101	1	3	1	ПЭТВ-2
=>	3	0,593E+00	103	2	2	2	ПЭТВ-2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОБМОТОК

	но-мер *K*	Параметры импульса тока					
		IMAX(K) A	IMIN(K) A	Интервалы			
				Роста		Спада	
				Граница	Наличие	Граница	Наличие
=>	1	0,548E+01	0,429E+01	0,380	1	1,000	0
=>	2	0,261E+00	0,000E+00	0,380	0	0,955	1
=>	3	0,880E+01	0,724E+01	0,380	1	1,000	0

Рис. 5. Результаты работы программы ‘TRANDR1”

Вызывается программа “TRAN” и на основной рабочей форме нажимаем кнопку «Открыть», Появляется диалоговое окно, в котором нужно выбрать путь к заготовочному файлу и «щелкнуть» но файлу мышкой. Далее программа загружает данные из заготовочного файла.

Правильность загруженных данных можно проверить в загрузочных таблицах во вкладке «Исходные данные» ⇒ «Общие» и «Данные об обмотках» и при необходимости скорректировать их в таблицах заготовочного файла, вызвав его в рабочее поле во вкладке «Исходные данные» ⇒ «Текст». После корректировки нужно загрузить в программу новые данные с помощью кнопки «Обновить данные». Исходные данные в соответствующих загрузочных таблицах изменятся, проверяем их.

После проверки данных следует выбрать типоразмеры тороидальных сердечников заданного материала из стандартного ряда, которые предположительно можно использовать в проектируемом изделии. Для этого заходим по вкладке «Выбор сердечников». На экране получим дополнительное окно с перечнем всех типоразмеров сердечником стандартного ряда. Можно выбрать только часть типоразмеров, либо все сердечники ряда. Выбираем полный ряд.

Далее нажимаем кнопку "Рассчитать". Производится разложение импульсов тока в обмотках в ряды Фурье (30 гармоник), учет влияния поверхностного эффекта при расчете эффективного действующего значения тока, подбор проводов и формирование жгутов для каждой обмотки, перебор сердечников, конструктивный расчет, проверка на соответствие заданным требованиям и ограничениям, выбор наилучшего варианта, составление отчета и типовой конструкторской документации.

Затем по вкладке "Отчет" вызываем на рабочее поле результаты (рис. 6): в левую часть поля - таблицы с числовыми значениями параметров квазиоптимального трансформатора (дросселя), а в правую часть поля - протокол перебора сердечников и выбора варианта с наилучшими массогабаритными показателями, с данными об изменениях значений B и H, на основе которых строится график процесса перемагничивания сердечника и подсчитываются потери энергии на перемагничивание (гистерезис).

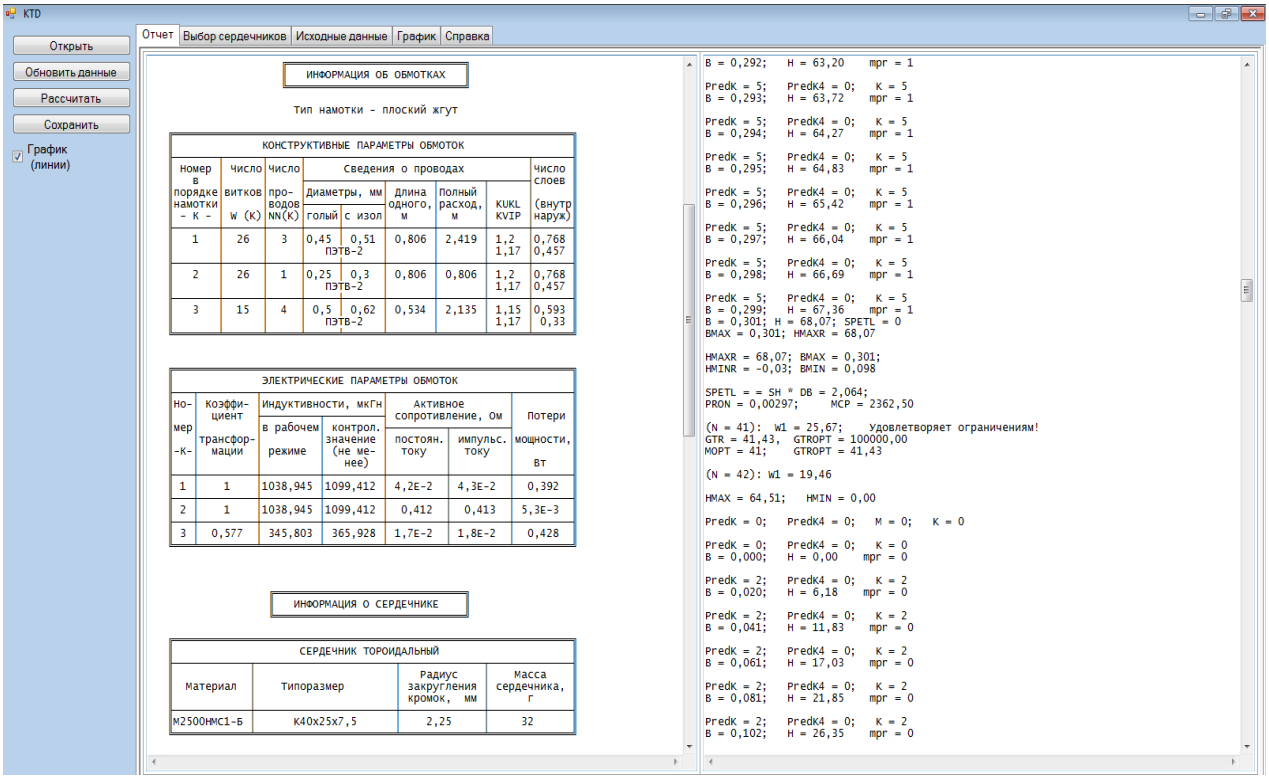


Рис. 6. Рабочее поле программы ‘TRAN” с результатами

По вкладке «График» выводим в рабочее поле график процесса перемагничивания сердечника в установившемся периодическом режиме (рис. 7).

Отметим, что программа позволяет после нажатия кнопки «Открыть» загрузить не заготовочный файл, а файл «Отчет» из папки какого-либо предыдущего расчета, сохраненного в архиве. Затем во вкладке «Исходные данные» ⇒ «Текст» вывести в рабочее окно его содержимое. В первой части отчета находятся таблицы с исходными данными, в которых следует либо изменить числовые значения исходных данных, либо выбрать другой материал для сердечники (следить за точным указанием его марки). Далее следует нажать кнопку «Обновить данные», выбрать другие типоразмеры сердечников, нажать кнопку «Рассчитать».

На основании анализа результатов расчета делается заключение о целесообразности сохранения результатов.

После нажатия кнопки «Сохранить» в директории с текущем местоположением программы “TRAN” создается новая директория с именем (например) «01.02.2018 16-01-00». Здесь «01.02.2018» – дата создания этой директории, 16-01-00 - время создания директории. В эту директорию сохраняются файлы отчета, листов конструкторской документации и графика процесса перемагничивания сердечника.

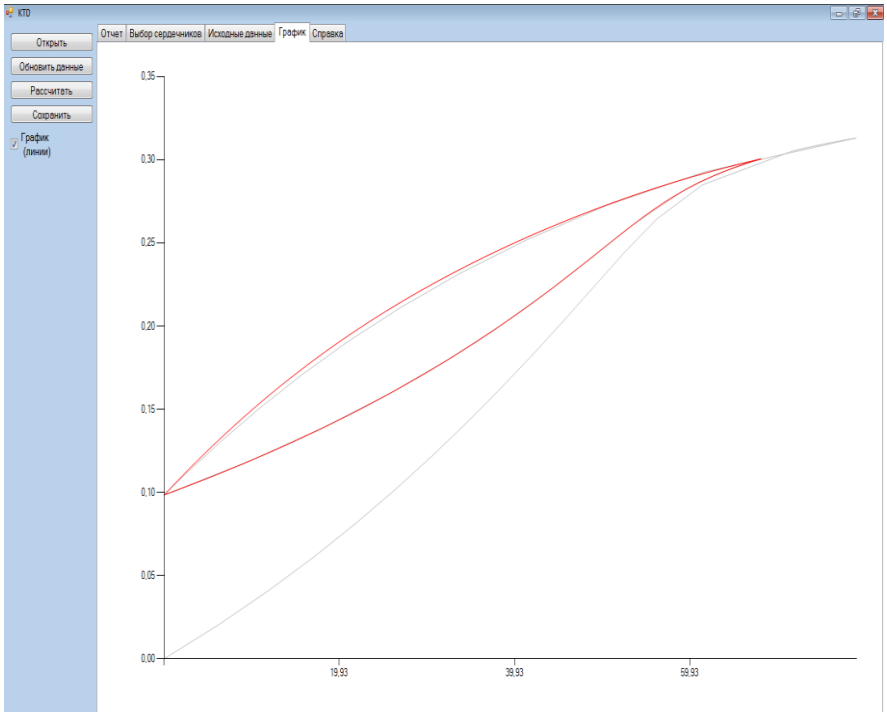


Рис. 7. График перемагничивания сердечника

Проектирование конструкции дросселя с использованием блока программ «КТД» проводится подобным образом. Различие в том, что у дросселя только одна обмотка, ток намагничивания совпадает с рабочим током обмотки, используются тороидальные сердечники из МО-пермаллоя (имеются в базе) из-за постоянного подмагничивания.

Библиографический список

1. Тылес М.Г. Особенности автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания для систем телекоммуникаций/ М.Г. Тылес, С.П. Груздев //Труды XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ - 2016, г. Н.Новгород, 22 апр. 2016 г./ НГТУ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 217-218.

M. Tyles, M. Polkovnikov, S. Gruzdev, E. Unusov, S. Voitkovsky

“COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE POWER PART OF THE SECONDARY POWER SUPPLY IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS”

Volgo-Vyatka branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, SPE "Polet"

An algorithm of defining optimal electrical parameters for the output filter, power transformer elements, and design engineering is explained using the specific example of designing a single-step pulse-voltage converter with transformer isolation of the primary and output circuits. The authors’ original software enables the computer-aided design and optimization at the first stage, as well as the following design of the weight-size optimal constructions of the transformer and filter choke, and generating the design documents.

Keywords: pulse-voltage converter with transformer, parametric and stuctural design, optimization.

УДК 530.1: 537.86 + 621.372.22 + 621.396.96 + 681.5.015

С.В. Стойчев, В.Н. Белослудцев, П. А. Ушаков

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ С ФРАКТАЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

В работе проведено сравнение электрических характеристик и конструктивных параметров двух типов элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ) с целью выбора конструктивно-технологического варианта ЭФИ для промышленного изготовления. Проведенные оценки показали, что ЭФИ на основе резистивно-емкостной структуры с распределенными параметрами имеет преимущество перед его аналогом на дискретных компонентах по технологичности конструкции, возможности подстройки характеристик после изготовления, возможности изготовления по интегральной технологии. Это позволяет рекомендовать его для изготовления в промышленных масштабах.

Ключевые слова: элемент с фрактальным импедансом, *R*-*C*-*NR*-линия, *RC*-цепи Фостера, конструкция элемента с фрактальным импедансом, толстопленочная технология.

Несмотря на то, что дробное исчисление имеет более чем 300 летнюю историю, конструирование и синтез цепей и систем дробного (нецелого) порядка только сравнительно недавно стали предметом повышенного внимания. Математическая концепция дробного исчисления применяется в различных научных дисциплинах из-за ее эффективности при моделировании различных процессов, в частности в физике, биохимии, медицине, материаловедении и технике управления [1]. Для аналогового моделирования динамических систем и устройств дробного порядка нужны специальные аналоговые элементы, обладающие импедансом, который зависит от частоты в дробной степени α ($|\alpha|< 1$). Такие двухполюсные элементы получили название *элементы с фрактальным импедансом* (ЭФИ)

В общем виде фрактальный импеданс описывается выражением [1]

$$Z_F = \frac{1}{(j\omega)^{\alpha} C_{\alpha}} = \left|Z_F\right| e^{j\varphi} = \frac{1}{\omega^{\alpha} C_{\alpha}} e^{-j\alpha\frac{\pi}{2}},$$

где C_{α} – так называемая *фрактальная емкость*, имеющая размерность [Ом$^{-1}$·с$^{\alpha}$], ω – круговая частота.

В настоящее время окончательно еще не определен конструктивно-технологический вариант ЭФИ, который бы отвечал требованиям к коммерческому элементу, таким как

- технологичность конструкции;
- совместимость технологии изготовления с современными технологическими процессами изготовления типовых интегральных микросхем;
- хорошая воспроизводимость основных параметров характеристик;
- возможность подстройки параметров характеристик для компенсации технологических погрешностей.

В качестве ЭФИ наибольшее применение нашли двухполюсники в виде *RC*-цепей Фостера или Кауэра, которые строятся на основе физической реализации дробно-рациональных функций, аппроксимирующих дробный оператор $1/p^{\alpha}$ (p – комплексная частота) [1]. Это объясняется тем, что для реализации таких ЭФИ можно использовать хорошо разработанные методы аппроксимации дробных операторов, а также стандартные резисторы и конденсаторы. Однако ЭФИ, содержащий десятки дискретных компонентов, практически невозможно подстраивать, чтобы изменить дробный показатель α, что является основным преимуществом ЭФИ.

В работах [2 – 4] предложена другая конструктивно-технологическая основа ЭФИ – резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами (*RC*-ЭРП). Разработанные программы синтеза конструкции ЭФИ на этой основе позволяют создавать функциональные элементы в виде пленочных или полупроводниковых интегральных конструкций. Как показано

в [4], в таких интегральных конструкциях можно изменять α в достаточно широких пределах (0,01 до 0,85), как с помощью механической подгонки (создание неоднородностей путем лазерной резки), так и с помощью электрического поля (в полупроводниковых структурах).

В данной работе проведено сравнение электрических характеристик и конструктивных параметров ЭФИ, созданных на описанных выше принципах.

Используя программу синтеза ЭФИ на основе *RC*-ЭРП [5], графический пользовательский интерфейс которой изображен на рис. 1, *а*, была получена схема замещения ЭФИ. На рис. 1, *б* (кривая 1) показана ФЧХ импеданса синтезированного ЭФИ, соответствующая его схеме замещения. Адекватность полученного решения была проверена схемотехническим моделированием, при котором *RC*-линии моделировались лестничными *RC*-цепями с числом звеньев 512 (рис. 1, б (кривая 2)).

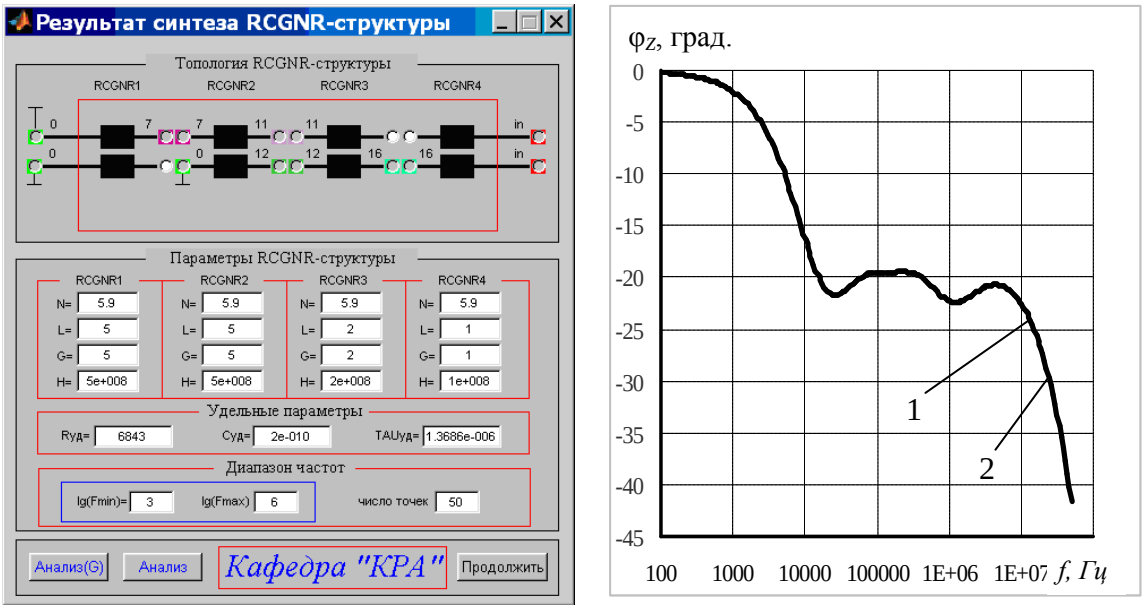
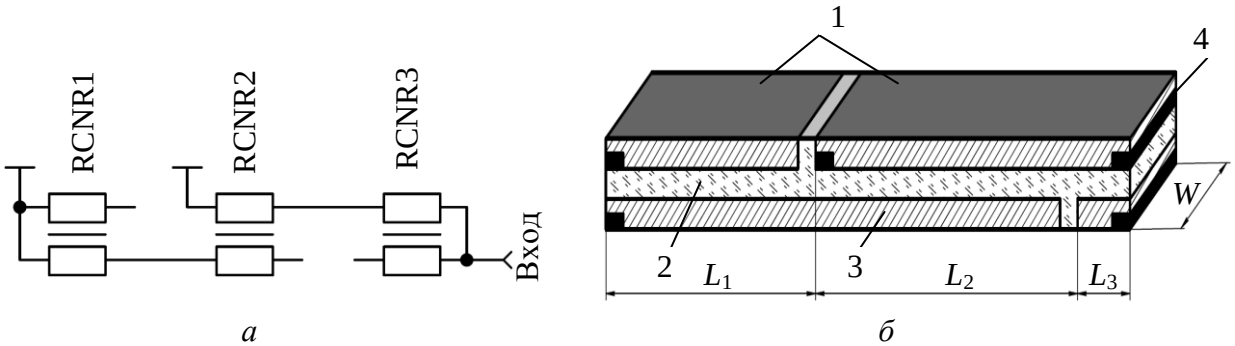


Рис.1. Результаты работы программы синтеза *R-C-NR* ЭФИ при заданном уровне постоянства ФЧХ импеданса –20°: *а* – диалоговое окно с результатом синтеза ЭФИ; *б* – ФЧХ синтезированного ЭФИ

На основе полученной схемы замещения (рис. 2, *а*) была спроектирована конструкция ЭФИ (рис. 2, *б*).



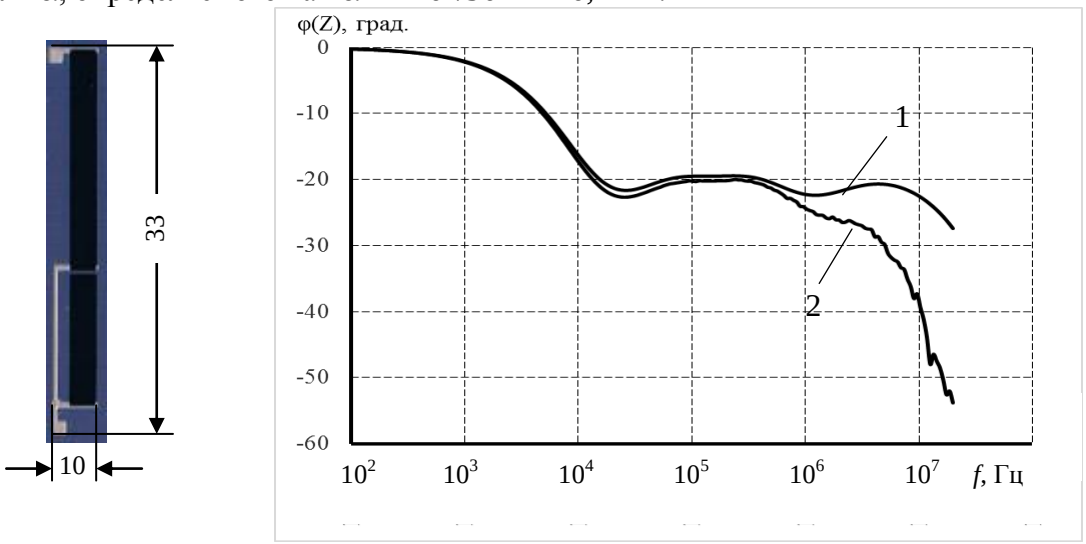
а *б*

Рис.2. Спроектированный ЭФИ с уровнем постоянства ФЧХ импеданса –20°: *а* – схема замещения; *б* – эскиз конструкции (1 – слой NR, 2 – слой C, 3- слой R, 4 – контакты)

Здесь участки структуры, ограниченные размерами L_1, L_2, L_3, представляют физическую реализацию соответствующих *R-C-NR*-линий, изображенных на схеме замещения (рис. 2, *а*).

Спроектированный ЭФИ был изготовлен по толстопленочной технологии на действующем предприятии по производству интегральных микросхем. Фотоизображение изготовленного образца ЭФИ показано на рис. 3, *а*, а измеренные ФЧХ импеданса образца ЭФИ

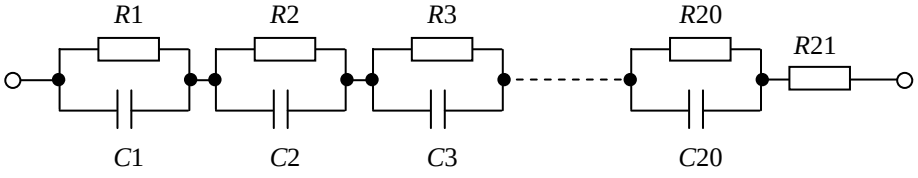
в сравнении с ФЧХ схемотехнической модели, показаны на рис. 3, *б*. Видим, что в реальной конструкции ЭФИ величина заданного постоянства фазы выполнена с достаточно высокой точностью, но в области частот выше 1 МГц наблюдается быстрый спад графика ФЧХ. Это обусловило уменьшение диапазона частот, в котором элемент сохраняет заданное значение показателя α, определяемого как $\alpha = -20°/90° = -0{,}2222$.



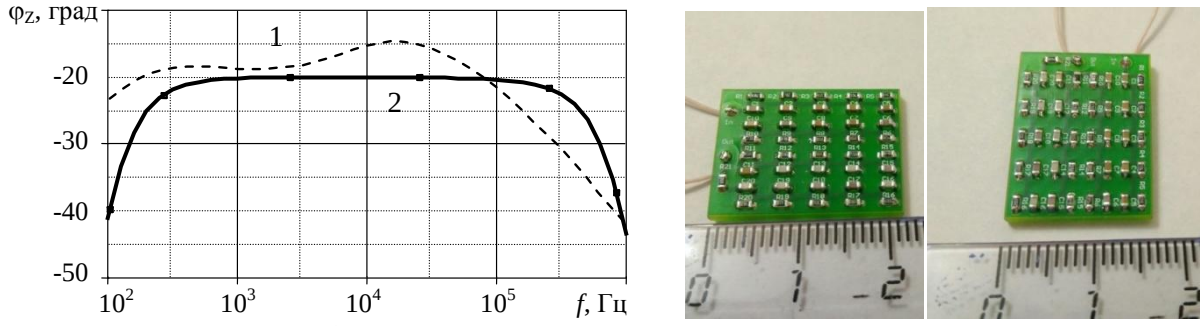
а *б*

Рис. 3. ЭФИ: *а* – фотоизображение; *б* – графики ФЧХ входного импеданса (1 – синтезированная ФЧХ, 2 – измеренная ФЧХ

Для сравнения характеристик и параметров ЭФИ на основе многозвенной *RC*-цепи с ЭФИ на основе *RC*-ЭРП, была синтезирована схема в виде первой формы Фостера, изображенная на рис. 4, *а*, содержащая 20 *RC*-звеньев. Теоретическая (при номиналах элементов, полученных в результате синтеза) ФЧХ такой цепи изображена на рис. 4, *б* (кривая 2). Постоянство фазы импеданса составляет –20° и при допустимой неравномерности в ±1° сохраняется в пределах 3,64 декады. Если бы такой ЭФИ изготовить в соответствии с расчетными номиналами элементов, то это бы был очень хороший ЭФИ.



а



б *в*

Рис. 4. ЭФИ на основе *RC*-цепи Фостера: *а* – схема цепи; *б* – ФЧХ импеданса; *в* – конструкция

Данный ЭФИ был изготовлен в виде печатного узла, конструкция которого изображена на рис. 4, *в*. Однако для сборки не удалось подобрать номиналы стандартных резисторов и конденсаторов, точно соответствующие рассчетным значениям. Все резисторы и конденсаторы

были серии 0603, а их номиналы выбирались из ряда 096, наиболее близкие к рассчетным. При этих параметрах элементов цепи в программе LTSpice была получена ФЧХ входного импеданса, изображенная на рис. 4, *б* (пунктирная кривая 1).

Видим, что воспроизвести результат синтеза ЭФИ на *RC*-элементах даже при 20-звенной *RC*-цепи оказалось невозможно в виду того, что в стандартных рядах резисторов и конденсаторов не нашлось номиналов, полученных при синтезе. Точный подбор номиналов можно осуществить, если резисторы и конденсаторы каждого звена составлять из нескольких элементов. Несомненно, это вызовет увеличения площади платы и увеличит трудоемкость сборочных операций.

Выводы

Таким образом, сравнение двух конструктивно-технологических вариантов ЭФИ показывает, что ЭФИ на основе *RC*-ЭРП, изготовленные с помощью интегральных технологий, более предпочтительны в качестве коммерческих элементов, чем ЭФИ в виде сборочных единиц из дискретных резисторов и конденсаторов. Они имеют меньшие размеры при одинаковых диапазонах рабочих частот, представляют конструктивно законченные элементы, позволяют простыми технологическими методами вносить изменения в частотные характеристики импеданса для компенсации технологических погрешностей изготовления и регулировки параметров.

В то же время ЭФИ на основе *RC*-ЭСП можно рекомендовать для экспериментальных исследований и моделирования фрактальных процессов и устройств при отсутствии промышленно изготавливаемых ЭФИ.

Библиографический список

1. Гильмутдинов А.Х., Ушаков П.А. Фрактальные элементы: Учебное пособие / Предисловие С.А. Никитова / Под ред. А.Х. Гильмутдинова. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2013. 308 с.

2. Гильмутдинов А.Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – 350 с.

3. Максимов, К.О. Разработка и обоснование структурной модели толстопленочных R-C-NR-элементов с распределёнными параметрами / П.А. Ушаков. // Вестник ИжГТУ, № 2, 2011. С. 145 – 148.

4. Максимов К.О. Решение задачи обеспечения заданных параметров фрактальных радиоэлементов на основе резистивно-емкостной среды: автореферат диссертации канд. техн. наук. – Ижевск: ИжГТУ, 2013. – 16 с.

5. Koton J., Kubanek D., Ushakov P., Maksimov K. Synthesis of fractional-order elements using the RC- EDP approach // In Proceedings of the 2017 23 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2017). Catania, Italy: 2017. 4 p.

S.V. Stoichev, V.N. Belosludtsev, P.A Ushakov

COMPARE OF CHARACTERISTICS OF ELEMENTS WITH FRACTAL IMPEDANCE

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

In this paper, we compared the electrical characteristics and design parameters of two types of elements with fractal impedance (EFI) to select the technological version of the EFI for industrial production. The made evaluations showed that the EFI on the basis of a resistive-capacitive structure with distributed parameters has the advantage over its analog on discrete components in terms of process design, the possibility of adjusting characteristics after manufacturing, and the possibility of manufacturing using microcircuit technology. This allows us to recommend it for manufacturing on an industrial scale.

Key words: element with fractal impedance, R-C-NR-line, Foster RC-chains, element design with fractal impedance, thick-film technology.

УДК 621.396

К.С. Фомина, А.В. Пилькевич, В.Д. Садков

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНОВ

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева

Предложены топологии малогабаритных поглощающих элементов волноводных, коаксиальных и микрополосковых аттенюаторов для реализации малых ослаблений, отличающиеся от известных (с двухслойной резистивной пленкой, пониженной температурной стабильностью и сложной технологией изготовления) использованием однослойной резистивной пленки с центральной областью, обладающей малым (проводник) удельным сопротивлением. Разработана методика расчета и проведено моделирование предложенных поглощающих элементов в отечественном программном комплексе *Elcut*.

Ключевые слова: аттенюаторы; поглощающие элементы; однородная резистивная пленка; малые ослабления.

Введение

Для построения волноводных, коаксиальных и микрополосковых аттенюаторов широко используются поглощающие элементы (ПЭ) прямоугольной (средние и большие ослабления) и сложной формы (средние и малые ослабления) на основе однородной резистивной пленки [1 - 3].

Уменьшение габаритов аттенюаторов приводит в рамках указанных топологий ПЭ к затруднениям в реализации малых ослаблений и требует перехода к ПЭ на основе кусочно-однородных структур [4-6]. Такие ПЭ отличаются дополнительной резистивной пленкой пониженного удельного поверхностного сопротивления между входным и выходным контактами. Это усложняет процесс изготовления, понижает температурную стабильность и, как правило, требует введения дополнительной операции подгонки для получения требуемых параметров ПЭ с требуемой точностью [6].

В настоящей работе поставленная задача решается с использованием ПЭ на основе однородной резистивной пленки путем введения симметрично расположенной относительно координатных осей области размерами $2f$ x $2c$ (рис. 1,а), выполняющей роль пленки с малым (проводник) удельным поверхностным сопротивлением. Анализ ПЭ таких топологий проводится строгим методом конформных отображений [7, 8].

В общем виде задача формулируется следующим образом: на действительной оси даны раздельно лежащие отрезки $a_j b_j$, j = 1, 2,…, n ($a_1 < b_1 < ... < b_n$). Через D^{I} обозначена совокупность этих отрезков, через D^{II} - остальная часть действительной оси ($D = D^{I} + D^{II}$ - вся действительная ось), так что D^{II} состоит из конечного числа отрезков $b_j a_{j+1}$ (j = 1, 2,…, n-1) и из бесконечного отрезка $b_n a_1$, состоящего из полупрямых $b_n < x < \infty$ и $-\infty < x < a_1$. Требуется найти функцию $\Phi(z) = U+iV$, гомоморфную в верхней полуплоскости и ограниченную на бесконечности, по граничному условию $U^{+} = f(t)$ на D^{I} и $V^{+} = g(t)$ на D^{II}. Известно, что задача не имеет решений, ограниченных вблизи всех концов отрезков. Если отказаться от условия ограниченности $\Phi(z)$ и требовать лишь ограничения интеграла от нее (функции $f(t)$ и $g(t)$ удовлетворяют условию Гельдера), то задача решается с точностью до n+1 произвольного постоянного. Наконец, задача имеет единственное решение, если, кроме того, потребовать, чтобы $\Phi(z)$ была ограниченной вблизи каких - либо отрезков и задать ее значение в некоторой точке. Тогда общее решение задачи класса h_0 имеет вид [7]:

$$\Phi(z) = \Psi(z) + \varphi_0(z), \qquad (1)$$

где $\varphi_0(z)$ – общее решение класса h_0 однородной задачи (при $f(t) = g(t) = 0$),

$$\varphi_0(z) = \frac{C_0 z^n + C_1 z^{n-1} + ... + C_n}{\sqrt{\prod_{j=1}^{n}(z-a_j)(z-b_j)}}, \qquad (2)$$

$C_0, ..., C_n$ - произвольные действительные числа;

$\psi(z)$ – одно из частных решений исходной задачи,

$$\psi(z) = \frac{1}{\pi i}\sqrt{\frac{\prod_{j=1}^{n}(z-a_j)}{\prod_{j=1}^{n}(z-b_j)}}\int_D \frac{\prod_{j=1}^{n}(z-b_j)}{\prod_{j=1}^{n}(z-a_j)}\frac{h(t)st}{t-z}, \qquad h(t) = \begin{cases} f(t) \text{ на } D^1 \\ \text{ig(t) на } D^{11} \end{cases}.$$

Общий вид решения исходной задачи класса $h(a_1,....,a_n)$ имеет вид

$$\Phi(z) = \psi(z) + C\sqrt{\coprod_{j=1}^{n}(z-a_j) / \coprod_{j=1}^{n}(z-a_j)},$$

где C – произвольная постоянная.

При неэквипотенциальных контактах распределение потенциала на них задается функцией $f(t)$, результирующее решение дается функцией $\Phi(z)$, а потенциальная функция определяется как $U(x,y) = Re\Phi(z)$. Если граница не является линией тока (поле существует и за пределами структуры), то условия на участках границы $b_j a_{j+1}$ определяет функция $q(t)$.

Используя теорему о среднем и определяя средние значения потенциалов, решая последовательно n-1 краевую задачу с j-м отрезком $a_j b_j$ с заданным потенциалом и нулевым - на остальных отрезках (j = 1, 2,…, n-1), находим параметры многополюсника (n - полюсника) и, затем, в общем случае, матрицу параметров исходной задачи.

Искомая потенциальная функция определяется как $U(x,y) = Re\Phi(z)$. По известной потенциальной функции матрица, например, погонных емкостей [C] задачи (с учетом электрогидродинамических аналогий) вычисляется путем решения n-1 краевой задачи определения емкостей между n – ым электродом (n = 1, 2, … n-1) и замкнутыми остальными следующим образом [8]:

$$C_{k,1} = 2\varepsilon X_{k,1},\ C_{k,n} = 2\varepsilon X_{k,n-1},\ C_{k,p} = 2\varepsilon\left(X_{k,p} - X_{k,p-1}\right),\ X_{K,j} = \det\left\lfloor E_{K,j}\right\rfloor/\det[F], \qquad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды; k = 1, 2, 3,…, n; p = 2, 3,…, n-1; j = 1, 2, 3,…, n.

Элементы матриц $[F]$ и $[E_{k,j}]$:

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & . & . & F_{1,0} \\ F_{2,n-2} & F_{2,n-3} & . & . & F_{2,0} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & . & . & F_{n-1,0} \end{bmatrix} \qquad \left[E_{k,j}\right] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & . & . & F_{1,0} \\ . & . & . & . & . \\ F_{j-1,n-2} & F_{j-1,n-3} & . & . & F_{j-1,0} \\ E_{k,n-2} & E_{k,n-2} & . & . & E_{k,0} \\ F_{j-1,n-3} & F_{j-1,n-3} & . & . & F_{j-1,0} \\ . & . & . & . & . \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & . & . & F_{n-1,0} \end{bmatrix}$$

выражаются следующими гиперэллиптическими интегралами

$$F_{k,m} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{R(t)}},\ E_{k,m} = (-1)^{k-1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{-R(t)}}, \quad (4)$$

$$R(t) = (t-a_1)(t-b_1)(t-a_2)(t-b_2)..(t-a_n)(t-b_n).$$

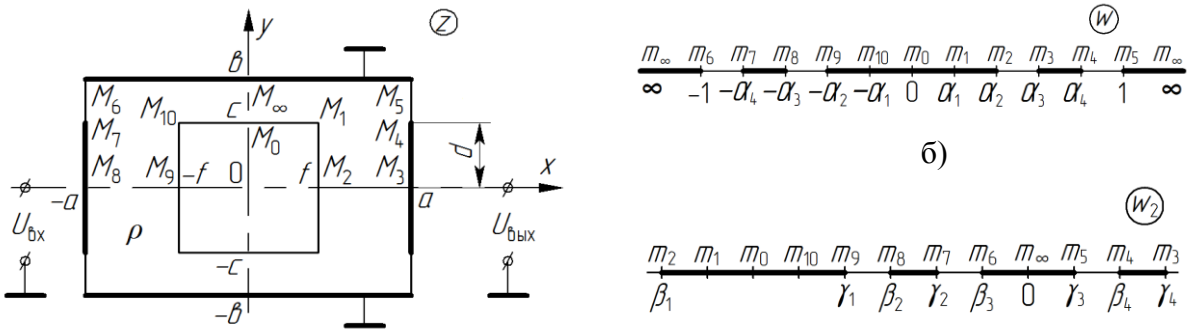
Гиперэллиптические интегралы вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей алгебраической степени точности после приведения интервала интегрирования к стандартному (-1. 1) [9]:

$$\int_{-1}^{1} \frac{g(w)dw}{\sqrt{1-w^2}} \cong \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^{N} g\left(\cos\frac{2n-1}{2N}\pi\right). \quad (5)$$

Методика расчета

Отображаем многоугольник $M_1M_2M_3M_5M_6M_8\ M_9M_{10}$ в плоскости z на верхнюю полуплоскость $Imw \geq 0$ с указанным на рис. 1,б соответствием точек с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [9]:

$$z = A\int_0^w \sqrt{(\alpha_1^2 - w^2)/(\alpha_2^2 - w^2)(\alpha_3^2 - w^2)(1-w^2)}dw. \quad (6)$$



а) б) в)

Рис. 1. Отображение ПЭ с проводящей областью (а) на плоскости w (б) и w_2 (в)

Нижняя относительно оси x часть ПЭ отобразится при этом на нижнюю полуплоскость $Imw \leq 0$. При этом для ПЭ получаем четырехэлектродную конфигурацию на действительной оси в плоскости w.

Константы α_1, α_2, α_3 определяются из системы уравнений

$$f/c = I_1/I_2,\ f/(a-f) = I_1/I_3,\ c/(a-f) = I_2/I_3, \quad (7)$$

$$I_1 = A\int_0^{\alpha_1} \sqrt{(\alpha_1^2 - w^2)/(\alpha_2^2 - w^2)(\alpha_3^2 - w^2)(1-w^2)}dw,$$

$$I_2 = A\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sqrt{(w^2 - \alpha_1^2)/(\alpha_2^2 - w^2)(\alpha_3^2 - w^2)(1-w^2)}dw,$$

$$I_3 = A\int_{\alpha_2}^{\alpha_3}\sqrt{(w^2-\alpha_1^2)/(w^2-\alpha_2^2)(\alpha_3^2-w^2)(1^2-w^2)}dw.$$

Гиперэллиптические интегралы $I_1 - I_3$ вычисляются с использованием квадратурных формул (5).

После определения констант $\alpha_1 - \alpha_3$ величина α_4 находится их уравнения

$$\frac{d}{b} = \frac{\int_{\alpha_3}^{\alpha_4}\sqrt{(w^2-\alpha_1^2)/(w^2-\alpha_2^2)(w^2-\alpha_3^2)(1-w^2)}dw}{\int_{\alpha_3}^{1}\sqrt{(w^2-\alpha_1^2)/(w^2-\alpha_2^2)(\alpha_3^2-w^2)(1-w^2)}dw}.$$

Для упрощения анализа приведем все электроды на рис. 1,б к конечным размерам. Для этого переносим начало координат в плоскости w в точку $\alpha = (\alpha_3 - \alpha_2)/2$. Координаты всех точек m_i изменяются на α. Осуществив преобразование $w_2 = 1/w$ (рис. 1,в), получаем для координат начал β_i и концов γ_i электродов:

$$\beta_1 = 1/(\alpha_2 - \alpha),\ \beta_2 = -1/(\alpha_3 + \alpha),\ \beta_3 = -1/(1 + \alpha),\ \beta_4 = 1/(\alpha_4 - \alpha),$$

$$\gamma_1 = -1/(\alpha_3 + \alpha),\ \gamma_2 = -1/(\alpha_4 + \alpha),\ \gamma_3 = 1/(1 - \alpha),\ \gamma_4 = 1/(\alpha_3 - \alpha).$$

Полученная однородная задача ($f(t) = g(t) = 0$) в плоскости w_2 решается с использованием соотношений (1) – (4).

Для проводимостей между контактами ПЭ получаем [8]:

$$Y_{12} = Y_{21} = 2x_{21}/\rho = Y_{14};\ Y_{13} = Y_{31} = 2x_{31}/\rho;\ Y_{34} = 2x_{33}/\rho = Y_{23};\ Y_{24} = 2x_{23}/\rho;$$

$$X_{kj} = det[E_{kj}] / det[F].$$

Элементы матриц $[F]$ и $[E_{kj}]$

$$[F]=\begin{bmatrix} F_{12} & F_{11} & F_{10} \\ F_{22} & F_{21} & F_{20} \\ F_{32} & F_{31} & F_{30} \end{bmatrix},\ [E_{21}]=\begin{bmatrix} E_{22} & E_{21} & E_{20} \\ F_{22} & F_{21} & F_{20} \\ F_{32} & F_{31} & F_{30} \end{bmatrix},\ [E_{31}]=\begin{bmatrix} E_{32} & E_{31} & E_{30} \\ F_{22} & F_{21} & F_{20} \\ F_{32} & F_{31} & F_{30} \end{bmatrix},$$

$$[E_{33}]=\begin{bmatrix} F_{12} & F_{11} & F_{10} \\ F_{22} & F_{21} & F_{20} \\ E_{32} & E_{31} & E_{30} \end{bmatrix},\ [E_{23}]=\begin{bmatrix} F_{12} & F_{11} & F_{10} \\ F_{22} & F_{21} & F_{20} \\ E_{22} & E_{21} & E_{20} \end{bmatrix}$$

выражаются следующими гиперэллиптическими интегралами:

$$F_{km} = (-1)^k\int_{b_k}^{a_{k+1}}\frac{t^m dt}{\sqrt{R(t)}},\quad E_{km} = (-1)^{k-1}\int_{a_k}^{b_k}\frac{t^m dt}{\sqrt{-R(t)}}, \tag{8}$$

$$R(t) = \prod_{i=1}^{4}(t-\beta_i)(t-\gamma_i).$$

С помощью подстановок $t = x(\gamma_k - \beta_k)/2 + (\gamma_k + \beta_k)/2$ для E_{km} и $t = x(\beta_{k+1} - \gamma_k)/2 + (\beta_{k+1} + \gamma_k)/2$ для F_{km} интегралы в (6) приводятся к стандартному интервалу интегрирования (-1, 1) и вычисляются с использованием формул (5).

Схема замещения рассматриваемого ПЭ представляет собой параллельное соединение П- и Т- четырехполюсников (рис. 2).

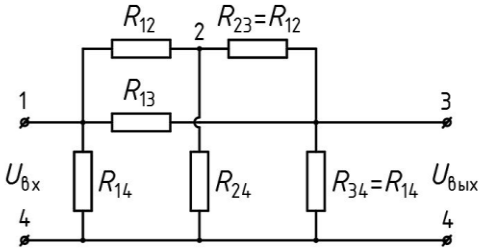
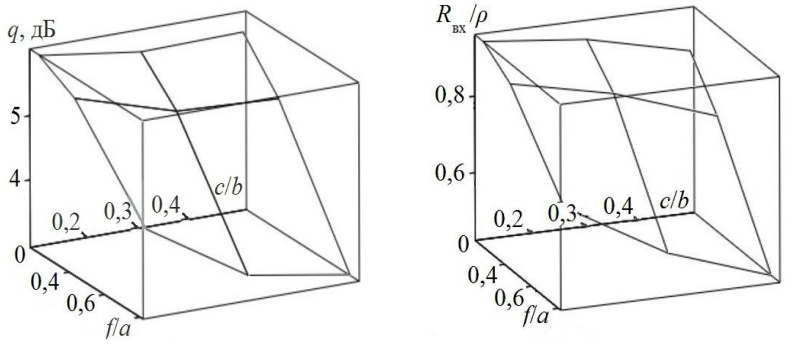


Рис. 2. Схема замещения ПЭ с проводящей центральной областью (контакт 2).

Определив матрицы $[Y_1]$, $[Y_2]$ каждого из них и суммируя, получаем результирующую $[Y]$ - матрицу ПЭ: $[Y] = [Y_1] + [Y_2]$ и по [10] - параметры R_q (горизонтальное плечо) и R_v (вертикальные плечи) соответствующей П- образной схемы замещения. Тогда для входное (выходное) сопротивление R_{BX} и ослабление q согласованного ПЭ получаем [10].

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_v}{\sqrt{1 + 2/(R_q / R_v)}}\ ,\ q = 20\lg\left[1 + R_q / R_v + \sqrt{(R_q / R_v)^2 + 2R_q / R_v}\right]\ \text{дБ}. \qquad (9)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 3 и показывают широкие возможности управления ослаблением.



а) б)

Рис. 3. Зависимость ослабления (а) и нормированного входного сопротивления ПЭ с центральной проводящей областью при b/a = 5 и d/b = 0,5.

Моделирование ПЭ

Работоспособность предложенной методики проверена моделированием рассмотренных топологий ПЭ в программном комплексе *Elcut* 5.1 [11].

Для определения выходных параметров ПЭ к электродам прикладывались потенциалы $U_{вх} = U_{M7M8} = 1$ В, $U_{M5M6} = 0$ В и определялся потенциал контакта M_3M_4 : $U_{вых} = U_{M3M4}$. Отношение $U_{вх}/U_{вых}$ связано с отношением сопротивлений П-образной схемы замещения ПЭ следующим образом: $U_{вх}/U_{вых}$ -1 = R_q/R_v . Ослабление q определялось тогда по (9). Для определения R_{BX} требовалось найти R_v (в модели для простоты удельное сопротивление резистивной пленки ρ принималось равным 1 Ом/кв.)

В режиме симметричного возбуждения (U_{M7M8} = U_{M3M4} = 1 В, U_{M5M6} = 0 В) ток через линию симметрии x = 0 не протекает, величина тока, вытекающего из контакта M_7M_8 численно равна $1/R_v$. В режиме антисимметричного возбуждения (U_{M7M8} = - U_{M3M4} = 1 В, U_{M5M6} = 0 В) на линии x = 0 U = 0 В и величина тока из контакта M_7M_8 численно равна $1/R_v + 1/(R_q/2)$. Таким образом, из режимов симметричного и антисимметричного возбуждения находятся параметры П – образной схемы замещения R_q, R_v любого из рассматриваемых ПЭ.

Параметры ПЭ с центральной проводящей областью как многополюсника определялись из соотношений:

$$Y_{143} = Y_{12} + Y_{23} + Y_{24},\ Y_{432} = 2Y1_2 + Y_{13},\ Y_{214} = 2Y_{23} + Y_{13},\ Y_{13,24} = Y_{23} + 2Y_{12}, \qquad (10)$$

где Y_{432}, Y_{214}, Y_{143}, $Y_{13,24}$ – проводимости между контактом 1 и замкнутыми контактами 4, 3, 2; между контактом 3 и замкнутыми контактами 2, 1, 4; между контактом 2 и замкнутыми контактами 1, 4, 3; между замкнутыми контактами 1, 3 и 2, 4 соответственно.

Из системы (10) получаем:

$$Y_{12} = (Y_{432} - Y_{13,24} + Y_{214})/4, \quad Y_{13} = (Y_{432} - Y_{13,24} + Y_{214})/2,$$

$$Y_{23} = (Y_{432} - Y_{13,24} + Y_{214})/4, \quad Y_{24} = Y_{143} - Y_{13,24}\ /4.$$

Работоспособность методики подтверждена и исследованиями реальных образцов малогабаритных навесных ПЭ микрополосковых аттенюаторов.

Заключение

Предложены топологии ПЭ на основе однородной резистивной пленки, обеспечивающие при малых габаритах реализацию широкого диапазона ослаблений. Разработана методика расчета ПЭ, работоспособность которой проверена моделированием в программном комплексе *Elcut* 5.1, а также анализом реальных образцов малогабаритных навесных поглощающих элементов микрополосковых аттенюаторов. Отмечены широкие возможности управления выходными параметрами ПЭ.

Библиографический список

1. Львов А.Е., Рудоясова Л.Г., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Тонкопленочные полосковые аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014, № 5, с. 40 – 46.
2. Садков В.Д., Горячев Ю.А. Расчет тонкопленочной аттенюаторной пластины // Техника средств связи, сер. Радиоизмерительная техника, 1977, вып. 2(8), с. 13-19.
3. Садков В.Д., Подмогаев В.Е., Моругин С.Л., Ширяев Д.Д. Анализ и синтез поглощающих элементов с резистивной пленкой сложной геометрической формы // Труды Радиотехнического института АН СССР. – М.: 1982, № 46, с. 48 – 60.
4. Бажилов В.А., Михалицын Е.А. Проектирование малогабаритных аттенюаторов с малым уровнем ослабления // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2014, т. 17, № 1, с. 54 – 63.
5. Садков В.Д., Фомина К.С. Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона ослаблений // Нано- и микросистемная техника, 2017, т. 19, № 4, с. 238-243.
6. Седаков А.Ю. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления/ А.Ю. Седаков, В.К. Смолин. - М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
7. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Гл. ред. физ. – мат. лит., 1973. – 749 с.
8. Ямпурин Н.П., Широков Л.В., Садков В.Д., Потехин В.А Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. - Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.
9. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.

10. Татур Г.А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие): Учебное пособие. - М.: Высшая школа, 1980. – 271 с.
11. Сайт компании ООО «Тор»: www.tor.ru

K. S. Fomina, A. V. Pilkevich, V. D. Sadkov

CALCULATION AND SIMULATION OF FILM ABSORBING ELEMENTS

Nizhny Novgorod state technical University n.a.R.E. Alekseeva

The proposed topology of compact absorbing elements of the waveguide, coaxial and microstrip attenuators for the implementation of small impairments, different from the known (two-layer resistive film, low temperature stability and complicated fabrication technique) using a single layer of resistive film with the Central region, with small (conductor) resistivity. The developed method of calculation and the simulation of the proposed absorbing elements in the national software system Elcut.

Keywords: attenuators absorbing elements; a uniform resistive film; small attenuation.

УДК 621.372.832

С. А. Шабалин

АВТОМОБИЛЬНЫЙ РАДАР НА ОСНОВЕ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания и моделирования фазированной антенной решетки для автомобильного радара с рабочей частотой 24 ГГц. Отмечены главные преимущества таких систем и целесообразность их использования. Предложены способы построения антенной решетки для автомобильного радара и рассчитаны ее основные характеристики. Показаны результаты моделирования проектируемых структур и произведен их анализ.

Ключевые слова: автомобильный радар, микрополосковая линия передачи, patch антенна, параметризация, согласование излучающих элементов.

Одним из важнейших вопросов в настоящее время является вопрос повышения безопасности дорожного движения. Для уменьшения количества дорожно-транспортных происшествий необходимо создавать устройства, которые не только могут сообщить водителю об опасной ситуации, но и самостоятельно проанализировать текущую ситуацию и принять меры по ее возможному предотвращению. В качестве таких устройств могут применяться, например, лидары, системы с видеокамерами, автомобильный радары. Однако, именно последние являются наиболее перспективными в данном направлении так как обладают существенным преимуществом перед другими системами, а именно высокой устойчивостью своих основных характеристик при плохих погодных условиях. Представленная статья посвящена рассмотрению фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона для автомобильных радаров.

Решетка состоит из 128 элементарных излучателей, расположенных эквидистантно через половину длины волны, и содержит 8 азимутальных каналов с цифровым диаграммообразованием. Для обеспечения приемлимой точности измерений необходимо иметь ширину основного лепестка диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости – 4º, а в угломестной – 12º.

В качестве способа измерения угловых координат цели выбран моноимпульсный метод. В таком методе для определения направления на источник излученияиспользуются несколько приемных каналов, формирующих ДН с известной шириной и направлением главного лепестка. Главным достоинством такого метода является возможность измерения угловых координат по одному периоду зондирования.

Для решения поставленных задач, решетка строится из отрезков несимметричных микрополосковых линий передачи. Выбор такой структуры для построения решетки обусловлен тем, что такие линии передачи просты в изготовлении, работают в широком диапазоне частот и обладают сравнительно малыми потерями.

Расчет волновых сопротивлений линий выполнен двумя способами. Были рассмотрены две структуры построения фазированной антенной решетки.

В первом случае мощность распределяется равномерно между элементарными излучателями, во втором – с использованием амплитудных коэффициентов распределения Чебышева. При равномерном распределении рассматривалась вся мощность, подводимая к полоске излучателей, и учитывалось, что к каждому элементу подрешетки подводится равномерно распределенная часть мощности. Во втором способе использовались коэффициенты распределения Чебышева, которые обеспечивают неравномерное амплитудное распределение поля, при этом расчетный уровень боковых лепестков ДН относительно главного составляет -20 дБ.

Элементарный излучатель решетки представляет собой проводящую поверхность, расположенную поверх диэлектрической подложки, то есть, так называемую «patch-антенну».

Конечная структура излучателя имеет некоторые особенности. Дело в том, что электромагнитное поле на излучателе распределено неравномерно. Желательно, чтобы импеданс в месте подключения у каждого излучателя был равен 50 Ом. К конструкции, описанной выше, необходимо подсоединить очень узкий полосок, ввиду большого сопротивления излучателя в данной точке, после этого потребуется четвертьволновый преобразователь, чтобы выполнить поставленную задачу.

Такое построение излучающего элемента требует высокой точности изготовления микрополосок сверхмалой ширины. Поэтому был выбран другой вид антенны. В данном случае в излучателе выполнены симметричные углубления таким образом, чтобы обеспечить подключение питающей линии непосредственно к площадке. Структура выбранного элементарного излучателя решетки изображена на рисунке 1.

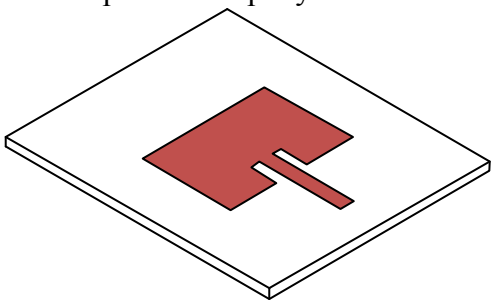


Рис. 1 Структура «patch-излучателя»

Для контроля степени согласования элементов и приемлемости получаемых результатов использован параметр S_{11} - элемент матрицы рассеяния многополюсника и в данном случае он описывает коэффициент отражения по входу. Для достижения поставленных целей разработки необходимо выполнить условие: $S_{11} \leq$ -30 дБ, то есть требуется добиться малых отражений от излучателя.

Для построения излучающего элемента использовалась система автоматизированного проектирования (САПР) «Advanced Design System». В САПР была создана специальная область – полигон. Анализ результатов моделирования такой структуры показал, что минимум характеристики S_{11} находится вне рабочего частотного диапазона автомобильного радара, который представляет собой область от 24 ГГц до 24,25 ГГц. Для решения этой задачи производится параметризация всех размеров излучателя. Далее создается электромагнитная модель рассмотренной площадки и осуществляется перебор с заданным шагом параметров, соответствующих размерам элемента. На основе получаемых при этом семействе характеристик S_{11} производится выбор оптимальных размеров излучателя, которые дают результаты моделирования, полностью удовлетворяющие поставленным требованиям.

Для согласования излучающих элементов при равномерном распределении мощности использовались L-C-L – структуры. Отметим, что в микрополосковых линиях передачи индуктивность представляет собой участок с волновым сопротивлением ρ, которое значительно больше волнового сопротивления линии ρ_0, то есть $\rho \gg \rho_0$. Отсюда следует, что в месте расположения узкого отрезка концентрируется ток, соответственно запасается энергия магнитного поля, то есть данный отрезок эквивалентен индуктивности.

В случае емкости ситуация обратная, а именно короткий отрезок длинной линии с малым волновым сопротивлением соответствует параллельной емкости. Физически это объясняется тем, что в месте расположения широкого участка концентрируется энергия электрического поля.

Таким образом, структура представляет собой комбинацию последовательно соединенных узких и широких микрополосков и 50-омной линии передачи. Последний элемент

необходим для обеспечения эквидистантного расположения площадок и, как следствие, синфазного излучения.

Для определения размеров всех элементов рассмотренной структуры использовался тот же самый способ, что и при построении модели элементарного излучателя. Однако, стоит отметить некоторые отличия их построения и подбора оптимальных параметров. По результатам расчетов волновых сопротивлений были получены значения импедансов в различных точках полоски излучателей, поэтому для обеспечения нужного распределения мощности и согласования площадок, L-C-L – структуры осуществляют также трансформацию сопротивлений.

В результате таким способом получена полоска элементарных излучателей, результаты моделирования которой полностью соответствуют требованиям и поставленным задачам. Описанная структура изображена на рисунке 2.

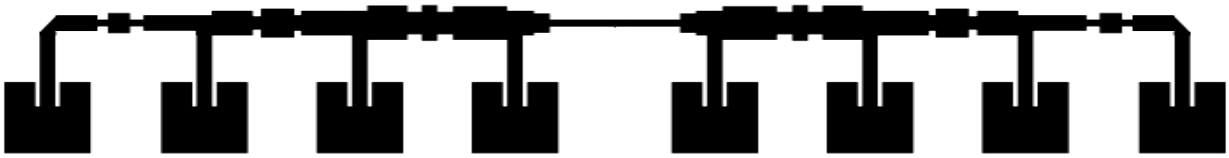


Рис. 2 Структура полоски излучателей при равномерном распределении мощности

ДН такой полоски излучателей в угломестной и азимутальной плоскостях изображена на рисунке 3 и 4 соответственно.

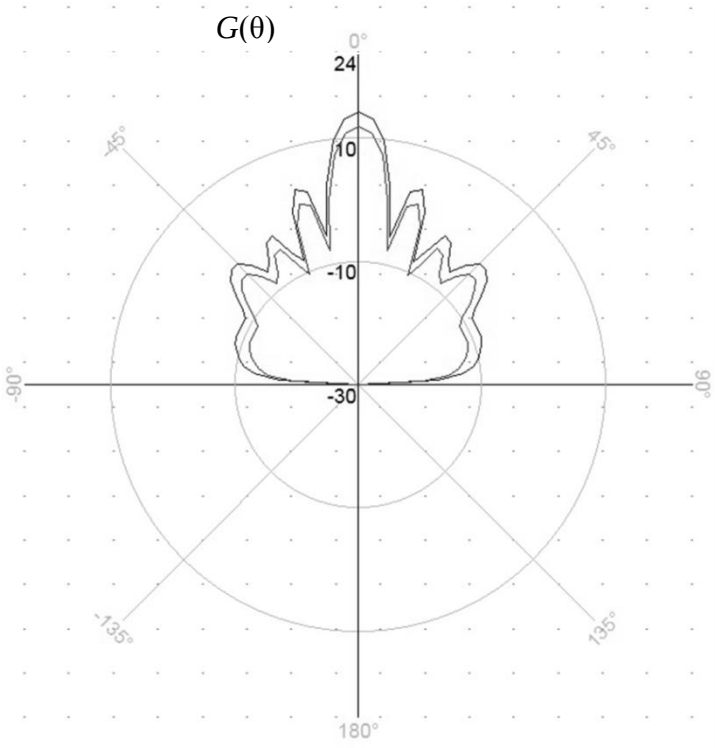


Рис. 3 ДН полоски излучателей в угломестной плоскости

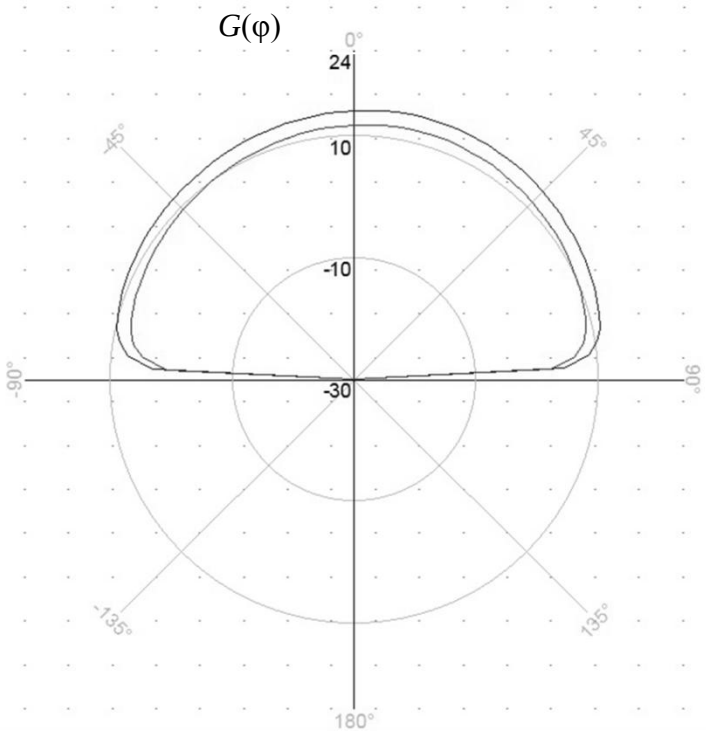


Рис. 4 ДН полоски излучателей в азимутальной плоскости

Для оценки полученных результатов на данных характеристиках были использованы метки. В угломестной плоскости на первом из представленных графиков метка m_1 показывает усиление в дБи в направлении на цель по сравнению с изотропным излучателем, а метка m_2 уровень боковых лепестков также в дБи. При этом видно, что уровень боковых лепестков по отношению к главному около -11 дБи. Этот результат ожидаем, ввиду того, что при расчете волновых сопротивлений линий мощность равномерно распределялась между излучателями.

На второй характеристике изображена излучаемая мощность в направлении на цель. Здесь метки m_3 и m_4 служат для оценки ширины основного лепестка ДН, и по результатам измерений данная ширина имеет значение около 12º. Полученный результат полностью соответствует поставленным требованиям и может считаться достоверным.

Как видно из рисунка 4, в азимутальной плоскости сформирована диаграмма с очень широким основным лепестком. Заметим, что это лишь одна полоска излучателей из 16, а, как известно, при увеличении апертуры антенны луч ДН сужается и при построении всей структуры его ширина достигнет требуемого значения.

При расчете волновых сопротивлений линий с использованием распределения Чебышева мощность ответвляется в элементарные излучатели слева направо в следующих соотношениях: 0.0965, 0.0785, 0.05, 0.025. Из приведенных значений видно, что наибольшую мощность излучения имеют центральные излучатели, а крайние наоборот наименьшую.

Для согласования элементарных излучателей в данном случае применяется другой способ. Здесь согласование обеспечивается отрезками микрополосковых линий разной ширины, но одинаковой суммарной длины.

Сначала рассматривается крайний излучатель полоски с коротким отрезком микрополосковой линии. На краю такого участка определятся импеданс, и с помощью диаграммы Смита подбирается ширина и длина согласующего полоска. Аналогичным образом происходит согласование всех излучателей полоски, при этом основными контролируемыми параметрами являются расстояние между элементами решетки и значения сопротивлений на краях ответвителей, которые были получены из амплитудных коэффициентов. Таким образом,

обеспечивается синфазное излучение всех площадок и заданное распределение мощности между ними.

В итоге построена полоска излучателей, изображенная на рисунке 5.

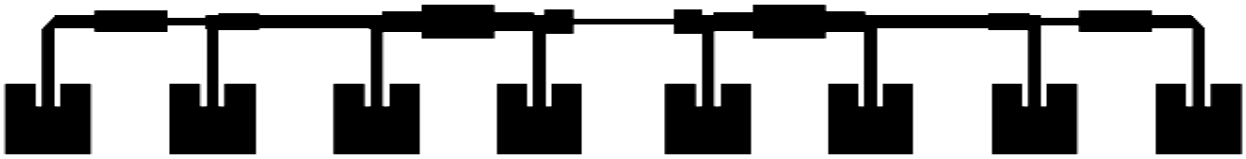


Рис. 5 Структура полоски излучателей

Анализ ДН структуры, изображенной на рисунке 5, показывает, что уровень боковых лепестков имеет значение -20 дБ относительно главного, а ширина основного лепестка в угломестной плоскости составила 12º, что удовлетворяет всем поставленным задачам.

В соответствии с теоремой перемножения диаграмм направленности для системы одинаковых излучателей [6] ДН ФАР можно представить в следующем виде:

$$f(\alpha) = F_{ЭЛ}(\alpha) f_{МН}(\alpha), \quad (1)$$

где $F_{ЭЛ}(\alpha)$ – ДН одной полоски излучателей, $f_{МН}(\alpha)$ – комплексный множитель направленности системы изотропных излучателей, расположенных в точках размещения центров элементов антенны (множитель решетки).

Разность фаз сигнала между соседними элементами решетки определяется из выражения вида:

$$\Delta\varphi = 2\pi(d/\lambda)\sin(\alpha) \quad (2)$$

где d – расстояние между элементарными излучателями, λ – длина волны, α – угол между направлением падающей волны и нормалью к поверхности.

В формуле 2 расстояние между элементами решетки считается одинаковым и равно $d = \lambda/2$. Для определения множителя решетки необходимо задать начальное значение фазы на одном из излучателей. Например, пусть фаза крайней полоски $\varphi 1 = 0$. Тогда очень просто найти значения фаз всех остальных элементов по формуле:

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \Delta\varphi \quad (3)$$

Далее выполняется суммирование всех полученных в результате расчета комплексных величин и берется модуль от этой суммы для вычисления амплитуды. Так как ДН одной полоски излучателей каждой из рассмотренных структур известна, то, задавшись наборов углов α и используя формулу (1), находятся ДН всей ФАР. Анализ полученных таким образом диаграмм показал, что ширина основного лепестка структуры с равномерным распределением мощности составила 4º, а при использовании амплитудных коэффициентов этот параметр принял значение 6º, что полностью удовлетворяет поставленным задачам. Дальность действия такого радара составила 150 м. ДН всей ФАР изображена на рисунке 6.

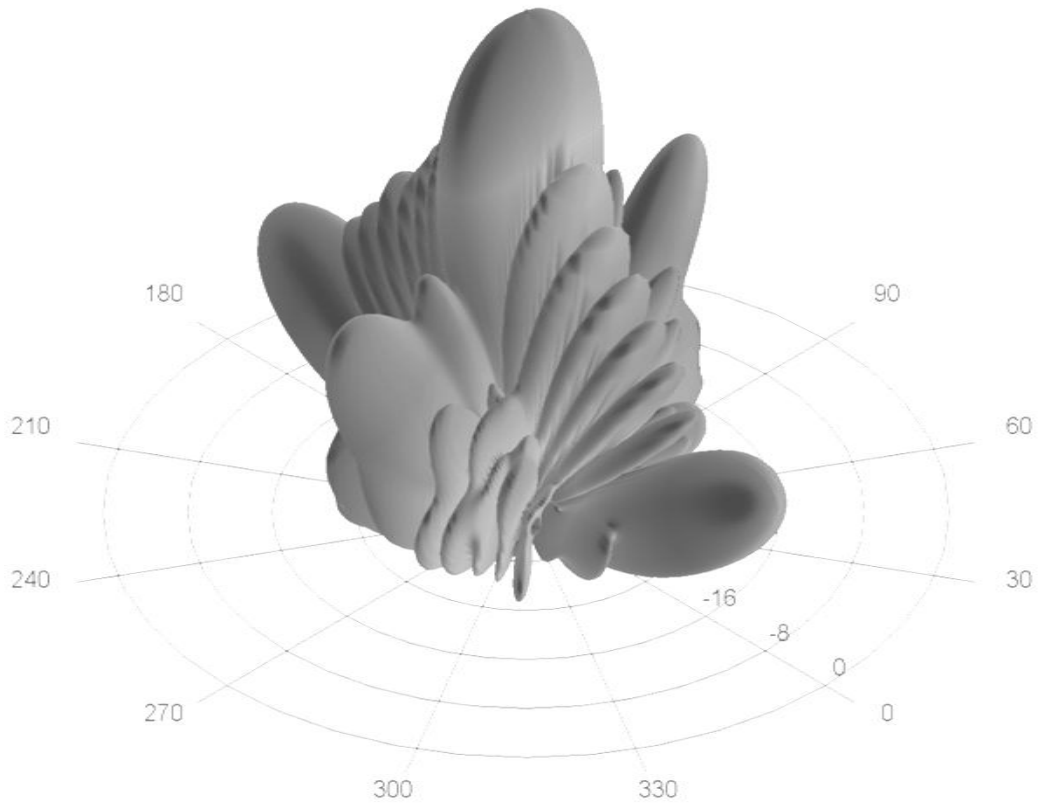


Рис. 6 ДН ФАР для автомобильного радара

Таким образом, полученные структуры ФАР, каждая из которых обладает своими достоинствами и недостатками, могут быть эффективно использованы в различных условиях.

Стоит отметить, что моделирование рассмотренных ранее систем производилось методом моментов. Данный метод очень удобен при построении таких сложных конструкций, однако не была учтена граница моделируемой области и объемность структуры. Для рассмотрения трехмерных систем возможно применение метода конечных элементов [2]. Такой метод требует большого количества моделируемых точек и очень мелкий шаг сетки. Ввиду того, что общая структура ФАР имеет многослойный характер, при решении вопросов моделирования данным методом требуется большое количество вычислительного ресурса и его не всегда удается быстро и корректно реализовать. Однако, при достаточном шаге сетки и количестве точек результаты моделирования должны с высокой точностью совпасть с ранее полученными методом моментов.

Выводы

В данной статье представлены все этапы построения и моделирования полоски излучателей ФАР для автомобильного радара. Такие системы обладают высокой устойчивостью характеристик в различных погодных условиях, что делает направление их развития наиболее важным и перспективным в решении задач по обеспечению безопасности на дорогах. В целом структура такого радара включает в себя, помимо рассмотренной ФАР, высокочастотные приемо-передатчики и систему цифровой обработки информации. Система цифровой обработки служит для анализа полученных решеткой данных, по результатам которого осуществляется взаимодействие с органами управления автомобиля или действие, направленное на предупреждение и информирование водителя. Стоит также отметить, что подобные системы безопасности постепенно переходят от защитных мер к прогностическим, то есть основное направление развитие автомобильных радаров связано с получением

дополнительного времени для реагирования и автоматической активации соответствующих мер защиты. Для достижения этих целей применимо сочетание радарных систем с другими датчиками систем помощи водителю, например, с видеокамерами.

При успешном создании и тестировании автомобильных радаров появится возможность существенно снизить количество дорожно-транспортных происшествий и сделать поездку на автомобиле более безопасной.

Библиографический список

1. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975. - 528 с.
2. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. Москва, 2008. - 276 с.
3. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: Учебное пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1986. - 280 с.
4. Constantine A. Balanis, Antenna theory: Analysis and design. 4th Edition.- John Wiley & Sons, Inc., 2016. - 1096 p.

Shabalin S. A.

AUTORADAR BASED ON A PHASED ARRAY ANTENNA MILLIMETER RANGE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The article presents creation and modeling of a phased array antenna for autoradar with an operating frequency of 24 GHz. Examined the main advantages of such systems and the expediency of their use. Methods for constructing an antenna array for an autoradar are proposed and calculated its main characteristics. Showing results of the modeling of the structures being projected and their analysis.

Key words: automotive radar, microstrip transmission line, patch antenna, parametrization, matching of radiating elements.

УДК 621.396.677

О.А. Шмонин

УГЛОВОЕ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ В АНТЕННОЙ РЕШЁТКЕ ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНОГО МНОГОЧЛЕНА НА СЛУЧАЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОКРАШЕННОГО ШУМА

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассмотрена проблема определения числа и угловогоположения близкорасположенных источников радиоизлученияна фоне пространственно-окрашенного шума (помех) с помощью антенной решётки. Предложено обобщение сверхразрешающегокорневого метода минимального многочлена для произвольного вида шумовой корреляционной матрицы.Произведено сравнение эффективности оригинального и обобщённого методов минимального многочлена при обнаружении и оценке угловых координат точечных источников на фоне помех с гауссовым угловым спектром мощности.

Ключевые слова: антенная решётка, сверхразрешение, определение числа источников, пеленгация, помехи.

Введение

Методы оценки параметров источников радиоизлучения (ИРИ) с помощью антенных решёток (АР) находят широкое применение в различных областях науки и техники: радиосвязи, радиолокации, гидроакустике. Для различения двух источников, разнесённых между собой на угловую величину меньшую ширины главного лепестка ДН, применяют сверхразрешающие методы, к числу которых относится корневой метод минимального многочлена [1,3]. Оценка числа ИРИ производится посредством определения степени минимального многочлена корреляционной матрицы принятого сигнала. Для оценки данной степени предложен статистически обоснованный среднеквадратический критерий [2].

Корневой метод минимального многочлена позволяет эффективно оценивать число и угловое положение близкорасположенных ИРИ на фоне собственных шумов АР. При этом шумы в элементах АР должны быть статистически независимы между собой и иметь одинаковую мощность. На практике заданная модель не всегда выполняется. Кроме собственных шумов АР на обработку поступают внешние шумы/помехи, обладающие пространственной корреляцией. Помимо этого может не выполняться условие равенства мощностей собственных шумов элементов АР. Несоответствие реального сигнала принятой модели приводит к ухудшению эффективности сверхразрешающего метода и необходимости эмпирического выбора порога для реализации пороговой техники метода минимального многочлена. В настоящей работе предлагается сверхразрешающий корневой обобщённый метод минимального многочлена, позволяющий учесть свойства собственных шумов и внешних помех.

Обобщённый метод минимального многочлена

Рассмотрим линейную эквидистантную АР, состоящую из Nэлементов. В свободном пространстве в зоне Фраунгофера АР расположим Jузкополосных точечных ИРИ. Комплексные амплитуды принятого АР сигнала представим в виде вектора

$$\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \boldsymbol{\eta} \qquad (1)$$

где $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \ldots, a_J]^T$– вектор случайных комплексных амплитудИРИ, $\boldsymbol{\eta}$–вектор собственных шумов АР и внешних помех, $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \ldots, \mathbf{s}_J]$–матрица фазирующих векторов ИРИ $\mathbf{s} = \left[1 \quad e^{iu} \quad \ldots \quad e^{i(N-1)u}\right]^T$, $u = 2\pi d_\lambda \sin\varphi$, d_λ – период антенной решётки, выраженный в единицах длины волны; φ–угловое положение ИРИ.

Корреляционная матрица принятого сигнала можно записать в виде суммы сигнальной и шумовой корреляционных матриц.

$$\mathbf{M} = < \mathbf{x}\mathbf{x}^H > = \mathbf{S} < \mathbf{a}\mathbf{a}^H > \mathbf{S}^H + < \boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^H > = \mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{S}^H + \mathbf{T} \quad (2)$$

Представим корреляционную матрицу шума в виде произведения двух треугольных матриц, полученных посредством разложения Холецкого $\mathbf{T} = \mathbf{D}\mathbf{D}^{\mathrm{H}}$[4]. Применим к принятому сигналу обеляющее преобразование $\mathbf{y} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{x}$, после которого корреляционная матрица сигнала принимает вид.

$$\mathbf{R} = < \mathbf{y}\mathbf{y}^H > = \left(\mathbf{D}^{-1}\right)\mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{S}^H\left(\mathbf{D}^{-1}\right)^H + \left(\mathbf{D}^{-1}\right)\mathbf{T}\left(\mathbf{D}^{-1}\right)^H = \left(\mathbf{D}^{-1}\right)\mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{S}^H\left(\mathbf{D}^{-1}\right)^H + \mathbf{E} \quad (3)$$

К полученной обелённой корреляционной матрице применим метод минимального многочлена. Так как на практике точная корреляционная матрица полного сигнала и шума не известны, то используется их максимально-правдоподобная оценка.

$$\widehat{\mathbf{M}} = \frac{1}{L_M}\sum_{k=1}^{L_M}\mathbf{x}_k\mathbf{x}_k^H \qquad \widehat{\mathbf{T}} = \frac{1}{L_T}\sum_{p=1}^{L_T}\boldsymbol{\eta}_p\boldsymbol{\eta}_p^H \quad (4)$$

где $\mathbf{x}_k$ – k-ая выборка полного сигнала, а $\boldsymbol{\eta}_p$ – p-ая выборка шума/помехи, L–число выборок.

Оценим степень минимального многочлена mпутем последовательного перебораеё значения от 1 до Nдо тех пор, пока значение метрики (5) не опустится ниже некоторого порогаTh, который при точно известной корреляционной матрице шума **T**можно выбрать в виде (6). При этом оценка числа ИРИ $\widehat{J} = m - 1$.

$$I_m = Sp\prod_{k=1}^{m}\left(\mathbf{E} - \gamma_k\widehat{\mathbf{R}}\right)^2 \quad (5)$$

$$Th = < I_1 > = \frac{N^2 - 1}{N + L_M} \quad (6)$$

где $<I_1>$ - среднее значение первой метрики при наличии только собственного шума [2].

Для определения параметров γ в выражении (5) следует итерационным путём решить систему нелинейных уравнений.

$$\gamma_q = Sp\left(\mathbf{M}\prod_{\substack{k=1\\k\neq q}}^{m}\left(\mathbf{E} - \gamma_k\widehat{\mathbf{R}}\right)\right)Sp\left(\mathbf{M}^2\prod_{\substack{k=1\\k\neq q}}^{m}\left(\mathbf{E} - \gamma_k\widehat{\mathbf{R}}\right)\right)^{-1} \quad (7)$$

Для оценки углового положения ИРИ построим оценку проектора на шумовое подпространство, в котором положим$\gamma_1 < \gamma_2 < \ldots < \gamma_m$.

$$\widehat{\mathbf{P}}_n = \mathbf{D}\frac{\prod_{k=1}^{m-1}\left(\mathbf{E} - \gamma_k\widehat{\mathbf{R}}\right)}{\prod_{k=1}^{m-1}\left(1 - \frac{\gamma_k}{\gamma_m}\right)}\mathbf{D}^{-1} \quad (8)$$

Обозначим $z = \exp[iu]$, $\mathbf{A} = \widehat{\mathbf{P}}_n^H\widehat{\mathbf{P}}_n$ и рассмотрим полином:

$$f(z) = \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} p_m z^m; \quad p_m = \sum_{k=1}^{N-m}\mathbf{A}_{k,k+m}; \quad p_{-m} = p_m^*; \quad m \geq 0 \quad (9)$$

Полином (9) имеет $(2N–2)$ корней, для которых выполнено равенство$f(z) = f(1/z^*) = 0$. Для оценки углового положения ИРИ из корней, лежащих внутри либо вне единичной окружности $|z| = 1$,следует выбрать $\widehat{J}$ корней лежащих наиболее близко к ней и произвести обратную замену.

Результаты моделирования

Моделирование проводилось для линейной эквидистантной решётки с числом элементов N = 10 и периодом d = 0.5λ. Ширина главного лепестка диаграммы направленности такой АР равна 10°.Два помеховых источника с гауссовой формой распределения угловой плотности мощности и эффективной шириной 20°и 10° располагались на угловых координатах -30° и 30°соответственно. Оба источника помехи имели мощность 10 дБ. Мощность собственного шума во всех элементах полагалась равной 0 дБ. При этом первая строка корреляционной матрицы шума/помехи для заданной модели имеет вид, представленный на рис. 1.

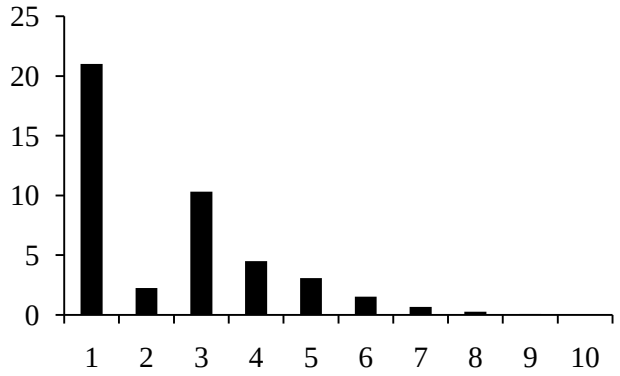


Рис. 1. Абсолютные значения элементов первой строки корреляционной матрицы шума

Для каждого значения мощности полезного ИРИ проводилось 1000 машинных экспериментов. В каждом эксперименте для оценки полной корреляционной матрицы **M**генерировалось L_M = 20 выборок входного процесса, а корреляционная матрица шума**T** считалась точно известной [5]. Результаты моделирования для случая одного полезного ИРИ, расположенного по направлению нормали к АР, представлены на рис. 2 и в табл. 1.Для случая, когда в окрестности нулевого направления располагаются два близких ИРИ, разнесённые на 0.8 ширины главного лепестка ДН (8°), результаты представлены на рис. 3 и в табл. 2.

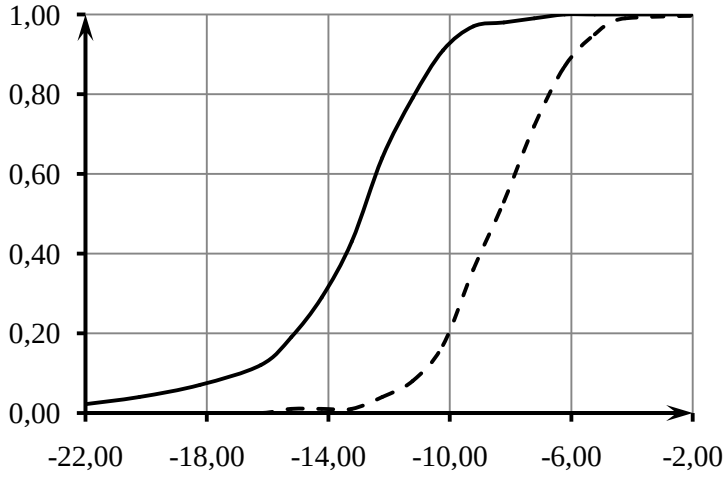


Рис.2 Вероятность правильного определения числа ИРИ (случай одного источника)

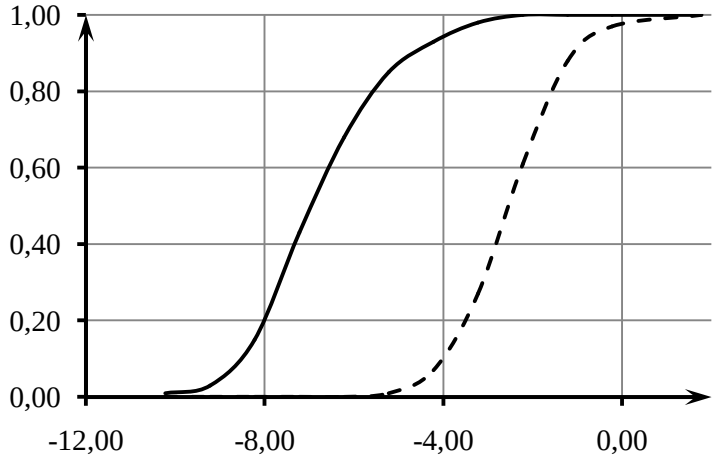


Рис.3 Вероятность правильного определения числа ИРИ (случай двух источников)

По горизонтальной оси на рис. 2 и рис. 3 отложена мощность ИРИν, нормированная относительной полной мощности шума/помехи и выраженная в дБ. По вертикальной оси отложена вероятность правильного определения числа ИРИ в секторе от -10° до 10°. Сплошной линией построены результаты для обобщённого, а пунктирной для базового метода минимального многочлена. В табл. 1 и табл. 2 среднее значение оценки углового положения ИРИ обозначены <θ>, а их среднеквадратичное отклонение σ.

Из результатов моделирования видно, что обобщённый метод минимального многочлена обеспечивает энергетический выигрыш 4,4 дБпри обнаружении одного ИРИи 4 дБ при обнаружении двух ИРИпо уровню вероятности p = 0.8. При этом в области, когда оба метода (базовый и обобщённый) обеспечивают требуемую вероятность правильного определения числа ИРИ p> 0.8,точность оценки их углового положения практически совпадают.

Таблица 1

Среднее значение и СКО оценки угловой координаты ИРИ (случай одного источника)

ν, дБ	**Корневой метод минимального многочлена**		**Корневой обобщённый метод минимального многочлена**	
	<θ1>	**σ1**	**<θ1>**	**σ1**
-11,22	-	-	-0,83	1,33
-10,22	-	-	-0,66	1,11
-9,22	-	-	-0,52	0,94
-8,22	-	-	-0,41	0,81
-7,22	-	-	-0,30	0,68
-6,22	-0,16	0,52	-0,24	0,55
-5,22	-0,12	0,44	-0,18	0,46
-4,22	-0,09	0,41	-0,12	0,42
1,78	-0,02	0,19	-0,02	0,20

Таблица 2

Среднее значение и СКО оценки угловой координаты ИРИ (случай двух источников)

ν, дБ	Корневой метод минимального многочлена			Корневой обобщённый метод минимального многочлена		
	<θ1>	<θ2>	σ	<θ1>	<θ2>	σ
-5,22	-	-	-	-4,60	4,06	1,16
-4,22	-	-	-	-4,47	4,08	1,08
-3,22	-	-	-	-4,39	4,03	0,90
-2,22	-	-	-	-4,28	4,02	0,82
-1,22	-4,20	3,90	0,64	-4,27	4,07	0,65
-0,22	-4,18	3,93	0,59	-4,24	4,08	0,59
1,78	-4,15	3,99	0,44	-4,17	4,07	0,43
6,78	-4,08	4,03	0,25	-4,08	4,05	0,24

Выводы

Предложенное обобщение метода минимального многочлена позволяет эффективно обнаруживать и определять угловое положение ИРИ на фоне пространственно-распределённых помех. Применение обобщённого метода минимального многочлена в условиях наличия распределенных внешних помех позволяет с более высокой вероятностью обнаружить полезный источник радиоизлучения по сравнению с базовым подходом. Точности оценки углового положения источника радиоизлучения для обобщённого и базовогометодовминимального многочлена практически совпадают.

Библиографический список

1. Ермолаев В.Т., Флаксман А.Г., Елохин А.В., Шмонин О.А. Оценка параметров источников сигнала методом минимального многочлена с поиском корней псевдоспектральной функции// Труды XXI Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2017. С.365
2. Ермолаев В.Т. Оценивание параметров минимального многочлена сигнальной корреляционной матрицы многоканальной адаптивной приемной системы// Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38. № 8. С. 841.
3. Ермолаев В.Т., Флаксман А.Г., Анурин А.А.Оценивание параметров сигналов, принимаемых антенной решеткой// Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т.39, № 9. С. 1144.
4. Фролов А.В., Воеводин В.В., Коньшин И.Н., Теплов А.М. Исследование структурных свойств алгоритма разложения Холецкого: от давно известных фактов до новых выводов // Вестник УГАТУ. 2015. №4 (70). С.149-162
5. Ермолаев В.Т., Флаксман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи. Монография. – Нижний Новгород: ННГУ, 2011. – 368 с.

O.A. Shmonin

ANGULAR SUPER-RESOLUTION OF RADIATION SOURCES BY ANTENNA ARRAY GENERALIZATION OF MINIMAL POLYNOMIAL METHOD FOR THE CASE OF SPATIALLY COLORED NOISE

Lobachevsky StateUniversity of Nizhni Novgorod (UNN)

The article deals with the problem of determining the number and angular position of nearby radiation sources in condition of spatially colored noise. The generalization of minimal polynomial method for any kind of noise correlation matrix is proposed.Reliability of source quantity and angle estimation for both base and generalized minimal polynomial method was compared in the event of background noise with Gaussian angle power distribution.

Key words: antenna array, super-resolution, source quantity estimation,direction finding, external noise.

УДК 004.932

П.Е. Овчинников, В.Р. Фидельман, Р.А. Шаталин

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕХАРАКТЕРНОГО ПОВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ И ГИСТОГРАММ НАПРАВЛЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА ВДОЛЬ ПЛОТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

За последние годы множество алгоритмов для обнаружения конкретных нештатных ситуаций было предложено и реализовано на основе строгих правил. Их применение ограничено особыми требованиями к сцене или типам обнаруживаемых аномалий. Для устранения этих недостатков было предложено несколько статистических подходов к задаче видеонаблюдения. Одним из них является обнаружение нехарактерного поведения как отклонения от модели, сформированной на основе примеров нормального поведения.

Предложен алгоритм обнаружения нехарактерного поведения в задачах видеонаблюдения на основе гистограмм направленного оптического потока вдоль плотных траекторий движения и главных компонент. Результаты тестирования при разном количестве обучающих примеров свидетельствуют о снижении уровня ошибок в сравнении с ранее предложенным алгоритмом на основе траекторий движения ключевых точек.

Ключевые слова: обработка видеоизображений, плотные траектории движения, обнаружение аномалий, метод главных компонент.

Введение

Видеонаблюдение приобретает все большое значение для охраны правопорядка в общественных местах и на частных территориях. Современные системы видеонаблюдения позволяют записывать видеоизображения с множества камер, создавая огромный поток данных, хотя потенциально опасные ситуации возникают достаточно редко. Человек оказывается неспособен удерживать внимание на видеокадрах, где многие события являются обыденными и повторяющимися, что снижает шанс обнаружения нештатных ситуаций. Возможным решением данной проблемы является система, которая бы сосредотачивала внимание оператора на существенных изменениях в сцене и необычном поведении людей.

За последние годы множество алгоритмов для обнаружения конкретных нештатных ситуаций было предложено и реализовано на основе строгих правил [1]. Данные алгоритмы позволяют с высокой надежностью обнаруживать заранее известные типы нештатных ситуаций, но их модификация для обнаружения иного типа аномалий нетривиальна. Для устранения этого недостатка было предложено несколько статистических подходов к задаче видеонаблюдения.

Одним из подходов является распознавание событий на основе статистических методов классификации. Успехи в области распознавания событий на видеоизображениях показали эффективность использования плотных траекторий движения в качестве признаков [2]. Тем не менее, для успешной классификации необходимы примеры всех интересующих типов поведения, что затрудняет применение предложенных методов к задаче видеонаблюдения, где потенциально опасные ситуации возникают достаточно редко.

Другим подходом к задаче является обнаружение нехарактерного поведения как отклонения от модели, сформированной на основе примеров нормального поведения. В различных областях применения было предложено множество статистических методов для обнаружения подобных аномалий [3]. Одним из распространенных подходов к обнаружению аномалий является оценка характерных взаимозависимостей между признаками с помощью метода главных компонент [4].

Ранее был предложен алгоритм оценки аномальности траекторий движения ключевых точек на основе метода главных компонент [5]. В данной работе предложен алгоритм обнаружения нехарактерного поведения по гистограммам направленного оптического потока

вдоль плотных траекторий движения. Основным различием между алгоритмами является извлекаемые характеристики поведения.

Алгоритм

Метод вычисления гистограмм направленного оптического потока вдоль плотных траекторий движения [2] заключается в следующем. Для инвариантности к масштабу используется пирамида из нескольких копий видеоизображения, где размеры каждого следующего уровня меньше размеров предыдущего в заданное количество раз. Для каждого изображения из пирамиды с одинаковым шагом задается прямоугольная сетка, пиксели в узлах которой отслеживаются при условии отсутствия проблемы апертуры в их окрестности. Для каждого уровня производится оценка оптического потока методом Фарнебака, на основе которой вычисляются дальнейшие положения пикселей. Каждый пиксель отслеживается заданное количество кадров, после чего извлекаются гистограммы направленного оптического потока вдоль его траектории движения и заново рассматривается возможность отслеживания пикселя в исходном узле сетки. Для объединения набора гистограмм на заданном промежутке видеопоследовательности в характеристики поведения используется модель «мешка признаков» [2], суть которой заключается в следующем. На этапе обучения пространство признаков разбивается на фиксированное количество областей, чьи центры определяются методом k-средних на основе некоторой выборки признаков. На этапе извлечения каждому признаку сопоставляется область с ближайшим центром и вычисляется гистограмма распределения признаков по областям, которая используется в качестве характеристики поведения.

Данный способ извлечения характеристик поведения используется в предлагаемом алгоритме следующим образом. На стадии обучения оператор указывает кадры, которые содержат только «нормальное» поведение. Для этих кадров извлекаются векторы признаков поведения и для получившегося набора векторов находятся главные компоненты. Ортонормированный набор из векторов главных компонент представляет собой модель нормального поведения. На стадии анализа поведения в сцене текущий вектор характеристик поведения $\vec{F}$ проецируются на ортонормированный набор векторов главных компонент и обратно. Поскольку в общем случае такой набор векторов является неполным и не представляет собой базиса, то при таком преобразовании может быть потеряна некоторая составляющая вектора $\vec{F}$. Далее эта составляющая называется вектором невязки и её можно вычислить из следующего выражения:

$$\vec{R} = \vec{F} - \vec{P} \qquad (1)$$

где $\vec{R}$ – вектор невязки, $\vec{F}$ – текущий вектор характеристик, $\vec{P}$ – вектор характеристик, полученный после проекции $\vec{F}$ на набор векторов главных компонент и проецирования обратно.

Одной из возможных оценок аномальности на основе вектора невязки $\vec{R}$ является относительная невязка, которая определяется следующим выражением:

$$r = \frac{\left|\vec{R}\right|}{\left|\vec{F}\right|} \qquad (2)$$

где r – относительная невязка, $\left|\vec{R}\right|$ – норма вектора невязки, $\left|\vec{F}\right|$ – норма вектора характеристик поведения.

Результаты экспериментов

Работа алгоритма была проверена, как на видеозаписях лаборатории университета Калифорнии в Сан Диего (UCSD) [6], так и на экспериментально полученных видео. Видеозапись «Работа и ремонт» были сделана в компьютерном классе ННГУ. На нем в качестве

нормального поведения была взята работа за компьютером, а в качестве нештатного – манипуляции с задней панелью системного блока. Видеозапись лаборатории UCSD содержит пешеходную улицу, обычная ходьба по которой была взята за нормальное поведение, а проезд транспортных средств – за нештатное. Из каждого видео бралось ограниченное число примеров нормального поведения, на которых обучались алгоритмы. Затем вычислялись значения оценок аномальности для всех кадров с нормальным и нештатным поведением из выбранного видео, на основе которых рассчитывались равные уровни ошибок. При этом для уменьшения влияния шума и вычислительных погрешностей отбрасывались главные компоненты, которые описывали менее 0,1 % вариации характеристик нормального поведения.

Значения равных уровней ошибок для предлагаемого алгоритма и алгоритма на основе траекторий движения ключевых точек [5] при разном количестве обучающих примеров приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что использование гистограмм направленного оптического потока вдоль плотных траекторий движения приводит к снижению равного уровня ошибок, в особенности для видеозаписи лаборатории UCSD. Такой результат можно объяснить отслеживанием больше́ го количества точек и объединением характеристик нескольких траекторий в единую характеристику поведения в сцене, что позволяет учесть взаимозависимости между ними.

Таблица 1

Равные уровни ошибок для алгоритмов обнаружения нехарактерного поведения для видео «Работа и ремонт» и видеозаписи лаборатории UCSD.

Название видео	Количество обучающих примеров	Траектории движении ключевых точек	Гистограммы направленного оптического потока вдоль плотных траекторий движения
Работа и ремонт	3	21 %	18 %
Работа и ремонт	7	19 %	16 %
UCSD	5	46 %	30 %
UCSD	25	42 %	37 %

Выводы

В данной работе предложен алгоритм обнаружения нехарактерного поведения на основе метода гистограмм направленного оптического потока вдоль плотных траекторий движения и главных компонент. Результаты экспериментов свидетельствует о снижении уровня ошибок в сравнении с ранее предложенным алгоритмом на основе траекторий движения ключевых точек [5].

Библиографический список

1. Sodemann, A. A Review of Anomaly Detection in Automated Surveillance / A. Sodemann, M. Ross, B. Borghetti // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. – 2012. – Vol. 42(6). – P. 1257-1272.
2. Wang, H. Dense trajectories and motion boundary descriptors for action recognition / H. Wang, A. Kläser, C. Schmid, C. Liu //International Journal of Computer Vision.–2013.–Vol.103(1).- P. 60-79.
3. Chandola, V. Anomaly detection: A survey / V. Chandola, A. Banerjee, V. Kumar // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2009. – Vol. 41(3). – 72 p.
4. Jolliffe, I. Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistic / I. Jolliffe. – NY: Springer., 2002. – 488 p.
5. Шаталин, Р.А. Оценка аномальности траекторий движения в задачах видеонаблюдения / Р.А. Шаталин, В.Р. Фидельман, П.Е. Овчинников // XXII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2016, Нижний Новгород, Россия, материалы конференции. – 2016. – С. 399.
6. Mahadevan, V. Anomaly Detection and Localization in Crowded Scenes / V. Mahadevan, W. Li, V. Bhalodia, N. Vasconcelos // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2014. – Vol. 36(1) – P. 18-31.

R.A. Shatalin, V.R. Fidelman, P.E. Ovchinnikov

ABNORMAL BEHAVIOUR DETECTION ALGORITHM BASED ON PRINCIPAL COMPONENTS AND HISTOGRAMS OF ORIENTED OPTICAL FLOW ALONG DENSE TRAJECTORIES

N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

In past years, various algorithms for detecting particular abnormal events were proposed and implemented based on some strict rules. However they are limited to specific conditions and type of predefined anomalies. In order to overcome these limitations, various statistical approaches to the problem of video surveillance were proposed. One of them is detecting abnormal behavior as deviation from model learned from samples of normal behavior.

The paper proposes algorithm for abnormal behavior detection in the video surveillance based on histograms of oriented optical flow along dense trajectories and principal component analysis. The test results under different number of training samples show decrease in error rates in comparison to previously proposed algorithm based on motion trajectories of keypoints.

Keywords: video analysis, dense trajectories, anomaly detection, principal component analysis.

УДК 621.396.96

А. В. Мякиньков, А. А. Кузин, С.В. Шишанов, Р.С. Фадеев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА ДАЛЬНЕГО ДЕЙСТВИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментальных исследований макета автомобильного радара с антенной решеткой миллиметрового диапазона длин волн и системой цифровой обработки сигналов на основе отечественного процессора.

Ключевые слова: автомобильный радар, разностная частота, спектральный анализ, пороговый анализ.

Введение

В начале 50-х годов XX века для предотвращения летальных исходов на автомобилях начали применять пассивные системы безопасности, такие как ремень безопасности и подушки безопасности. В настоящее время усилия автомобильной промышленности направлены на достижение нулевого показателя летальных исходов в автомобильных авариях. В связи с этим в автомобилестроении пассивные системы безопасности дополняются активными системами, которые позволяют избежать опасных ситуаций путем вмешательства в управление автомобилем. Активные системы безопасности включают лидары, видеокамеры и автомобильные радары. Автомобильные радары, в отличие от видеокамер и лидаров, гораздо меньше подвержены влиянию загрязнения и атмосферных осадков [1].

С начала развития автомобильных радаров ключевым фактором исследований было создание радаров для предотвращения столкновений. Первыми коммерческими автомобильными радарами были радары дальнего действия. Такие радары используются для обнаружения целей на расстоянии от 100 до 300 м и контролируют сектор обзора в пределах 30° впереди автомобиля [1, 2]. Радары дальнего действия обычно применяются в системах адаптивного автоматического поддержания скорости и предотвращения столкновений. В настоящее время для автомобильных радаров дальнего действия применяют диапазон частот 24 и 77 ГГц.

Принцип измерения

В автомобильных радарах дальнего действия обычно применяется непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Одним из аргументов в пользу этого типа сигнала является относительная простота устройств его формирования и обработки. При использовании непрерывного сигнала для обнаружения объектов на заданной дальности, требуется существенно меньшая средняя мощность передатчика. При этом в системе, использующей непрерывный сигнал, необходимо использовать 2 отдельные антенны – одну на прием, другую на передачу.

Применение непрерывного ЛЧМ сигнала позволяет определять дальность до цели частотным методом измерения дальности. На рисунке 1 приведен график зависимости закона изменения частоты от времени для непрерывного сигнала с линейной частотной модуляцией излученного передатчиком (1) и сигнала, отраженного от цели, принятого приемником (2).

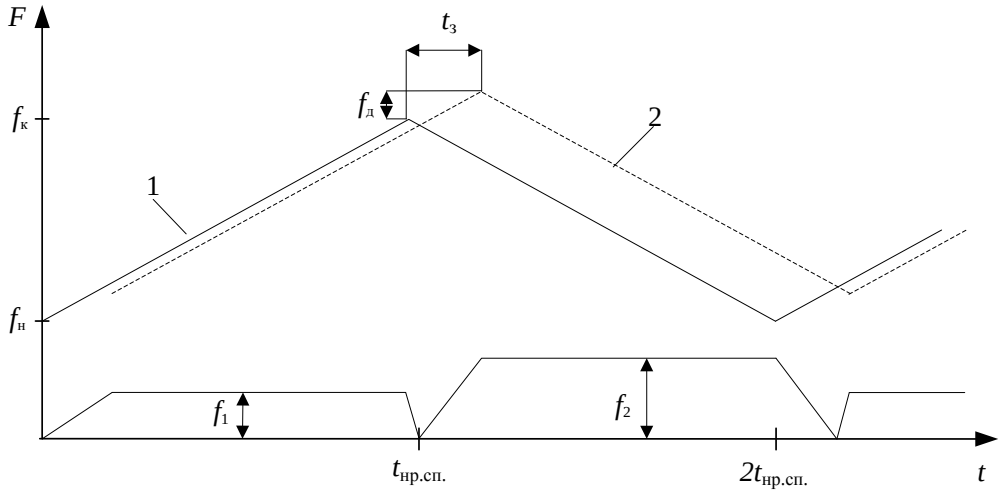


Рис. 1 Закон изменения частоты излучаемого сигнала

На рис. 1 частоты f_1 и f_2 определяются соотношениями $f_1 = -f_д + t_з \cdot \beta$, $f_2 = f_д + t_з \cdot \beta$, где $f_д = \pm 2 \cdot V/\lambda$ – частота Доплера, вызванная движением цели, $\beta = \Delta f / t_{нр.сп.}$ – индекс частотной модуляции, $t_з = 2 \cdot R/c$ – задержка распространения сигнала, c – скорость света в вакууме, R – расстояние до цели, $\Delta f = f_к - f_н$ – ширина спектра частот излученного сигнала, $t_{нр.сп.}$ – длительность интервала нарастания/спада частоты сигнала с линейной частотной модуляцией.

Алгоритм обработки сигнала заключается в перемножении излученного сигнала с принятым приемником и низкочастотной фильтрации. На выходе системы обработки выделяется сигнал разностной частоты (рис. 1 частоты f_1 и f_2). Измеряя частоты f_1 и f_2, можно оценить дальность и скорость цели по формулам [1, 3] (1):

$$R = \frac{c \cdot t_{нр.сп.}}{4 \cdot \Delta f} \cdot (f_2 + f_1), \quad V = \frac{c}{4 \cdot f_ц} \cdot (f_2 - f_1) \qquad (1)$$

Описание экспериментального макета

Для исследования алгоритмов обработки сигналов в автомобильных радарах был разработан экспериментальный макет, работающий в диапазоне частот 24 ГГц. На рис. 2 приведена фотография разработанного макета.

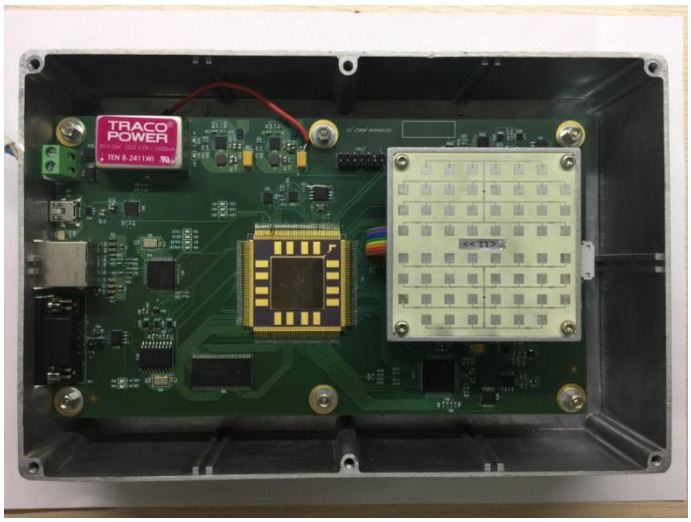


Рис. 2 Фотография экспериментального макета

Экспериментальный макет состоит из антенной решетки и приемопередающего модуля, компании «RFBeam», и платы цифровой обработки сигналов на основе сигнального процессора 1967ВЦ3Т и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) 5101НВ015 компании АО «ПКК Миландр». В табл. 1 приведены основные технические параметры экспериментального макета.

Таблица 1

Технические параметры экспериментального макета

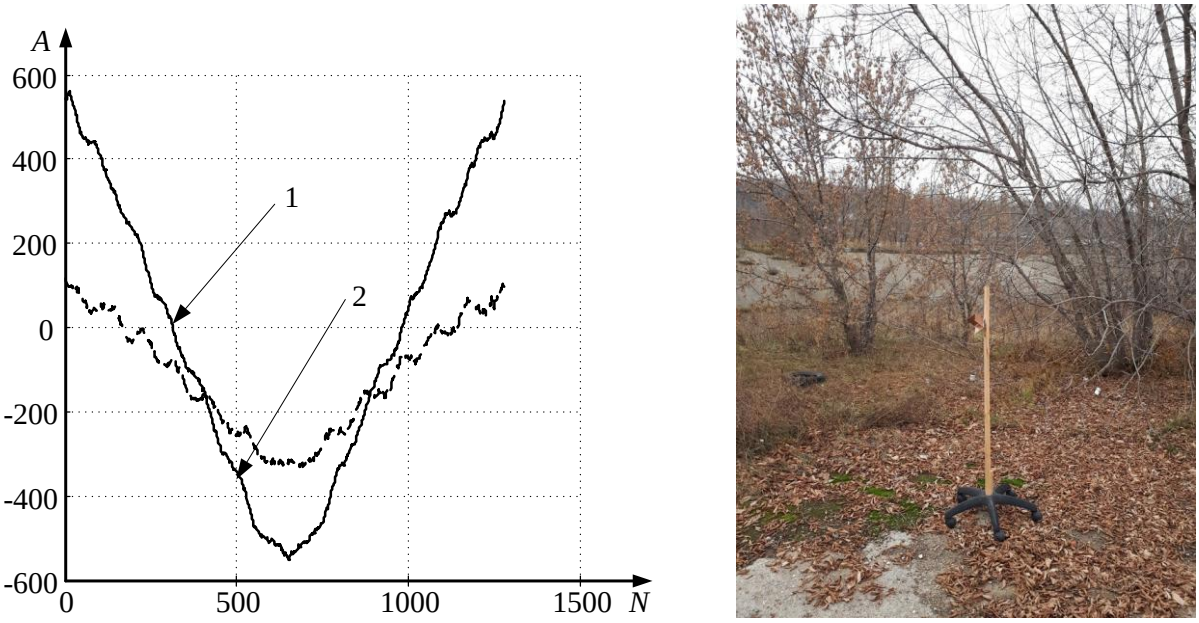
Параметр	Значение
Центральная частота сигнала, ГГц	24,125
Ширина спектра частот сигнала, МГц	75
Период перестройки ЛЧМ сигнала, мс	10
Мощность излучаемого сигнала, дБм	20
Ширина спектра квадратурных составляющих сигнала на выходе приемника, кГц	300
Ширина ДН антенны в азимутальной плоскости, °	12
Ширина ДН антенны в угломестной плоскости, °	25
Разрядность АЦП, бит	16
Частота дискретизации, кГц	125
Разрядность ЦАП, бит	16

Экспериментальный макет управляется с персонального компьютера через интерфейс Ethernet по протоколу UDP с помощью разработанного программного обеспечения. Макет работает в двух режимах: режим передачи данных с выхода АЦП на компьютер и режим обработки сигнала. В режиме передачи данных отсчеты записываются во внутреннюю память процессора и затем передаются на компьютер. В режиме обработки сигнала осуществляется первичная обработка, формирование отметок, передача их на компьютер и отображение на индикаторе.

Результаты экспериментальных исследований

С помощью разработанного макета были проведены натурные эксперименты на закрытой площадке «Группы ГАЗ» по тестовым объектам и на дорогах общего пользования на реальных объектах. В качестве тестовых объектов использовались уголковый отражатель и легковой автомобиль.

На рис. 3 *а*) приведен график одного периода зондирования реальной (1) и мнимой (2) частей отраженного сигнала от уголкового отражателя, изображенного на рис. 3 *б*), находящегося на расстоянии 20 м от радара.



а) *б*)

Рис. 3 Сигнал на выходе приемопередающего модуля

В автомобильных радарах обнаружение сигнала, отраженного от цели, обычно производится в частотной области. На рис. 4 представлен график спектра на выходе системы цифровой обработки сигнала.

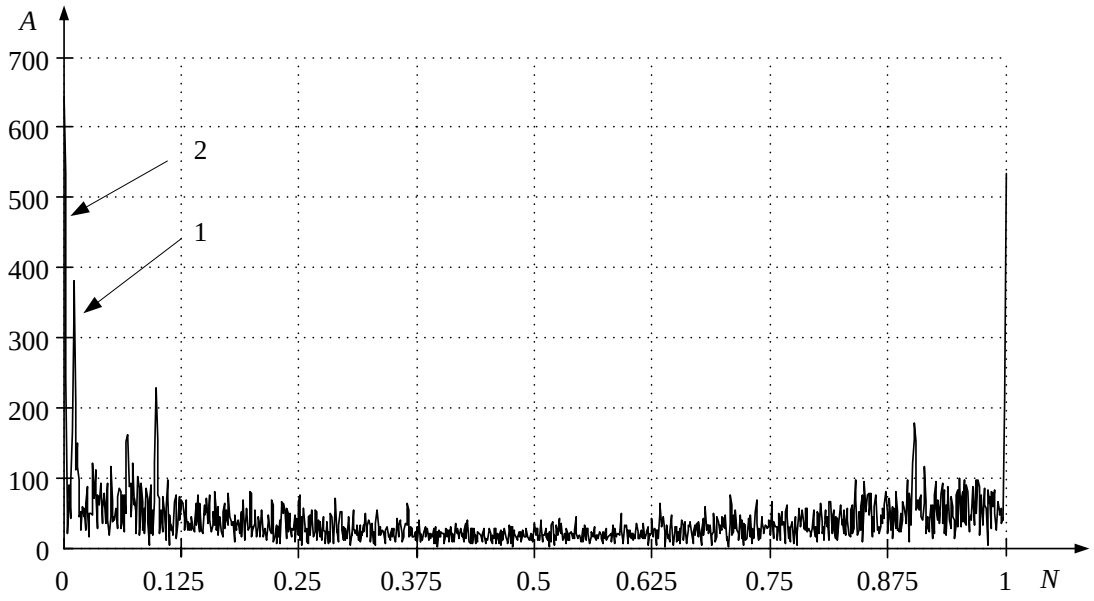


Рис. 4 Амплитудно-частотный спектр сигнала, отраженного от уголкового отражателя, находящегося на расстоянии 20 м от радара

На рис. 4 цифрой 1 обозначена частота, вызванная сигналом, отраженным от уголкового отражателя. Из-за того, что в радаре передающая и приемная антенны работают одновременно, сигнал с выхода передатчика утекает в приемник и в области нулевых частот возникает гармоника, которая на рис. 4 обозначена цифрой 2. Для ее подавления обычно применяют режекторный фильтр.

На рис. 5 представлена спектрограмма сигнала, отраженного от автомобиля.

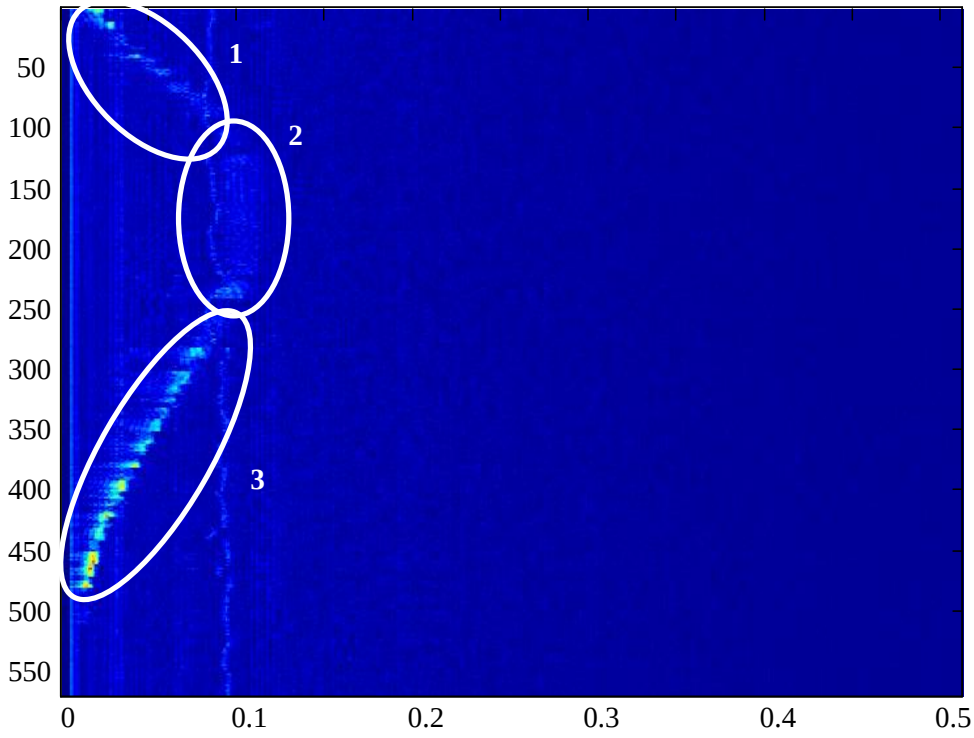


Рис. 5 Спектрограмма сигнала, отраженного от движущегося автомобиля

В эксперименте автомобиль удалялся от радара со скоростью около 15 км/ч на дальность около 110 м (область 1), затем останавливался (область 2), а потом двигался назад к радару со скоростью около 7 км/ч (область 3). Из рис. 5 видно, что в области 2 сигнал, отраженный от автомобиля имеет распределенный характер. На больших дистанциях имеет место многолучевое распространение отраженного от цели сигнала (переотражение сигнала от подстилающей поверхности).

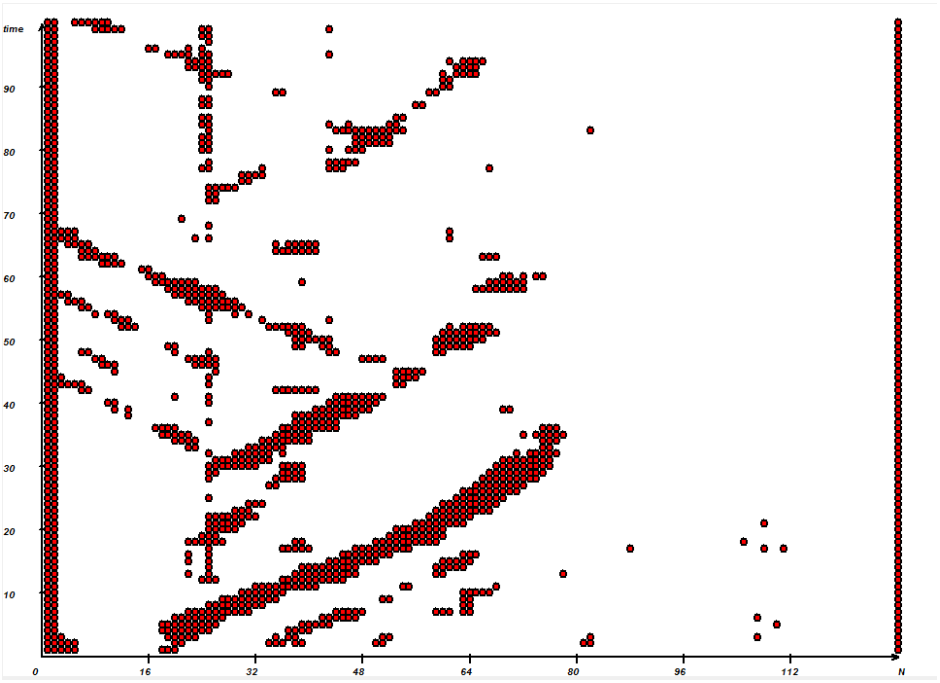


Рис. 6 Сигнал на выходе обнаружителя

На рис. 6 приведен окно индикатора, где красными точками обозначены отметки, превысившие порог в обнаружителе. Экспериментальное исследование проводилось в г. Нижний Новгород на улице Минина по реальной дорожной обстановке. Из рис. 6 видно, что объекты обнаруживаются на дальности от 20 до 100 м. Минимальная дальность обнаружения вызвана тем, что радар был расположен под углом к дорожному полотну. На дальности более 100 м объекты не обнаруживаются, так как мощность отраженного сигнала от объектов сравнима с общим уровнем шума. Из рис. 6 видно, что на дальности около 30 м виден неподвижный объект – припаркованный автомобиль. В зависимости от размера объекта (легковой автомобиль или автобус) изменяется число точек, превысивших порог. Используя данную информацию можно построить алгоритм классификации объектов.

Заключение

Из анализа результатов натурных экспериментов видно, что радар стабильно обнаруживает объекты на дальностях до 100 м. В настоящее время ведется разработка перспективной цифровой антенной решетки, которая позволит измерять не только дальность и скорость объектов, но и оценивать их азимут, что в перспективе при участии вторичной обработки позволит оценивать координаты объектов.

Библиографический список

1. Implementing Digital Processing for Automotive Radar Using SoC FPGAs, Altera Corporation, 2013– 16 p.
2. Рекомендация МСЭ-R М.1452-2. Автомобильные радары для предотвращения столкновений и системы радиосвязи диапазона миллиметровых волн для применений интеллектуальных транспортных систем.– Женева: Междунар. союз электросвязи, 2012.– 9 с.
3. Kamimura M., Honda K., Fujita Y. High Performance Automotive Millimeter Wave Radar System/ M. Kamimura, K. Honda, Y. Fujita// Fujitsu Ten Tech. J.– 1995.– № 7.– P. 19–25.

A.V. Myakinkov, A.A. Kuzin, S.V. Shishanov, R.S. Fadeev

EXPERIMENTAL STUDY OF LONG-RANGE AUTOMOTIVE RADAR MODEL

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

The results of experimental study of the automotive radar model with the millimeter wave antenna array and digital signal processing system based on Russian processor are presented.

Key words: automotive radar, differential frequency, spectral analysis, threshold

УДК 621.372.832.8

В.М. Абдуллин, В.А. Козлов

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПОЛОСКОВОГО Y-ЦИРКУЛЯТОРА НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Предложен поэтапный вариант моделированияполоскового Y-циркулятора на сосредоточенных элементах вдециметровом диапазоне.

Методология: Моделирование,и расчёт основных характеристик устройства производится в пакете САПР ANSYS HFSS.

Результаты: Анализируются S-параметры циркулятора, смоделированного на основе феррита с маркой 10СЧ6Б. Расчёт САПР HFSS показывает, что возможно сконструировать Y-циркулятор, если заданы жёсткие требования на высоту и радиус феррита, а также демонстрируется удобство данного САПР при формировании полоскового Y-сочленения.

Выводы:Введение сосредоточенных элементов позволяет минимизировать размеры устройства, улучшает S-параметры. Алгоритм, приведённый в данной работе может облегчить процесс проектирования и регулировки при конструировании циркуляторов, что в свою очередь снижает трудоёмкость при создании полоскового Y-сочленения.

Ключевые слова: Y-циркулятор, L-диапазон,сосредоточенный элементы, дециметровый диапазон, САПР ANSYS HFSS, S-параметры.

Развитие радиолокации, радиорелейной связи, радиоастрономии и т.п. создало активное становление радиотехнических приборов сверхвысоких частот и сформировало перед ними последовательности новых задач.

Эксплуатация в качестве источника электромагнитных колебаний магнетонов, положительно работающих только на приемлемо согласованную нагрузку, потребовало создания и внедрения устройств, которые способны развязать нагрузку с генератором без существенных потерь передаваемой мощности. Устройства подобного типа должны обладать свойством невзаимности, то есть волны распространяющиеся в разных направлениях должны иметь различные параметры. Такие приборы поглощают или отводят в специализированную нагрузку энергию, отражённую от антенно-волноводного тракта, что обеспечивает защиту генератора.

Электрическое сканирование лучом диаграммы направленности антенны, автоматизированная настройка и регулировка амплитуды сигнала СВЧ-диапазона, последовательное и поочерёдное переключение передающего устройства на несколько антенн потребовали разработки специальных приборов таких как: переключателей, фазовых и амплитудных модуляторов, фильтров перестройки, коммутаторов. Все выше перечисленные исполнения организуются благодаря применению в них ферромагнитных материалов - ферритов [1].

В настоящее время важную роль в области ферритовых устройств занимают циркуляторы. Они нашли широкое применение в технике СВЧ и антеннах, за счёт приемлемых габаритов и хороших электрических параметров. Устройства данного типа способны работать в широком диапазоне частот. В большинстве литературных источников всплывают упоминания о циркуляторах, которые способны работать при длинах волн от 15 мм до 2 мм. Главная их характеристика - это сохранение небольших размеров при увеличении по длине волны [2]. Это достигается при помощи применения микрополосковых линий, а также распределённых и сосредоточенных элементов.

За всю историю конструирования циркуляторов существуют различные исполнения, однако в их основе положено симметричное разветвление волноводной или полосковой линии под углом 120 градусов, где всегда стараются обеспечить крайне высокий уровень симметрии 3-го порядка.

Данная работа посвящена моделированию и расчёту ферритового полоскового Y-циркулятора на сосредоточенных элементах L-диапазона. Моделирование производилось в пакете САПР ANSYS HFSS, с использованием расчётных методов, приведённых в [3]. В основе расчётного метода лежит совместное решение уравнений циркуляции, конечное решение которых даёт значения радиуса и высоты ферритовых дисков. Однако, тут существует проблема, суть которой заключается в том, что на выходе получаются большие расчётные значения радиуса феррита и его высоты, что неприемлемо, если при разработке или моделировании был сделан акцент на габариты и массу устройства, особенно ярко это наблюдается в зарезонансных циркуляторах дециметрового диапазона и ниже. В таких ситуациях, приходят к такому приёму, когда центральное полосковое Y-сочленение представляет собой замедляющую структуру, содержащую ёмкостные и индуктивные сосредоточенные элементы, включаемые в каждое из плеч Y-циркулятора. Экспериментальные исследования в этом направлении показывают, что не удаётся получить уменьшение диаметра ферритового диска более, чем в 1,5 - 2 раза. Сложность использования данного подхода прежде всего обусловлена тем, что на практике сложно отрегулировать циркулятор под нужный рабочий диапазон частот, так как характер и строение сосредоточенных элементов получаются эмпирическим путём, и они требуют большой трудоёмкости. Цель моей работы - оптимизировать процесс разработки Y-сочленения на сосредоточенных элементах, с использованием ANSYS HFSS.

Таблица 1. Исходные данные для расчёта

Наименование параметра, расчётная единица	**Значение параметра**
Рабочая частота, ГГц	1,4
Относительная проницаемость феррита	15,2
Намагниченность насыщения феррита, Э	1780
Высота феррита, мм	2
Тангенс угла диэлектрических потерь в феррите	0,0002
Ширина кривой ферромагнитного резонанса, Э	35
Рабочая длина волны, м	0,21

Первоначально смоделированный циркулятор основанный на исходных данных приведённых в табл.1, привел к тому, что циркуляция прибора осуществлялась в S-диапазоне. При этом расчётный радиус феррита получился в 14 мм, при высоте в 2 мм. Это стало отправной точкой для оптимизации структуры, с целью уменьшения габаритов устройства. Мной был снижен радиус феррита до 9 мм, а также добавлены сосредоточенные элементы в виде поперечных разрезов в Y-сочленении. Зазоры располагались как можно ближе к входному плечу циркулятора, что позволяло мне манипулировать входным сопротивлением моделируемой структуры. В итоге, S-параметры циркулятора на первом этапе оптимизации приведены на рис.1.

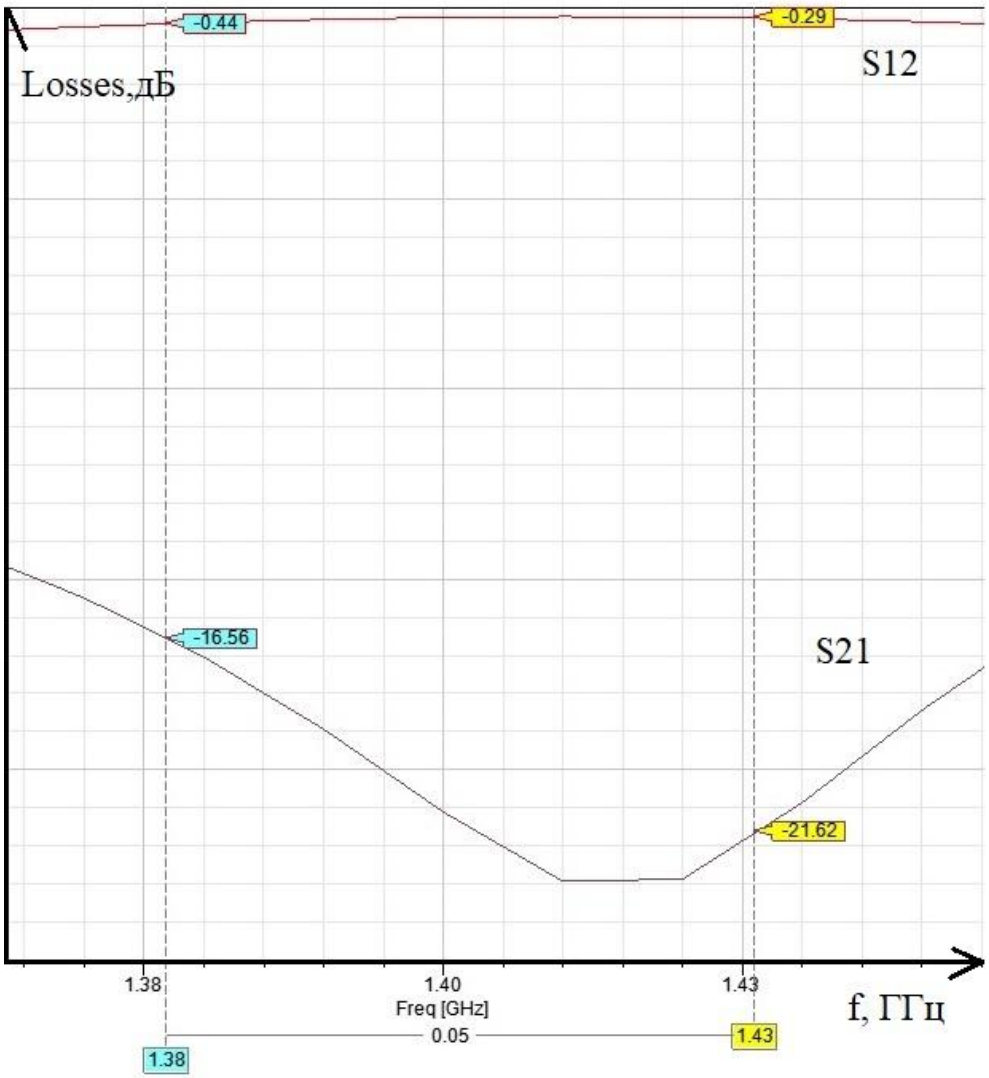


Рис.1. Первый шаг оптимизации структуры Y-циркулятора

На рисунке 1 видно, что S-параметры не удовлетворяют техническим характеристикам циркулятора, также получилась очень узкая полоса рабочих частот в 30 МГц.

Второй этап оптимизации структуры заключался в тонкой доработке геометрии Y-сочленения. Помимо этого моделировались ситуации при изменении толщины Y-сочленения, подбиралось оптимальное значение внешнего поля подмагничивания, проводилась доработка конструкции, введением в неё фторопластовых колец, подбиралась длина входных полосковых линий. В результате, конечный вид полоскового Y-сочленения представлен на рис.2 и рис.3.

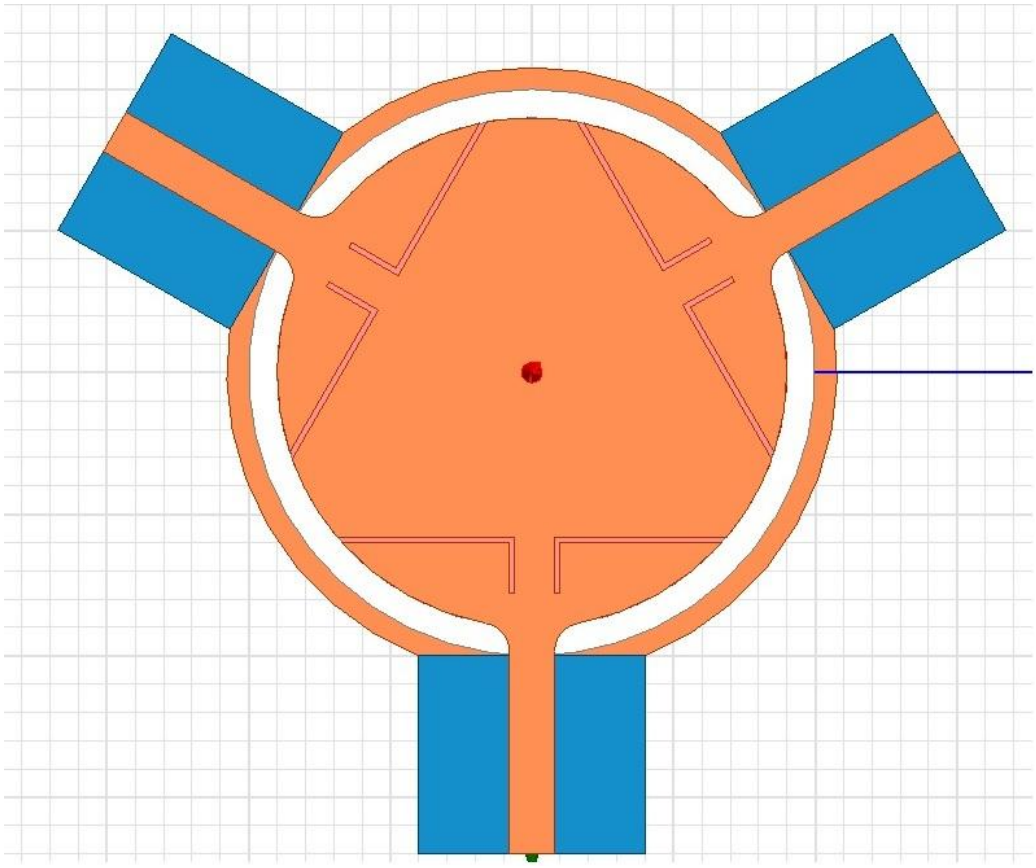


Рис.2. Внешний вид полоскового Y-сочленения сверху

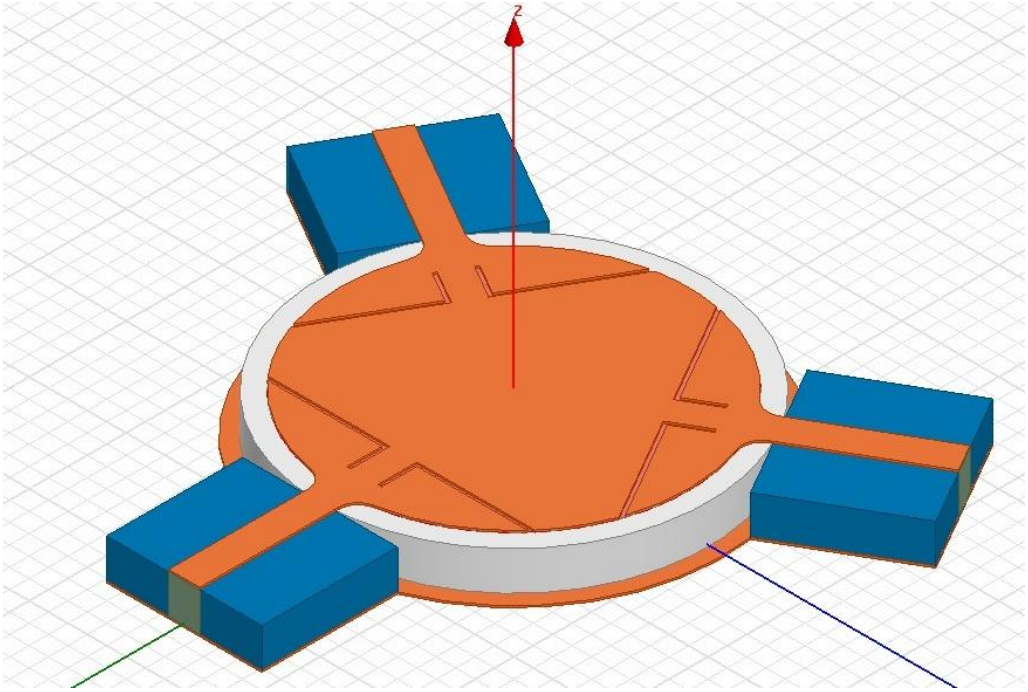


Рис.3. Изометрический вид Y-сочленения

Стоит отметить, что особую роль на S-параметры циркулятора оказывает не только расположение, но и толщина сосредоточенных зазоров. На рис.4 и рис.5 приведены вносимые(S12) и обратные потери(S21) для зазоров в 0,3 мм и 0,2 мм соответственно.

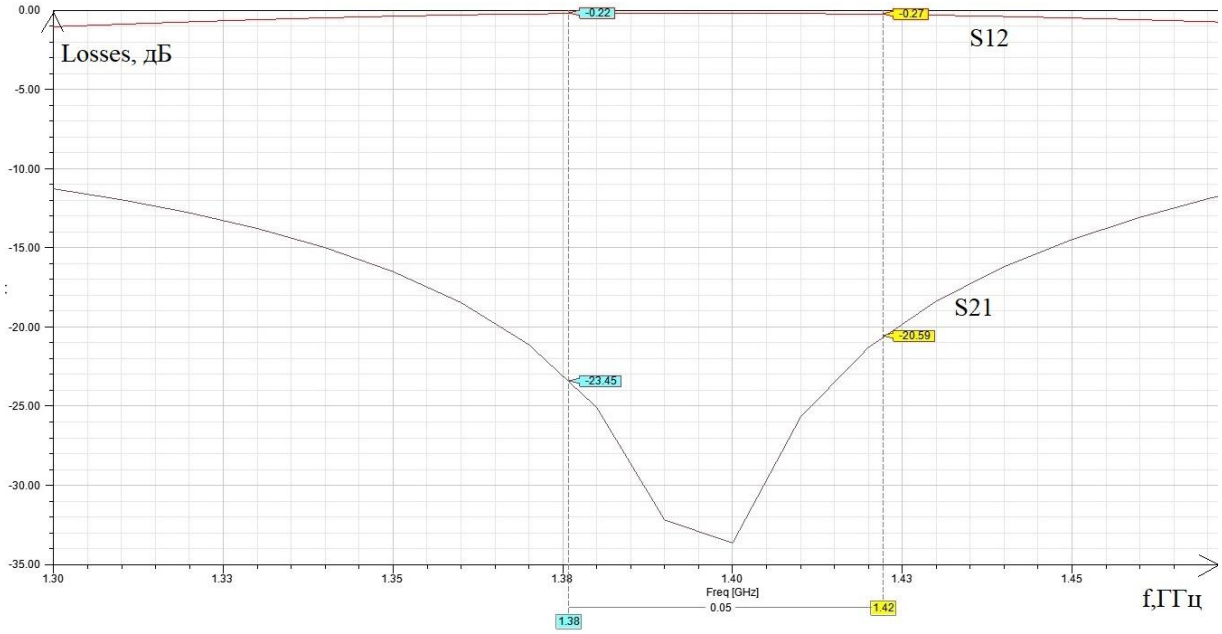


Рис.4. S-параметры при толщине зазоров в 0,3 мм

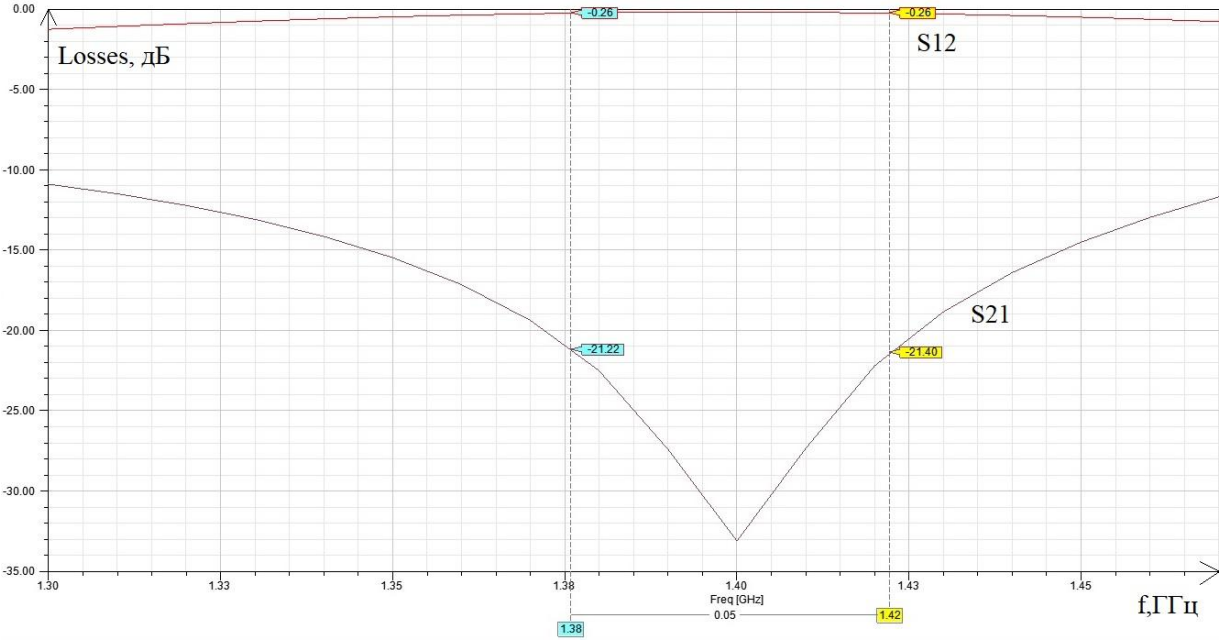


Рис.5. S-параметры при толщине зазора в 0,2 мм

Анализируя полученные результаты, следует, что индуктивные зазоры в 0,3 мм в данной структуре обеспечивают лучшие S-параметры, а также более широкий рабочий диапазон в 60 МГц. Необходимо добавить, что изменение толщины проводника носит индуктивный характер, и нужно подобрать его оптимальное значение. В приведённой выше структуре толщина проводника бралась в 100 мкм. Однако, важно отметить, что слишком тонкие проводники (20-50 мкм) на

практике ненадёжны, так как они неустойчивы к слабым механическим воздействиям, а если такой проводник будет использоваться в циркуляторе предназначенным для высокого уровня мощности (ВУМ), велика вероятность электрического пробоя.

Ещё один способ улучшить характеристики Y-циркулятора - это использовать фторопластовые кольца, которые играют роль четвертьволнового трансформатора, чтобы согласовать входное сопротивление ферритового элемента и волновое сопротивление полосковой линии, также, на практике, они помогают центрировать ферритовый вкладыш обеспечивая стабильную соосность ферритовых дисков.

Выводы

В результате, мной был разработан поэтапный подход моделирования трёхмерной структуры ферритового Y-циркулятора на сосредоточенных элементах. Для расчёта и оптимизации устройства был использован программный пакетANSYS HFSS. Представлены основные характеристики и их зависимости от геометрии полоскового Y-сочленения и размеров феррита. Введение сосредоточенных элементов позволяет минимизировать размеры устройства, улучшает S-параметры [4]. Помимо этого, можно скруглить острые грани у индуктивных разрезов, что положительно скажется на согласовании устройства, а также, на практике, это снижает шансы на электрический пробой при высоких передаваемых мощностях. Алгоритм, приведённый выше может облегчить процесс проектирования, регулировки и испытаний при конструировании циркуляторов, что в свою очередь снижает трудоёмкость при создании полоскового Y-сочленения.

Библиографический список

1. Лакс Б., Баттон К. «Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики» —М.: Мир, 1965. — 676 с.

2. Карбовский С.Б., Шахгеданов В.Н. «Ферритовые циркуляторы и вентили» —М.: Советское радио, 1970. — 33 с.

3. Вамберский М.В., Абрамов В.П., Казанцев В.И. «Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ под ред. М. В. Вамберского» — М.: Высш. шк. , 1984. — 82 с.

4. Карбовский С.Б., Шахгеданов В.Н. «Ферритовые циркуляторы и вентили» —М.: Советское радио, 1970. — 72 с.

V. M. Abdullin, V. A. Kozlov

MODELING AND CALCULATION OF MICROSTRIP Y-CIRCULATOR ON LUMPED ELEMENTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: A step-by-step version of modeling the strip Y-circulator on lumped elements in the decimeter range is proposed.

Methods: Modeling and calculation of the main characteristics of the device is done in the ANSYS HFSS CAD package.

Results: The S-parameters of a circulator modeled on a ferrite with the grade 10CH6B are analyzed. The calculation of the CAD HFSS shows that it is possible to design a Y-circulator if the rigid requirements for height and radius of ferrite are specified, and also the convenience of this CAD for demonstrating the Y-joint strip is demonstrated.

Finding: The introduction of lumped elements allows to minimize the size of the device, improves the S-parameters. The algorithm given in this paper can facilitate the process of designing and adjusting the construction of circulators, reduces the complexity of creating a strip Y-joint.

Key words: Y-circulator, L-band, lumped elements, decimeter range, CAD ANSYS HFSS, S-parameters.

УДК 621.396.674.35

Г.Р. Беляев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕФЛЕКТОРОВ ДЛЯ АНТЕНН ИЗ УГЛЕКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ФГБОУ «Волжский государственный университет водного транспорта»

В данной статье отражены результаты исследований по созданию макетов рефлекторов антенных устройств из углеродных материалов с применением графеносодержащего эпоксисвязующего. Проведено измерение и сравнение их основных радиочастотных параметров с металлическими аналогами. Перечислены преимущества и недостатки предлагаемых решений.

Ключевые слова: углекомпозитные материалы, графен, антенная система, дипольная антенна.

В настоящее время антенны и антенные устройства являются неотъемлемой частью радиоэлектронной аппаратуры. Существует огромное количество конструкций антенных систем, начиная от микрополосковых антенн, размерами в единицы миллиметров, и заканчивая большими рефлекторными антеннами радиотелескопов. Чаще всего материалом для их изготовления являются металлы, такие как сталь, алюминий или медь. Эти материалы являются традиционными для изготовления антенных устройств, хорошо себя зарекомендовали, накоплен большой опыт по их применению в антенной технике. Однако они имею ряд недостатков, таких как высокий коэффициент температурного расширения, низкая коррозионная стойкость при использовании их в условиях агрессивной среды, относительно высокий вес и трудности в изготовлении конструкций сложной формы, требующие высокоточного металлообрабатывающего оборудования.

Принципиальная новизна предлагаемых решений заключается в использовании инновационных материалов – углекомпозитов для создания высокотехнологичных антенных устройств и систем. Предлагается использовать такие материалы на основе углерода не только для изготовления несущих частей конструкций, но и для радиочастотных компонентов. Ранее уже были проведены исследования по возможности создания углекомпозитных дипольных антенн, которые показали свою работоспособность и высокие электромагнитные характеристики [1]. В данной работе ставится задача расширить эти исследования и создать не только диполи из углекомпозитного материала, но и другие радиочастотные элементы антенных систем и изучить их электромагнитные характеристики.

Таким образом, были изготовлены углекомпозитные диполи и контррефлекторы для антенн на диапазоны 530МГц и 1040МГц с применением углеродной нити и графеносодержащего эпоксисвязующего. Контррефлекторы были изготовлены путем наложения на пластиковое основание углеродной ткани и нанесения графеносодержащего эпоксисвязующего. Углеродные нити в ткани переплетены между собой под прямым углом, как показано на рисунке (Рис.1). Такой метод изготовления предполагает изотропную проводимость получившегося углекомпозитного контррефлектора.

Внешний вид дипольной антенны с углекомпозитным контррефлектором и углекомпозитными диполями представлен ниже на Рис.2.

Данная технология позволяет изготавливать не только контррефлекторы различных размеров, но и прочие элементы антенных систем [2],[3],[4]. Так же были изготовлены диполи из углеродной нити, намотанной на непроводящие заготовки с применением эпоксидной смолы и добавками графенового порошка. Применялось два способа укладки нити: радиальная намотка и продольная укладка.

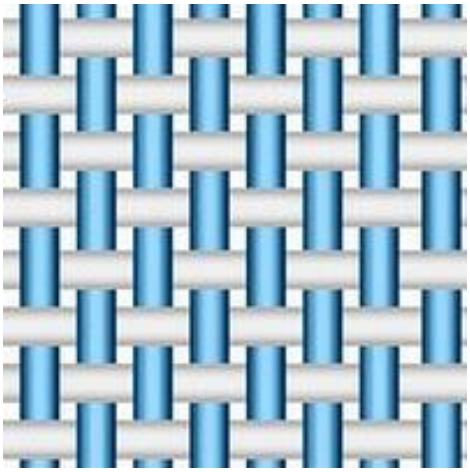


Рис. 1

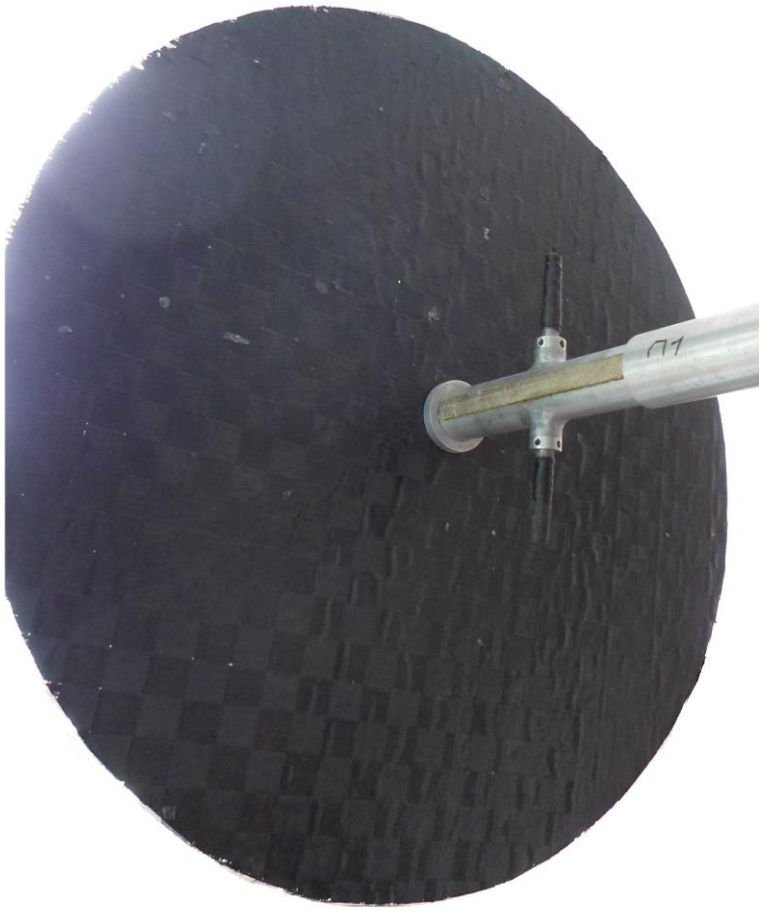


Рис.2

Для достижения максимально гладкой рабочей поверхности элементов предлагается применять технологию вакуумного формования. Используя заготовки сложной формы, напечатанные на 3D принтере и вакуумно-формовочную технику, можно добиваться изготовления излучающих элементов разнообразной формы с гладкой поверхностью.

В результате эксперимента были проведены измерения радиочастотных параметров полностью металлических антенн, антенн с углекомпозитными диполями и металлическим контррефлектором, а так же антенн с углекомпозитными диполями и углекомпозитным контррефлектором. Были измерены такие основные параметры как коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны. Результаты измерений для дипольных антенн диапазона 1040МГц представлены ниже в таблице (Табл.1).

Таблица 1

Вариант исполнения антенны	**Относительный коэффициент усиления (КУ углекомпозитной антенны относительно КУ металлической антенны)**	**Коэффициент стоячей волны (минимальный в рабочем диапазоне)**
Металлические диполи, металлический контррефлектор	**1**	**1.23**
Металлические диполи, углекомпозитный контррефлектор	**1.11**	**1.28**
Углекомпозитные диполи с радиальной намоткой нити, углекомпозитный контррефлектор	**0.95**	**1.16**
Углекомпозитные диполи с продольной укладкой нити, углекомпозитный контррефлектор	**0.95**	**1.17**

Результаты измерений для дипольных антенн диапазона 530 МГц представлены ниже в таблице (Табл.2).

Таблица 2

Вариант исполнения антенны	**Относительный коэффициент усиления (КУ углекомпозитной антенны относительно КУ металлической антенны)**	**Коэффициент стоячей волны (минимальный в рабочем диапазоне)**
Металлические диполи, металлический контррефлектор	**1**	**1.15**
Металлические диполи, углекомпозитный контррефлектор	**0.98**	**1.15**
Углекомпозитные диполи с радиальной намоткой нити, углекомпозитный контррефлектор	**0.89**	**1.18**
Углекомпозитные диполи с продольной укладкой нити, углекомпозитный контррефлектор	**0.99**	**1.27**

Выводы

После анализа полученных данных можно сделать вывод, что применение углекомпозитных материалов для изготовления различных элементов антенных систем возможно. Антенны, изготовленные частично или полностью из углекомпозитного материала имею характеристики, сравнимые с их металлическими аналогами. Небольшое расхождение измеренных параметров антенн, изготовленных разными способами и работающих в одном частотном диапазоне, обусловлено неровностью излучающей поверхности диполей и контррефлекторов. Это вызвано несовершенством технологии изготовления модельных образцов. Для улучшения радиочастотных параметров антенн, содержащих углекомпозитные элементы, предлагается использовать технологию вакуумного формования. При использовании данной технологии становится возможным изготовление высокопрочных, легких, устойчивых к агрессивным средам антенных систем, не уступающим по радиочастотным параметрам своим металлическим аналогам.

Библиографический список

1. Разработка СВЧ устройств из углекомпозитных материалов. Н.А. Дугин, Г.Р. Беляев. Сборник материалов конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ – 2017», секция 2 – проектирование радиоэлектронных устройств ВЧ- и СВЧ- диапазонов, с.1229-1232.

2. Hygroscopic aspects of epoxy/carbon fiber composite laminates in aircraft environments. H.S. Choi, K.J. Ahn, J.-D. Nam, H.J. Chun. Composites. Part A: applied science and manufacturing, 2001.

3. Tatyana Zaboronkova, Nikolai Dugin, Evgenii Myasnikov. "Microwave Horn Antenna Made of a Graphene-Containing Carbon Composite Material", International conference EuCAP’2015, Lisbon, Portugal, 12-17 April 2015. Proc.of EuCAP’2015.

4. Пат. 2577918 Рос. Федерация. Антенно-фидерное СВЧ-устройство из углекомпозитного материала и способ его изготовления / Н.А. Дугин, Т.М. Заборонкова, Е.Н. Мясников, В.В. Чугурин; НИРФИ (RU); Заявл. 09.09.2014; Опубл. 20.03.2016.

G.R. Belyaev

INVESTIGATION OF THE CARBON-COMPOSITE MATERIAL ANTENNA REFLECTORS CREATION POSSIBILITY

Volga state university of water transport

This article shows carbon composite antenna reflectors creation research results. Their main radio parameters were measured and compared with their metal analogs parameters. The main advantages and disadvantages of proposed solutions were listed.

Key words: carbon composite materials, graphene, antenna system, dipole antenna.

УДК 621.3.029.6

Н.В. Агейчева, Ю.А. Светлаков

АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПЛАСТИНАХ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Рассматривается применение алмазных сверл для обработки отверстий в резонаторах микрополосковых антенн. Представляются результаты исследований применения сверл различного вида.

Ключевые слова: алмазная обработка; корундовая керамика; алмазный инструмент.

При разработке бортовой аппаратуры спутниковой навигации, в частности при изготовлении микрополосковых антенн (МПА), возникла задача получения отверстий в керамических пластинах для изготовления резонаторов. Выбранный материал пластин – керамический материал «Кортим» [1].Особенностью керамических материалов является их высокая твердость (до 9 по Моосу). Для решения данной задачи и разработки технологии получения отверстий в резонаторах,была исследована технология изготовления отверстий: способы и условия технологического крепления пластин, отработаны технологические режимы; выбран инструмент, обеспечивающие необходимую точность и качество обработки.

Вследствие повышенной твердости и износостойкости керамики ее эффективная обработка возможна с использованием алмазного инструмента [2].

Получение отверстий в пластинах из керамических материалов, в частности корундовой керамики, является весьма трудоемкой операцией. Обработка отверстий с применением абразивных суспензий, методами лазерного и ультразвукового формообразования достаточно трудоемка в реализациии не всегда эффективна. Алмазное сверление, при определенных условиях, является одним из наиболее эффективных способов обработки отверстий способом сверления.

Применение алмазного сверления сдерживается из-за низкой износостойкости и кромкостойкости сверл. Главной причиной низкой износостойкости и кромкостойкости алмазных сверл (в первую очередь небольших диаметров 1-2 мм) является недостаточная прочность удержания алмазных зёрен в режущей части инструмента и их относительно невысокая (100 %) допустимая концентрация. Существующие виды металлических связок для изготовления сверл не обеспечивают адгезии алмазных зерен в матрице сверла [2]. Адгезионная способность связки увеличивается, если использовать алмазные зерна с металлическим покрытием [3].

Инструмент (сверло) работает в условиях высоких нагрузок: вся режущая поверхность находится в постоянном контакте с обрабатываемым материалом в замкнутом объеме. Для осуществления сверления необходимо применять специальные инструменты, создавать условия для охлаждения сверл, а также для удаления шлама из зоны обработки [3]. Для повышения эффективности процесса алмазного сверления одной из задач был поиск конструкций алмазного инструмента с характеристиками (маркой, зернистостью и концентрацией алмазного порошка, связкой), позволяющего производить эффективно обработку с минимальными затратами.

Рассмотрим применение нескольких видов конструкций алмазных сверл и проведем сравнительный анализ с целью определения технологических возможностей обработки с использованием данных сверл.

1**. Подковообразные алмазные сверла** из порошка синтетических алмазов марки АС32, зернистостью Н 80/63, с относительной концентрацией алмазов 100, на металлической связке МЭ. Подковообразные алмазные сверла имеют продольный паз, создающий благоприятные условия для удаления шлама и прохождения СОЖ. Подковообразные алмазные сверла представлены на рис.1.

Рис. 1. Сверла алмазные подковообразные

Для определения оптимального диаметра рабочей части сверла были опробованы сверла диаметром 1 мм с отклонениями от номинального размера: 0,99, 1,0, 1,01, 1,02, 1,05 мм. Результаты измерений действительных размеров отверстий, размеров и количества сколов в обработанных пластинах приведены в табл. 1. Измерения размеров отверстий и сколов производились на инструментальном микроскопе ИМЦ 100×50,А.

Таблица1.

Результаты измеренийотверстий, обработанных алмазными подковообразными сверлами

№	Размер рабочей части инструмента, мм	Размердиаметра отверстияна входе/выходе инструмента, мм	Максимальный размер и количество сколов на входе/выходе инструмента	Количество отверстий, обработанных одним инструментом
1	0,99	1,02…1,03/0,99…0,98	0,2 мм, 4 скола	6
2	1,0	1,03...1,04/0,99…1,01		6
3	1,01	1,05…1,02/0,99…1,02		6
4	1,02	1,07…1,05/1,05…1,01		6
5	1,05	1,13…1,09/1,1…1,08		6

Анализируя полученные результаты, приведенные в табл. 1, можно отметить, что с помощью одного сверла можно выполнить шесть сквозных отверстий с точностью не ниже 12 квалитета. После выполнения шести отверстийторцовая поверхность сверла, несущая алмазоносный слой, полностью изнашивалась.

В процессе работы проводился контроль шероховатости обработанных поверхностей отверстий в пластине с помощью прибора для измерения шероховатости Surftest Sj-410 и измерительного наконечника – щупа для ультрамалых отверстий.Значение шероховатости обработанных поверхностей отверстий, обработанных с помощью алмазного подковообразного сверла диаметром 1 мм, составило от Ra 1,233 до Ra 1,094 мкм.

2. **Сверло перфорированное алмазное** диаметром 2,2 мм, из порошка синтетических алмазов АС6 зернистостью 80/63, с относительной концентрацией алмазов 100, на металлической связке МЭ. Эскиз сверла перфорированного трубчатого представлен на рис. 2.

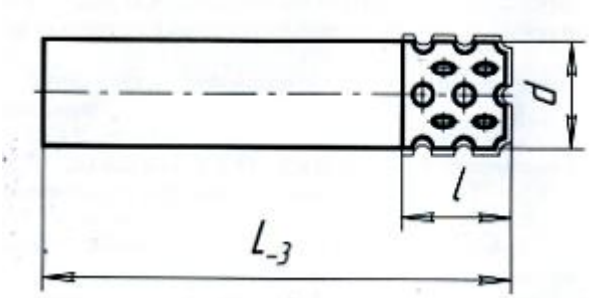


Рис. 2 Эскиз сверла перфорированного трубчатого (L=40 мм, l=6-8 мм).

Работоспособность таких сверл повышена за счет перфорации. Алмазные зерна располагаются при этом не только по внутренней и наружной цилиндрическим и торцевой поверхностям, но и в отверстиях перфорации. Поэтому, даже после износа алмазоносной поверхности на торце сверло сохраняет работоспособность, так как в работу вступают алмазные зерна, находящиеся в перфорации [3].

Для определения оптимального диаметра рабочей части сверла было опробовано сверло диаметром 2,2 мм. Результаты измерений действительных размеров отверстий, размеров и количества сколов в обработанных пластинах приведены в табл. 2. Измерения размеров отверстий и сколов производились на инструментальном микроскопе ИМЦ 100×50,А.

Таблица 2.

Результаты измерений отверстий, обработанных алмазными перфорированными трубчатыми сверлами

№	Размер рабочей части инструмента, мм	Размердиаметра отверстия на входе/выходе инструмента, мм	Максимальный размер и количество сколов на входе/выходе инструмента	Количество отверстий, обработанных одним инструментом
1	2,22	2,35…2,37/2,24…2,25	0,1 мм, 3 скола	8
2	2,2	2,31…2,32/2,22…2,23		5

Анализируя полученные результаты, приведенные в табл. 2, можно отметить, что с помощью одного сверла можно выполнять сквозные отверстия с точностью не ниже 14 квалитета.

3. Сверло с алмазным покрытием UDCMX производства «UNION TOOL» (Япония), эскиз которого представлен на рис. 3.

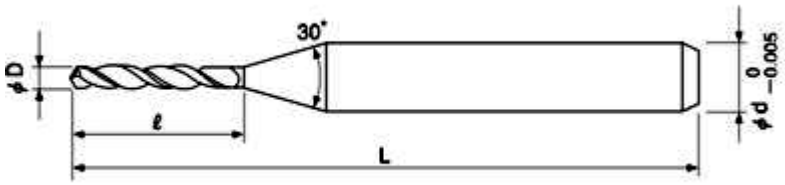


Рис. 3. Эскиз сверла с алмазным покрытием UDCMX (L=38 мм, l=8-10 мм).

Нанесение инновационных покрытий на режущий инструмент существенно повышает работоспособность инструмента и расширяет область его эффективного применения. Представителями сверл нового поколения можно назвать сверла производства «UNION TOOL» (Япония).

В процессе экспериментальных работ было опробовано сверло UDCMX диаметром 1 мм. Одним сверлом было выполнено 270 отверстий в керамической пластине толщиной

5 мм. Результаты измерений действительных размеров отверстий, обработанных с помощью одного сверла UDCMX диаметром 1 мм. представлены в табл 3. Измерения размеров отверстий и сколов производились на инструментальном микроскопе ИМЦ 100×50,А.

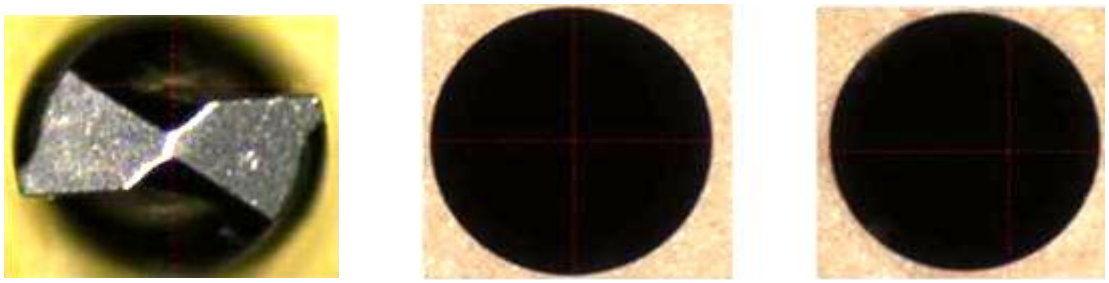
Таблица 3.

Результаты измерений отверстий, обработанных сверлами салмазным покрытием UDCMX

№отв.	Размердиаметра отверстия на входе инструмента, мм	Размердиаметра отверстия на выходе инструмента, мм	Максимальный размер и количество сколов на входе/выходе инструмента
1	1,01…1,01	0,99…0,99	-
2	1,01…1,01	0,99…1,01	-
3	1,01…1,01	0,99…0,99	-
4	1,01…1,01	0,99…0,99	-
5	1,01…1,01	0,99…0,99	-
20	1,00…1,01	0,99…0,99	-
50	1,00…1,01	0,99…0,99	-
100	1,00…1,01	0,99…0,99	-/менее 0,05 мм, 1 шт
150	1,00…1,01	0,99…0,99	-
200	1,00…1,01	0,99…0,99	-/менее 0,1 мм, 1 шт
250	1,00…1,01	0,98…0,99	-
270	1,00…1,01	0,98…0,99	-

Анализируя полученные результаты, приведенные в табл. 3, можно отметить, что с помощью сверл UDCMX можно выполнять сквозные отверстия с точностью не ниже 10 квалитета с высокой стойкостью инструмента в процессе обработки, и рекомендовать применять сверла UDCMX для сверления отверстий в керамических пластинах и в деталях из корундовой керамики. Следует отметить, что при осмотре режущей части сверла после обработки 270 отверстий видимого износа не обнаружено.

На рис. 4 представлен процесс выхода сверла UDCMX 2100-100 при сверлении одного из отверстий в керамической пластине и внешний вид обработанных отверстий на входе (рис. 4 б) и выходе сверла (рис. 4 в).



а) б) в)

Рис. 4. Внешний вид обработанных отверстийна входе и выходе сверла: а) фотография выхода сверла UDCMX 2100-100 при обработке отверстия;б) отверстие на входе сверла; в) отверстие на выходе сверла

Необходимо отметить, что стоимость сверл UDCMX составляет от 123,0 до 357,0 €, стоимость сверла алмазного подковообразного – ~ 370 руб.

Экспериментальные данные по видам обработки различными типами сверл представлены в табл.4.

Таблица 4

Экспериментальные данные по видам обработки

Вид алмазной обработки	Время обработки сверлом Ø 1 мм, в пластине толщиной 5 мм, мин	Количество обработанных отверстий одним инструментом,шт	Конусность	Стоимость сверла/ перенесенная стоимость на изготовление 1 отверстия, руб
Обработка с применением алмазных подковообразных сверл	**4-6**	**6**	**15' (толщина пластины 5 мм) 12'(толщина пластины 2 мм)**	**~370/62**
Обработка с применением сверл UDCMX производства «UNION TOOL» (Япония)	**0,75**	**270**	**5' (толщина пластины 5 мм) 3' (толщина пластины 2 мм)**	**8600/32**

Из данных таблицы 4 видно, что перенесенная стоимостьодного сверла на обработку одного отверстия, примерно в 2 раза ниже для сверл UDCMX по сравнению с подковообразными сверлами.

Выводы

Применение сверл UDCMXпозволит выполнять отверстия с точностью не ниже 10 квалитета в пластинах из керамического материала «Кортим» и в деталях из корундовой керамики с точностью не ниже 10 квалитета. Применение сверл с алмазным покрытиемUDCMX производства «UNION TOOL» (Япония) повышает производительность труда и снижает затраты на закупку инструмента.

Библиографический список

1. Гудина, Т.Л., Применение керамического материала «Кортим» в конструкции микрополосковой антенны бортовой аппаратуры спутниковой навигации / Т.Л. Гудина, А.В. Кузнецов, Ю.А. Светлаков, И.П. Ярославцева // Материалы XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2016. – Нижний Новгород, НГТУ, 2016, С. 124.
1. Балыков, А.В. Повышение эффективности алмазного сверления отверстий / А.В. Балыков //. М., «Технология металлов», №10,2003, - С. 21-26.
2. Балыков, А.В. Алмазное сверление деталей из труднообрабатываемых неметаллических материалов /. А.В. Балыков, А.А. Цесарский // М.: Машиностроение, 1980. - 64 с.

N.V. Ageycheva, Yu.A. Svetlakov

THE DIAMOND TOOL FOR DRILLING OF APERTURES IN PLATES FOR RESONATORS OF MICROSTRIP AERIALS

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

Application of diamond drills for processing of apertures in resonators of microstrip aerials is considered. Results of researches of application of drills of a various kind are represented.

Keywords: diamond processing,alumina ceramic diamond tool.

УДК 621.396.61

Е.С. Балобанов, А.Н. Мочанов, М.М. Ивойлова

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ GaN-ТРАНЗИСТОРА ТИПА ПП9136А В БОРТОВОМ СВЧ-ПЕРЕДАТЧИКЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ С НЕПРЕРЫВНЫМИ ФМ-СИГНАЛАМИ

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Приведены результаты исследований усилителя мощности на перспективном нитрид-галлиевом полевом транзисторе типа ПП9136А. Показано, что переход на данный тип транзистора обеспечивает, по сравнению с кремниевым биполярным транзистором 2Т948Б, более высокие значения КПД и коэффициента усиления выходных каскадов бортовых СВЧ-передатчиков непрерывных ФМ-сигналов.

Ключевые слова: мощные транзисторы, усилители мощности, передатчики, телеметрия, ФМ-сигналы

Введение

Применение сигналов с непрерывными ФМ-сигналами позволяет существенно повысить пропускную способность бортовых систем телеметрии по отношению к системам, использующим импульсные сигналы. Изменение типа сигнала с импульсного на непрерывный ставит актуальную задачу обеспечения теплового режима бортовых передатчиков (ПРД), энергопотребление, габариты и масса которых, как правило, ограничены. Использование существующего импульсного ПРД в режиме излучения непрерывных ФМ-сигналов показало, что при продолжительном режиме работы ПРД его выходной каскад, выполненный на кремниевом биполярном транзисторе типа 2Т948Б, повышает температуру смежных каскадов до величин, близких к предельно-допустимым нормам их эксплуатации. Таким образом, перегрев ПРД вызван низкими экономичностью и усилением выходного каскада усилителя мощности (УМ), построенного на основе транзистора 2Т948Б.

В настоящем докладе рассмотрена возможность построения выходного УМ с более высокими КПД и коэффициентом усиления, выполненного на основе опытного нитрид-галлиевого полевого транзистора типа ПП9136А разработки АО «НИИЭТ» (г. Воронеж), приведены результаты экспериментальных исследований созданного с применением методов оптимизации параметров элементов согласующее-трансформирующих цепей макета УМ на транзисторе ПП9136А. Расчёт параметров макета УМ и их измерения проводились на частотах ~ 1 ГГц при заданной выходной мощности ≥ 6 Вт.

Особенности параметров GaN-транзистора типа ПП9136А

Полевой транзистор типа ПП9136А представляет собой результат последних разработок АО «НИИЭТ» в области создания мощных, экономичных и устойчивых к повышенной температуре GaN-транзисторов.

Значения основных электрических параметров транзистора типа ПП9136А на частоте 1 ГГц, измеренные на установке Load&Pull, приведены в табл. 1 [1].

Табл. 1. Основные электрические параметры транзистора типа ПП9136А

Power Sweep

Label:
1.00000 GHz
ZSource (Ohms) = 5.99 + j38.11
ZLoad (Ohms) = 32.00 + j28.00

Pin dBm	Gt dB	Pout w Watts	Refl log dB	Drain_eff %	I_out mA
-2.00	33.1977	1.3176	-0.302	29.0384	162.000
-1.00	33.263	1.6839	-0.2569	33.032	182.000
0.00	33.2851	2.1307	-0.2512	37.660	202.000
1.00	33.1898	2.6241	-0.2572	41.6406	225.000
2.00	33.0543	3.2021	-0.3158	46.0978	248.000
3.00	32.7994	3.8013	-0.4827	50.0806	271.000
4.00	32.4951	4.4618	-0.6315	54.1829	294.000
5.00	32.1145	5.1458	-0.7687	57.7732	318.000
6.00	31.6432	5.8119	-0.9524	61.0301	340.000
7.00	31.0821	6.4299	-1.172	63.416	362.000
7.50	30.7651	6.7067	-1.3025	64.716	370.000
8.00	30.4126	6.9384	-1.4391	65.3635	379.000
8.50	30.062	7.1812	-1.538	66.2506	387.000
9.00	29.6944	7.4036	-1.6772	67.0889	394.000
9.50	29.311	7.6051	-1.7825	67.7136	401.000
10.00	28.9167	7.7923	-1.8418	68.3555	407.000
10.50	28.4542	7.860	-2.2345	68.7805	408.000
11.00	27.9632	7.8762	-2.9462	68.9222	408.000
11.50	27.4711	7.8906	-3.8172	68.8794	409.000
12.00	26.9786	7.9043	-4.7616	68.9989	409.000
13.00	25.9938	7.9319	-6.8451	68.9031	411.000

Как следует из табл. 1, на частоте 1 ГГц данный тип транзистора отличается высокими значениями коэффициента усиления (до 30 дБ) и КПД (до 67%). Особенностью является также его большой диапазон значений входной мощности (от 1 мВт до 50 мВт), при которых транзистор сохраняет приемлемые КПД и коэффициент усиления.

Предельно-допустимые значения электрических режимов эксплуатации транзистора типа ПП9136А приведены в табл. 2.

Табл. 2. Предельно-допустимые значения электрических режимов эксплуатации транзистора типа ПП9136А

Параметр	Обозначение параметра	Значение параметра	Единица измерения
Максимально допустимый постоянный ток стока	Iс макс	1,0	А
Максимально допустимый прямой ток затвора	Iз (пр) макс	2,0	мА
Максимально допустимое постоянное напряжение сток-исток	Uси макс	130*	В
Напряжение затвор-исток	Uзи	-10 до +2	В
Максимально допустимая температура перехода	tп макс	225	°С
Диапазон рабочих температур		-60 до +125	°С

Как следует из табл. 2, особенностью транзистора типа ПП9136А является стойкость к повышенной рабочей температуре (до + 125º), а также запасы по величине тока стока Ic и напряжения на переходах Uси, Uзи, расширяющие возможности выбора режима работы данного типа транзистора при использовании его в составе УМ.

Расчёт и оптимизация принципиальной схемы макета УМ на основе транзистора типа ПП9136А

Расчёт электрической схемы макета УМ проводился с использованием данных табл. 1 при учёте ограничений, приведённых в табл. 2.

Выбор схем входной и выходной согласующе-трансформирующих цепей (СТЦ) УМ осуществлялся в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [2]. Параметры элементов СТЦ оптимизировались методами моделирования с применением пакета ПО Microwave Office, при этом в качестве исходных данных использовались значения S-параметров транзистора ПП9136А [1]. В результате проведённых расчётов и моделирования была предложена схема УМ с двухзвенным согласующим трансформатором во входной и выходной СТЦ.

Принципиальная схема макета УМ на основе транзистора ПП9136А приведена на рис. 1.

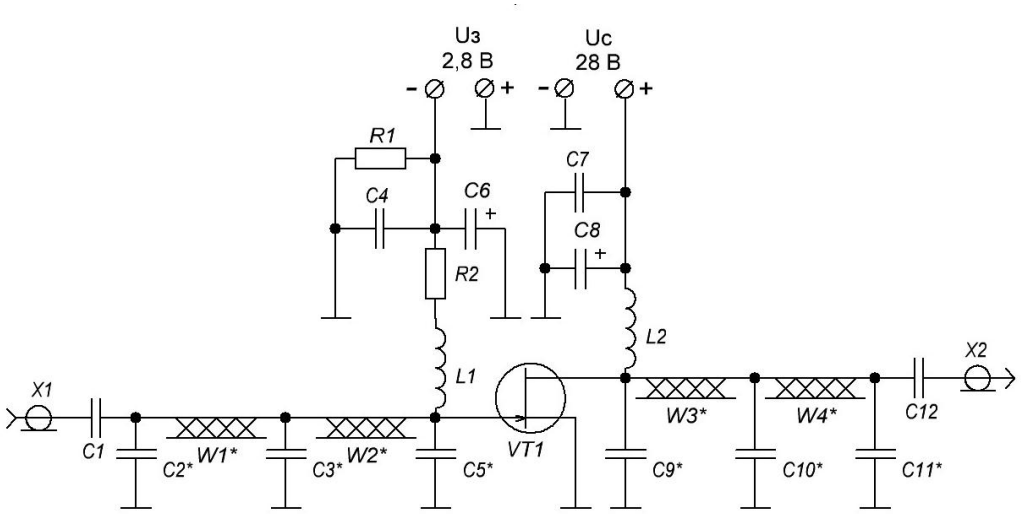


Рис. 1. Принципиальная схема макета УМ на основе транзистора ПП9136А

Особенностью принципиальной схемы УМ, приведённой на рис. 1, является включение транзистора VT1 по схеме с общим истоком, при этом смещение на затворе $U_З$ = -2,8 В обеспечивало режим работы транзистора, близкий к классу В.

Экспериментальные исследования макета УМ на основе транзистора типа ПП9136А

Для проведения экспериментальных исследований, в соответствии с принципиальной схемой, приведённой на рис. 1, был изготовлен макет УМ на транзисторе ПП9136А. Входная СТЦ (С2, W1, С3, W2, С5) и выходная СТЦ (С9, W3, С10, W4, С11) выполнялись в микрополосковом исполнении, развязка по цепям питания стока и затвора от смежных каскадов осуществлялась емкостями С1, С12. Цепи L1, R2, C4, C6, R1 и L2, C7, C8 обеспечивали подачу напряжения питания соответственно на затвор $U_З$ и сток $U_С$ транзистора VT1.

Амплитудная характеристика макета УМ на частоте 1 ГГц при $U_С$ = 28 В приведена на рис. 2.

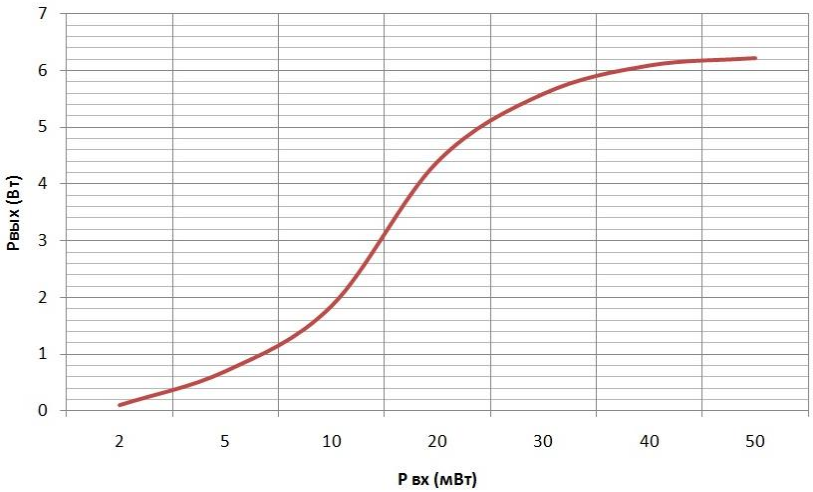


Рис. 2. Амплитудная характеристика макета УМ на частоте 1 ГГц при U_C = 28 В

Как видно на графике, приведённом на рис. 2, уровень выходной мощности $P_{ВЫХ}$ = 6 Вт достигается при входной мощности $P_{ВХ} \approx 30$ мВт, т.е. коэффициент усиления $K_P \geq 23$ дБ. КПД (по стоку транзистора ПП9136А) в данном режиме работы составляет не менее 55%.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) макета УМ при U_C = 28 В приведена на рис. 3.

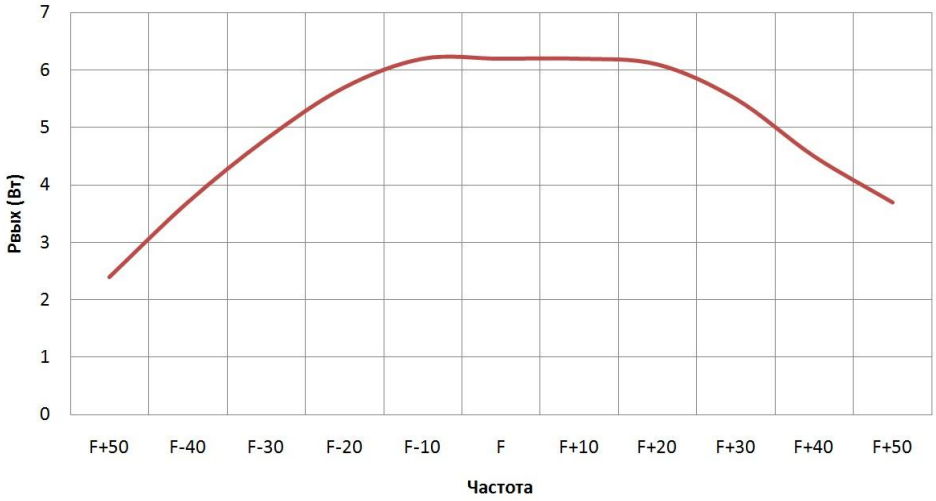


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика макета УМ при U_C = 28 В

Как видно на графике, приведенном на рис. 3, полоса усиливаемых частот по уровню минус 1 дБ составляет не менее 60 МГц, при этом АЧХ имеет плоскую часть в области рабочей частоты 1 ГГц не менее 30 МГц.

В табл. 3 приведена зависимость параметров макета УМ от изменения уровня напряжения питания стока Uc при Uз = -2,8 В и входной мощности $P_{вх}$= 50 мВт.

Табл. 3. Зависимость параметров макета УМ от напряжения питания Uc

U_c , В	20	22	24	26	28
$P_{вых}$, Вт	4,1	4,7	5,2	5,8	6,3
$I_{пот}$, А	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41
$P_{пот}$, Вт	6,6	7,7	8,9	10,1	11,5
КПД, %	62	61	58	57	55
$K_п$, дБ	19,1	19,7	20,2	20,6	21,0

Из табл. 3 следует, что при изменении напряжения стока Uc от 20 В до 28 В выходная мощность изменяется не более чем на 2 дБ, коэффициент усиления $К_п$ составляет 19-21 дБ, КПД находится в пределах 62-55 %.

Сравнительный анализ полученных результатов и типовых характеристик выходного каскада ПРД на транзисторе 2Т948Б (Кр ≈ 10 дБ, КПД ≤ 30%) показывает преимущества разработанного макета УМ на транзисторе ПП9136А по энергетическим характеристикам и коэффициенту усиления (Кр ≥ 20 дБ, КПД ≥ 50%).

Заключение

Проведённые экспериментальные исследования макета усилителя мощности на транзисторе ПП9136А показали, что по коэффициенту усиления и КПД он превосходит усилитель мощности на серийном транзисторе 2Т948Б и может быть использован в качестве основы при разработке выходных каскадов усилителей мощности бортовых ПРД систем телеметрии с непрерывными ФМ-сигналами.

Ввиду более высокого коэффициента усиления УМ на транзисторе ПП9136А количество усилительных каскадов в ПРД может быть сокращено, что приведёт к повышению общего КПД ПРД и улучшению его массогабаритных характеристик.

Библиографический список

1. НИИЭТ [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: http://niiet.ru/goods/tranzmod/gan-development (дата обращения: 31.01.2018).

2. Широкополосные радиопередающие устройства / под ред. д.т.н. О.В. Алексеева. – М.: Связь, 1978. – 302 с.

E.S. Balobanov, A.N. Mochanov, M.M. Ivoylova,

FEASIBILITY RESEARCH OF THE GaN-TRANZISTORA TYPE PP9136A IN ONBOARD MICROWAVE TRANSMITTER OF TELEMETRY SYSTEM WITH CONTINUOUS PHASE-SHIFT 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"

The studies results of a power amplifier on a perspective nitride-gallium field transistor type PP9136A are presented. It is shown that the transition to this type of transistor provides, in comparison with the silicon bipolar transistor type 2T948B, a higher efficiency and a gain factor for the output stages of on-board microwave transmitters of continuous phase-shift signals.

Keywords: powerful transistors, power amplifiers, transmitters, telemetry, phase-shift signal

УДК 621.372.413

Ю.Г. Белов[1], В.В. Бирюков[1], И.А. Егоров[2]

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКА ЛАМИНАТОВ НА СВЧ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[1]
НПП «Полёт»[2]

Рассмотрены методы измерения параметров диэлектрических материалов фольгированных пластин. Показано, что для «неразрушающих измерений» (т.е. без удаления металлической фольги с диэлектрической пластины) может быть использован метод, основанный на возбуждении в прямоугольной пластине, рассматриваемой как резонатор, электромагнитных колебаний, измерении их резонансных частот и добротности, определении относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь по результатам измерений. Приведены соответствующие расчетные соотношения, полученные в предположении «магнитных стенок» на торцах пластины. Представлены результаты измерений.

Ключевые слова: фольгированная диэлектрическая пластина, резонансная частота, добротность, параметры диэлектрика, результаты измерений.

Для изготовления плат и микросхем СВЧ применяются ламинаты – диэлектрические пластины, покрытые с одной или двух сторон медной фольгой. На предприятиях, связанных с производством радиоэлектронной аппаратуры, особое внимание уделяется входному контролю ламинатов, позволяющему выявить отклонение параметров диэлектрика от заявленных производителем номинальных значений. В частности, это касается относительной диэлектрической проницаемости ε_r и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ. Точное и достоверное знание указанных параметров необходимо [1] при проектировании и производстве устройств на печатных платах.

Большинство современных методов позволяющих определить значения ε_r и tgδ, являются «разрушающими»[2-4], т.е. перед измерением с образца необходимо удалить металлический слой. Следует отметить, что данные методы обеспечивают высокую точность при измерении параметров диэлектрика, но вместе с тем усложняют процесс предъявления рекламаций фирмам-производителям. Для упрощения процедуры предъявления рекламаций целесообразно применять «неразрушающие» методы контроля. Наиболее простым из них является метод, применяющийся на сравнительно низких частотах. Он основан на рассмотрении металлизированной диэлектрической пластины как плоского конденсатора, измерении его емкости и последующего вычисления ε_r.

Наибольший интерес представляет так называемый метод «целого листа» [5], являющийся также, как и описанный выше,«неразрушающим». Он основан на рассмотрении металлизированной пластины в качестве резонатора и возбуждении в нем электромагнитных колебаний, измерении их резонансных частот и последующем вычислении из результатов измерения ε_r. Данный метод широко применяется для контроля параметров металлизированных пластин, предназначенных для изготовления схем ОВЧ- и УВЧ-диапазонов, и стандартизирован в США как IPC-TM-650-2.5.5.6[6]. В примечаниях к стандарту указано, что данный метод не рекомендуется для определения tgδ диэлектрика по измеренному значению добротности колебаний из-за отсутствия возможности учесть потери на излучение со стороны неметаллизированных торцов пластины.

Авторами данной статьи был проведен ряд экспериментов по определению ε_r и tgδ различных металлизированных пластин с цельюпоказать возможность применения методики [5,6] для определения не только ε_r, но itgδ диэлектриков ламинированных пластин.Важнейшим предположением, используемым в указанной методике, является отсутствие излучения со стороны торцов пластины в силу её малой толщины.Это предположение позволяет считать, что на торцах выполняются граничные условия типа «магнитной» стенки [5]

$$H_\tau\Big|_{S_{\text{торц}}} = 0. \quad (1)$$

С использованием граничного условия (1) в работе [5] получено выражение для резонансных частотколебаний в пластине:

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\left(\frac{\pi N}{L}\right)^2 + \left(\frac{\pi M}{W}\right)^2}{\varepsilon_r}}, \quad (2)$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ - скорость света в свободном пространстве; $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}\frac{\Phi}{\text{м}}$; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$;$L$ иW, соответственно, длина и ширина пластины;N= 0,1,2, …M = 1,2,3,…–число полуволновых осцилляций поля вдоль указанных сторон пластины (индексы колебания).

Расчет добротности резонатораQ_0 производился в [5] методом возмущений с учетом потерь в диэлектрике пластины и слоях металлизации. Выражение для добротности имеет вид:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_\text{д}} + \frac{1}{Q_\text{м}}, \quad (3)$$

где $Q_\text{д}$ = 1/tgδ– составляющая добротности резонатора, обусловленная потерями в диэлектрике;

$$Q_\text{м} = \pi d\sqrt{120\sigma f_{\text{рез}}/c} \quad (4)$$

– составляющая добротности, обусловленная потерями в металле. В (4)обозначено: d–толщина пластины;σ– проводимость металла.

Формула (2) позволяет определить относительную диэлектрическую проницаемость материала пластины ε_r по измеренному значению резонансной частоты колебания $f_{\text{рез}}^{M,N}$:

$$\varepsilon_r = \frac{\left(\frac{\pi N}{L}\right)^2 + \left(\frac{\pi M}{W}\right)^2}{\left(2\pi f_{\text{рез}}^{M,N}/c\right)^2}, \quad (5)$$

а формула (3) – определить tgδ диэлектрика пластины по измеренному значению добротности Q_0этого колебания:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_\text{м}}. \quad (6)$$

Для проведения измерений ламинированная пластина закреплялась на металлическом основании, на котором были размещены штыревые элементы возбуждения, связанные с коаксиальными разъемами. Конструкция основания с узлом возбуждения показана на рис.1. При закреплении пластины на основании обеспечивался надежный электрический контакт с ним нижнего слоя металлизации.

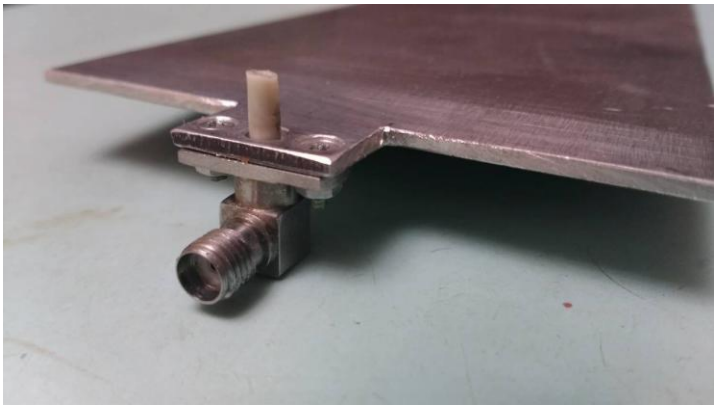


Рисунок 1 – Металлическое основание с узлом возбуждения

Измерение резонансных частот и добротности колебаний производилось по схеме «на проход» (рис.2). Используя высокую чувствительность векторного анализатора, измерения производились при возможной малой связи резонатора (металлизированной пластины) с измерительной цепью, т.е. при максимально большом удалении штыревых возбудителей от торцов пластины. Это позволило максимально

снизить влияние элементов связи на измеряемую добротность колебаний и считать эту добротность близкой к собственной: $Q_{изм} \approx Q_0$.

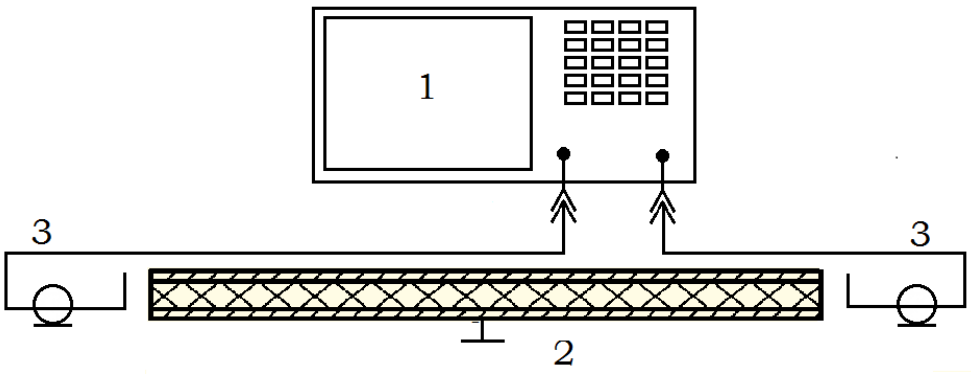


Рисунок 2 – Измерительная установка (1 – векторный анализатор цепей AgilentTechnologiesE5062A; 2 – металлическое основание с исследуемым образцом; 3 – входной и выходной элементы связи)

Измерения производились для четырех образцов металлизированных пластин из различных диэлектриковв диапазоне частот 200 . . . 1000 МГц. Размеры образцов и материалы диэлектриков указаны в табл.1. Для примера на рис.3 показано для образца №1семейство резонансных кривых, соответствующих разным типам колебаний в этом образце, а на рис.4 – выделенная резонансная кривая одного из колебаний, по которой определялась его добротность:

$$Q_{\text{изм}} = \frac{f_{\text{рез}}}{2\Delta f}, \qquad (7)$$

где $f_{\text{рез}}$ – резонансная частота, $2\Delta f$ – ширина полосы пропускания резонатора на уровне – 3дБ. Измеренные значения резонансных частот представлены в табл.1.

Идентификация типа колебания (определение индексов M иN) производилась путем перемещения локального короткозамыкателя (в виде узкой полоски фольги) вдоль краев пластины. При попадании короткозамыкателя в пучность электрического поля добротность колебания резко падает, что фиксируется по уменьшению высоты резонансной кривой на экране измерителя. Количество пучностейN' на стороне с размером L определяет индекс $N=N'-1$, а количествоM' – на стороне с размером W – индекс $M=M'-1$. Если при перемещении короткозамыкателя вдоль края пластины высота резонансной кривой не изменяется, то индекс колебания по соответствующей стороне равен нулю.

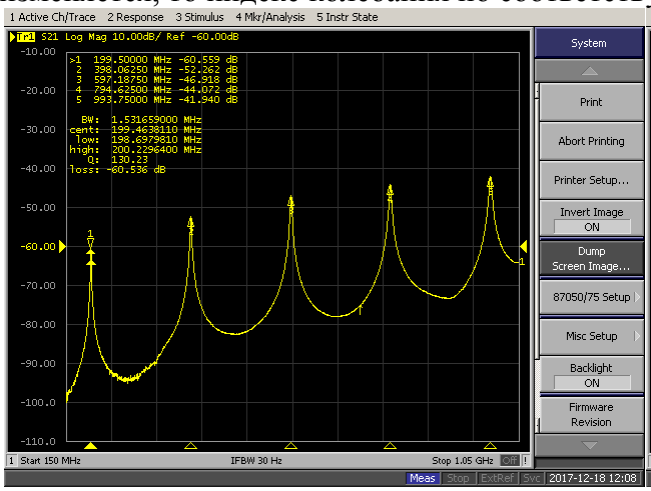


Рисунок 3 – Семейство резонансных кривых для образца №1

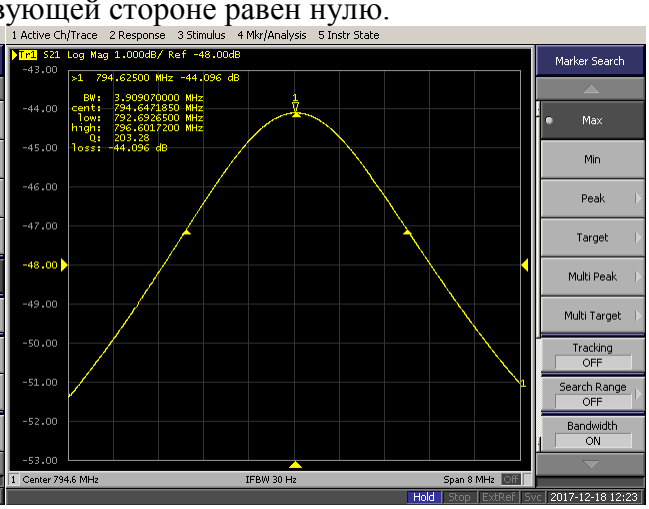


Рисунок 4 – Резонансная кривая при$f_{\text{рез}}$=794,65 МГц для образца №1

Для уверенной фиксации резонансной кривой некоторого колебания и точного измерения его характеристик необходимо, чтобы соседние колебания были отстроены по частоте не менее чем на 10% от выбранного. В противном случае из-за наложения резонансных кривых резонансная частота и добротность исследуемого колебания будут измерены со значительной погрешностью. Такой результат измерений нецелесообразно использовать для дальнейшей обработки и необходимо исключить.

Для определения ε_r и tgδ данные, полученные экспериментально, подставлялись в формулы (5) и (6). При этом предполагалось, что $Q_{изм} = Q_0$. При вычислении $Q_м$ по формуле (4) использовалось [7] значение проводимости медной фольги $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^7 \frac{\text{См}}{\text{м}}$.Результаты расчетов приведены в табл.1.

Таблица 1 – Результаты измерений.

Наименование образца	$f_{рез}$, МГц	Q_o	Размеры образца, мм			Индексы колебаний *N, M*	ε_r	*tg* δ
			L	*W*	*d*			
Arlon (Образец№1)	199,47	135,7	233,2	90,5	1,27	1 , 0	10,39	0,0037
	398,14	157,8				2 , 0	10,44	0,0037
	597,29	197,9				3 , 0	10,43	0,0029
	794,63	203,8				4 , 0	10,48	0,0031
	993,78	204,7				5 , 0	10,47	0,0032
Arlon (Образец№2)	199,01	130,2	233	89,8	1,27	1 , 0	10,46	0,004
	397,84	152,8				2 , 0	10,47	0,0039
	598,46	196,1				3 , 0	10,41	0,0029
	795,97	197,1				4 , 0	10,47	0,0032
	995,13	202,5				5 , 0	10,46	0,0033
Флан (Образец№3)	213,05	138,1	233,6	91,1	1,2	1 , 0	9,08	0,0054
	427,13	150,9				2 , 0	9,04	0,0041
	640,85	188,8				3 , 0	9,04	0,0032
	854,76	180,3				4 , 0	9,03	0,0038
Стеклотестолит (Образец№4)	315,86	39,1	232	64	2,05	1 , 0	4,19	0,024
	635,59	39,3				2 , 0	4,13	0,024
	950,82	38,5				3 , 0	4,16	0,025

Таблица 2 – Сравнение полученных результатов с значениями, заявленными производителями

	Измеренные значения		Номинальные значения	
	$\varepsilon_{rср}$.	$tg\delta_{ср}$	ε_r	tg δ
Arlon AD1000 (Образец №1)	10,442	0,00332	10,6±0,35	0,0023
ArlonAD1000 (Образец №2)	10,454	0,00346	10,6±0,35	0,0023
Флан 10 (Образец №3)	9,046	0,00413	10±0,8	0,0045
Стеклотекстолит FR4 (Образец №4)	4,16	0,0243	4.5(<5.5)	0.017(<0.035)

В табл.2 приведено сравнение результатов измерений (усредненные данные табл.1) с номинальными значениями параметров материалов, т.е. значениями, заявленными производителями [2,8,9]. Как и следовало ожидать, параметр ε_r определяется с высокой

точностью. Значения tgδ для образцов №3 и №4 находятся в хорошем соответствии с номинальными, а для образцов №1 и №2 различие составляет около 50%. Однако следует указать что такая погрешность при определении tgδ считается допустимой, т.к. на величину добротности значительное влияние оказывают факторы, трудно поддающиеся учету(наличие клеевого слоя между диэлектриком и фольгой, отличие проводимости медной фольги от справочного значения и др.). Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная методика может быть рекомендована для оперативного контроля параметров ламинированных диэлектрических пластин.

Библиографический список

1. Богданов, Ю. Фольгированные диэлектрики – как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ- диапазонов. Часть 1 / Ю. Богданов, В. Кочемасов, Е. Хасянова // Печатный монтаж. – 2013. – №2. – С. 156 – 168.
2. Зайцев, А.Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А.Н. Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240с.
3. Егоров, В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ (обзор) / В.Н. Егоров //Приборы и техника эксперимента. – 2007. – №2. – С. 5–38.
4. ГОСТ Р 8.623 – 2006. ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики выполнения измерений в диапазоне сверхвысоких частот.
5. Белов, Ю.Г. Исследование электромагнитных колебаний в резонаторе, образованном диэлектрической пластиной с двухсторонней металлизацией / Ю.Г. Белов, Б.И. Ворошилов, В.А. Малахов, И.А. Нефедьев //Труды НГТУ. – 2015. – №1. – С. 35–41.
6. IPC–TM–650. Standard Test Methods // http: ulstandards.ul.com
7. Малорацкий, Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л.Г. Малорацкий – М.: Изд-во «Советское радио», 1976. – 216с.
8. НТО "АЛЬВИС"– Производство капролона различных марок и любых форм // http://www.kaprolon-alvis.ru
9. Научно – производственное предприятие «Электроресурс» // http://kast-b.ru

Yu.G.Belov[1], V.V.Birukov[1], I.A. Egorov[2]

MEASUREMENT OF PARAMETERS OF DIELECTRIC MATERIALS OF A FOILED PLATE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev, N. Novgorod[1]
AO “NPP “Polet”, N. Novgorod[2]

Methods of measurement of parameters of dielectric materials of a foiled plate are considered. It is shown that for “nondestructive measurements” (i.e. without deleting a metal foil from a dielectric plate) the method based on excitation in the regular plate considered as the resonator, electromagnetic oscillations, measurement of their resonance frequencies and determination of the ε_r andtgδby result of measurements can be used. The appropriate estimated ratios received in an assumption of “magnetic walls” at plate end faces are given. Measurement results are presented.

Keywords: foiled dielectric plate, resonance frequency, Q-factor, parameters of dielectric, measurement results.

УДК 621.396.677.833.2

В.В. Щербаков, Н.Д. Булыгин

РАЗРАБОТКА ОБЛУЧАТЕЛЯ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты моделирования и расчета параметров облучателей для антенны Кассегрена, работающей в терагерцовом диапазоне. Были рассчитаны различные виды облучателей: конический, пирамидальный, рупор Поттера, гофрированный конический рупор. Моделирование производилось в диапазоне 200-220 ГГЦ. Был рассчитан рупор, который имеет полную симметрию диаграммы направленности в *E*- и *H*-плоскостях, и обладает низким уровнем боковых лепестков, что позволило существенно улучшить характеристики самой антенны.

Ключевые слова: облучатель, антенна Кассегрена, терагерцовый диапазон, моделирование, САПР, CST Studio Suite.

В современных телекоммуникационных системах беспроводной связи находят широкое применение антенны с высоким значением коэффициента усиления, например, двухзеркальные антенны Кассегрена. В качестве облучателей в этих антеннах обычно используются рупорные гибридные излучатели с высоким коэффициентом использования апертуры и низким уровнем кросс-поляризации. Такое использование рупорного облучателя обычно требует тщательного анализа и оптимизации параметров рупора для основного и высших типов волн. Несмотря на то, что существует много различных способов для расчета рупорных антенн, синтез и оптимизация широкополосных высоконаправленных рупоров с малым уровнем паразитной поляризации все еще представляет собой сложную задачу. Рупорные антенны являются простейшими антеннами СВЧ-диапазона. При разработке таких антенн одной из основных задач является получение симметричной диаграммы направленности облучателя в *E*- и *H*-плоскостях.

В классических ДЗА форма ДН облучателя, обычно рупора, во многом определяет характеристики всей антенны. При этом важны как форма основного лепестка в секторе облучения малого зеркала, так и крутизна ДН и уровень боковых лепестков (УБЛ) вне этого сектора. Высокий результирующий КИП при минимальном уровне бокового излучения в ДН антенны получается в том случае, когда распределение амплитуд в раскрыве антенны близко к равномерному с быстрым спадом поля у его краев. При этом каждой данной форме ДН облучателя соответствует свой определенный угол раскрыва параболоида, при котором произведение оказывается максимальным.

Степень подъема поля у краев малого зеркала при $\varphi = \varphi_0$ определяется в основном значением угла раскрыва параболоида. Чем более короткофокусной является антенна, тем больше должна быть величина соответствующего максимума ДН облучателя.

Минимальный уровень бокового излучения облучателя обеспечит минимальную утечку энергии облучателя через плоскость раскрыва и соответственно малый уровень излучения в ДН антенны.

Целесообразной является такая форма ДН облучателя, которая получается наиболее естественным путем в обычно используемых рупорных излучателях. Поле максимально в главном направлении и круто спадает в стороны от него при минимальной утечке вне сектора облучения малого зеркала.

Можно отметить следующую общую закономерность: чем более широкоугольной является ДН рупора, тем для более короткофокусных антенных систем данный рупор оказывается оптимальным.

В подавляющем большинстве случаев в качестве облучателей ДЗА используются рупорные антенны и их модификации, так как они наиболее просты конструктивно, хорошо согласуются с питающим волноводом, просто позволяют осуществить одновременную работу на двух линейных или вращающихся поляризациях, имеют четко выраженное положение фазового центра, позволяют пропускать сигналы большой мощности, обладают широким рабочим диапазоном. Наибольшее распространение получили ДЗА с пирамидальными и коническими рупорными облучателями.

Достаточную в ряде случаев симметрию ДН в плоскостях Е и Н при низком уровне бокового излучения и хорошем согласовании с питающим волноводом можно получить в синфазных рупорных излучателях с периодической зубчатой структурой кромки. Высота зубцов берется порядка длины волны, ширина - порядка половины длины волны. В синфазных рупорах небольшой размер излучающего раскрыва служит источником рассогласования со свободным пространством. Уменьшить влияние этого эффекта можно путем расфазирования кромки рупора по отношению к волновому фронту падающей волны. Симметрирование ДН в синфазном рупоре может быть достигнуто установкой вдоль его оси диэлектрического стержня, концентрирующего энергию поля вблизи оси рупора и ослабляющего - у стенок.

Одним из способов обеспечения осесимметричной формы ДН рупорных антенн является выполнение стенок рупора гофрированными с определенной глубиной гофра (канавки). В стенках рупора прорезается ряд концентрических четвертьволновых канавок с определенным расстоянием между ними.

Принцип действия такого рупора может быть пояснен следующим образом. Стенки рупора с достаточно густо прорезанными на них четвертьволновыми канавками имеют весьма большой импеданс для продольных поверхностных токов проводимости. Величина этих токов резко ослабляется по сравнению с продольными токами проводимости на стенках гладкого рупора той же геометрии. Резкое ослабление поверхностных продольных токов вызывает соответствующее ослабление не только тангенциального, но и нормального полей у стенок рупора.

Действительно, электрическому полю, нормальному стенкам, соответствуют электрические токи смещения, нормальные стенкам. Эти токи в силу закона непрерывности полного тока переходят у стенок в продольные поверхностные токи проводимости, а значит, ослабление продольного электрического тока неизбежно вызывает пропорциональное ослабление нормального стенкам тока смещения. Последнее, в свою очередь, имеет следствием ослабление вблизи стенок нормальной составляющей электрического поля в раскрыве рупора. При этом распределение амплитуд в раскрыве в плоскости E оказывается спадающим по направлению от центра раскрыва к его краям. Такой же характер, как известно, имеет распределение амплитуд поля волны H в плоскости H в рупоре. При близких законах спадания амплитуд полей в плоскостях E и H близкими окажутся и ДН рупора в этих плоскостях.

Задачей синтеза ДН с помощью рупоров с гофрированными стенками и является определение глубины d и шага канавок s, ведущих к такому же закону распределения амплитуд поля в плоскости E, как и закон распределения в плоскости H.

Рупор с канавками может быть выполнен для одновременной работы в нескольких диапазонах волн. Для этого необходимо глубину канавки выбирать такой, чтобы для средней частоты каждого диапазона была кратна нечетному числу четвертей длины наиболее коротк-кой волны.

Гофрированные рупоры имеют лучшие характеристики по полю кроссполяризации по сравнению с гладкими рупорами той же геометрии. Они обладают малой утечкой энергии вне области главного лепестка, стабильным и одинаковым положением фазового центра во всех плоскостях поля. Вследствие совокупности этих данных рупоры с гофрированными стенками являются эффективными облучателями для оптимизированных ДЗА [1].

Моделирование облучателей производилось в САПР CST MICROWAVE STUDIO, которая является программой для трехмерного электромагнитного моделирования СВЧ – структур произвольной формы, от волноводов до антенн. Программа позволяет решать задачи несколькими методами и дает большую точность расчета [2]. Также был использован САПР ANSYS HFSS, являющийся отраслевым стандартом программного обеспечения для численного электродинамического моделирования. Базовым алгоритмом в HFSS является метод конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке, реализованный в частотной области для расчета поведения электромагнитных полей на произвольной геометрии с заданными свойствами материалов [3].

Первым был рассчитан конический рупор. Результаты расчетов электрических параметров приведены на Рис. 1.

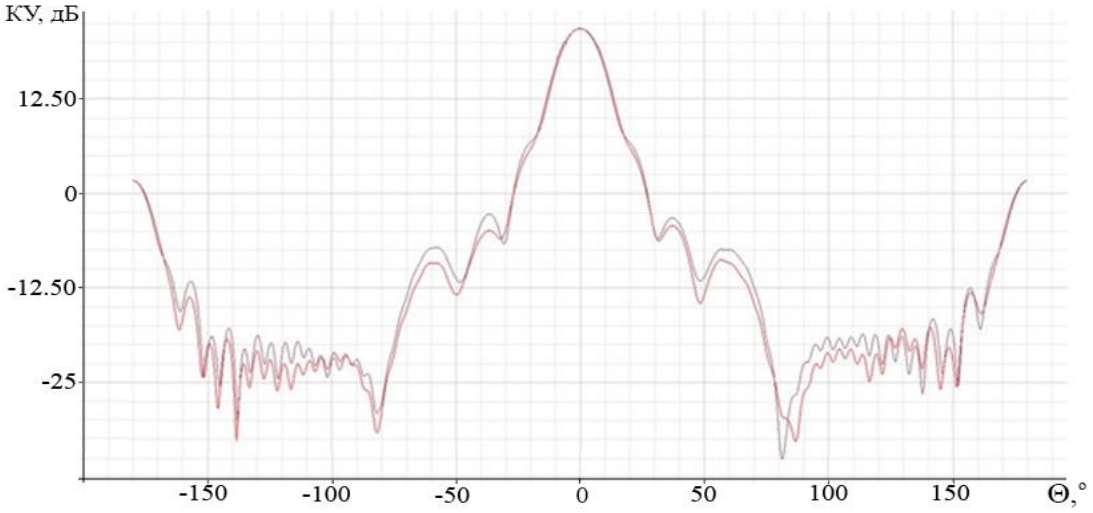


Рис. 1. Диаграмма направленности конического рупора

На рисунке представлена диаграмма направленности коэффициента усиления для Е- и Н-плоскостей. На рисунке видно, что ширина ДН в *E*- и *H*-плоскости практически одинакова, коэффициент усиления составляет порядка 21 дБ. КСВ данного рупора 1.0298. Ширина ДН по уровню половинной мощности $\theta_{0.5}$ 16.6°. Уровень боковых лепестков -24 дБ.

К преимуществам данного рупора можно отнести достаточно простую техническую реализацию. Но эта модель имеет достаточно большой уровень боковых лепестков.

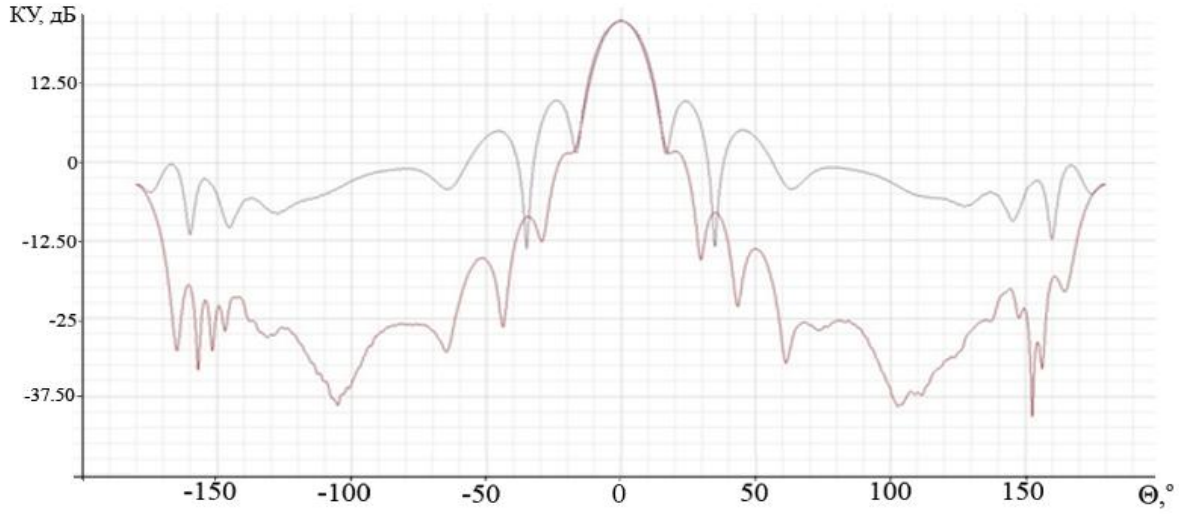


Рис. 2. Диаграмма направленности пирамидального рупора

Следующим был рассмотрен пирамидальный рупор. Результаты расчетов электрических параметров пирамидального рупора представлены на Рис. 2.

Далее рассчитывали рупор, выполненный по схеме Поттера. Рупор Поттера – многомодовый конический рупор с ослабленными боковыми лепестками ДНА. Результаты расчёта данного облучателя приведены на Рис. 3. Рупор Поттера представляет собой входной круглый волновод, согласующий переход, подавитель мод высших типов, секция фазовой подстройки и рупор.

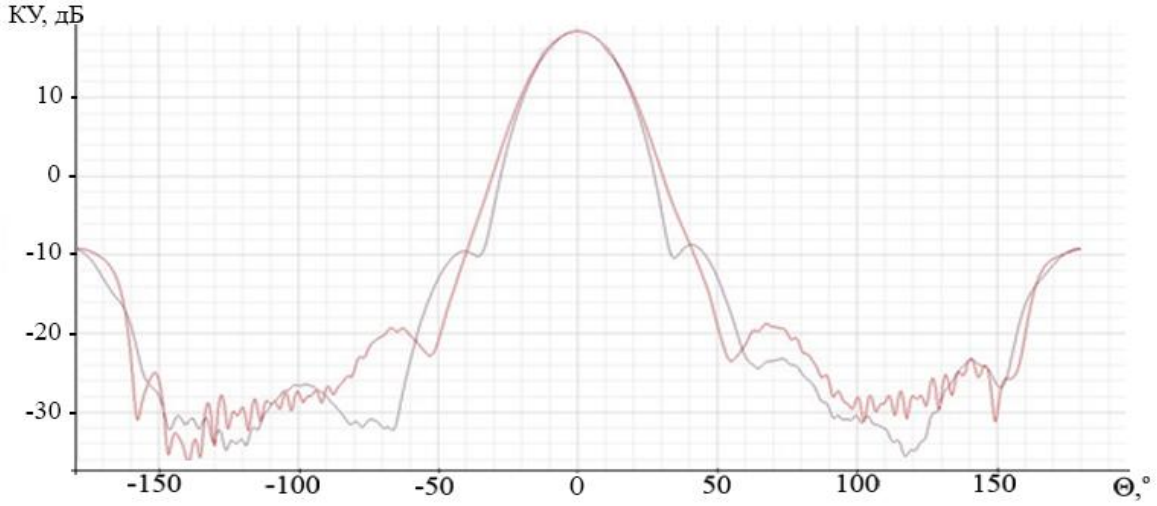


Рис. 3. Диаграмма направленности рупора Поттера

Как видно из рисунка, у рупора Поттера, действительно, низкий уровень боковых лепестков. УБЛ в *H*-плоскости -28 дБ, УБЛ в *E*-плоскости -40 дБ. Из рисунка также видно, что имеется несимметричность ДН в обеих плоскостях. Коэффициент усиления порядка 19 дБ. КСВ данного рупора 1.1299. Ширина ДН по уровню половинной мощности $\theta_{0.5}$ 23.4°. Также к недостаткам этого рупора можно отнести его очень сложную техническую реализацию.

Последним был рассчитан конический гофрированный рупор. Его моделирование из-за сложности конструкции и сложности вычислений производилось в САПР CST MICROWAVE STUDIO. 3D модель данного облучателя представлена на Рис. 4.

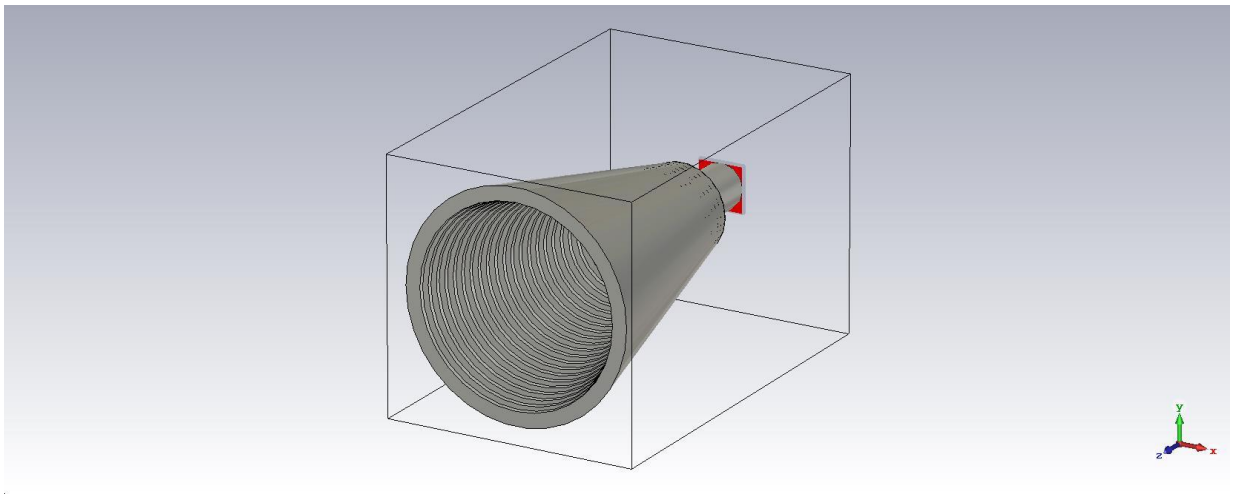


Рис. 4. Модель конического гофрированного рупора

Результаты расчетов приведены на Рис. 5.

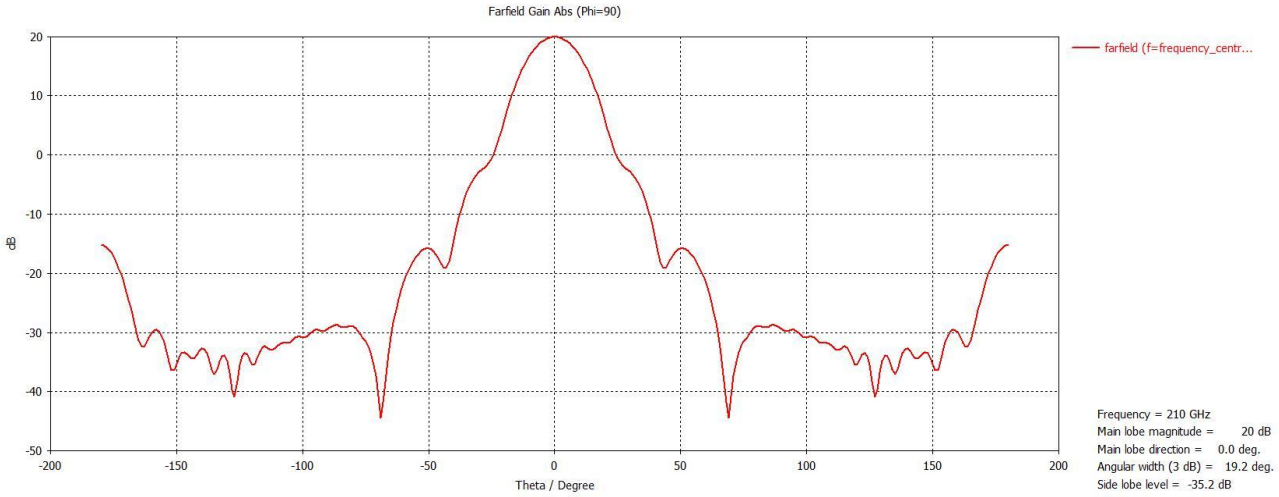


Рис. 5. Диаграмма направленности конического гофрированного рупора

В этой модели реализована полная симметрия ДН в *E* и *H* плоскостях. Данный рупор обладает самым низким уровнем боковых лепестков -35.2 дБ. Коэффициент усиления составляет 20 дБ.

Вывод

Была произведена работа по исследованию различных вариаций облучателей для антенны Кассегрена, работающей в диапазоне 200-220 ГГЦ. Рассчитывались такие характеристики, как коэффициент усиления, уровень боковых лепестков, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности. Данные расчетов были проанализированы и сведены в таблицу.

Таблица 1

Результаты расчетов облучателей

Название рупора	G, дБ	$\theta_{0,5}$,°	Уровень боковых лепестков, дБ	Сложность изготовления
Конический	21	16.6	-24	низкая
Пирамидальный	22	15.1	-12	средняя
Поттера	18	23.4	-18	высокая
Конический гофрированный	20	19.2	-35	высокая

В качестве облучателя для двухзеркальной антенны Кассегрена лучше всего подходит конический гофрированный рупор.

Библиографический список

1. **Заикин, И.П.** Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи / И.П. Заикин, А.В. Троцкий, С.К. Абрамов. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ≪ Харьк. авиац. ин – т ≫, 2006. – 90 с.
2. URL: https://www.cst.com.
3. URL: https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/electronics/hfss.

V.V. Sherbakov, N.D. Bulygin

DEVELOPMENT OF CASSEGRAIN FEED ANTENNA FOR TERAHERTZ RANGE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The results of modeling and calculation of parameters of the reflectors Cassegrain antenna operating in the terahertz range. Calculated different types of irradiators: conical, pyramidal, shout Potter, corrugated conical horn. The simulation was carried out in the 200-220 GHZ range. Was designed mouthpiece, which has the full symmetry of the radiation pattern in E - and H-planes, and has a low level of side lobes, which will significantly improve the performance of the antenna.

Key words: feed, Cassegrain antenna, the terahertz range, modeling, CAD, CST Studio Suite.

УДК 621.382

В.В. Бирюков[1], В.А. Грачев[1], С.Г. Лобин[2]

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЗАТУХАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ВОЛН В НАПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[1],
Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова[2],

Показано, что наличие шероховатости экранирующих поверхностей волноводов эквивалентно уменьшению удельной проводимости этих поверхностей по сравнению со значениями, входящими в граничные условия Щукина – Леонтовича для идеально гладких поверхностей. Приведены примеры расчёта коэффициента затухания прямоугольного волновода с шероховатыми экранирующими поверхностями в терагерцовом диапазоне частот. Исследовано влияние размеров и формы неоднородностей профиля шероховатой поверхности на погонное затухание волновода. Приведены статистические характеристики различных моделей профиля шероховатой поверхности.

Ключевые слова: прямоугольный волновод, коэффициент затухания, шероховатость поверхности.

Введение

Наряду с конечной проводимостью стенок направляющей структуры [1,2] важным фактором, влияющем на её характеристики, особенно в КВЧ диапазоне, является качество обработки экранирующих поверхностей [3,4].

Из общих физических соображений понятно, что шероховатостью поверхности можно пренебречь, если размеры неровностей много меньше глубины проникновения электромагнитного поля в стенки экрана. Это условие обычно выполняется на частотах ниже и порядка сотен мегагерц. Однако по мере повышения частоты требования к качеству обработки экранирующих поверхностей возрастают и становятся соизмеримыми с технологическими возможностями. В связи с этим в терагерцовом диапазоне частот шероховатость экранирующих поверхностей становится основным фактором, определяющим погонные потери направляющей структуры.

Цель работы: исследование влияния на погонное затухание собственных волн направляющих электродинамических структур высоты неровностей и формы профиля экранирующей поверхности.

Рассмотрим типичный для этих частот случай, когда размеры шероховатостей много больше толщины скин-слоя, но много меньше длины волны распространяющегося в волноводе электромагнитного колебания.

В работе [5] предложен основанный на концепции парциальных волн Бриллюэна подход, позволяющий учесть случайную шероховатость поверхности произвольной формы. В соответствии с ним задача нахождения затухания собственных волн направляющих электродинамических структур с шероховатыми экранирующими поверхностями сводится к достаточно хорошо исследованному случаю структур с идеально гладкими поверхностями. Эквивалентность реальной шероховатой поверхности и гладкой поверхности достигается внесением поправки в удельную проводимость материала последней, обеспечивающей равенство коэффициентов отражения электромагнитной волны от рассматриваемых поверхностей.

Отражение от случайной шероховатой проводящей поверхности

Рассмотрим отражение плоской электромагнитной волны от статистически неровной проводящей поверхности. Уравнение стационарной поверхности можно задать случайной функцией $x = \xi(y, z)$ двух переменных. Будем полагать эту функцию однозначной и непрерывной вместе со своими производными по обоим аргументам. Отражённое от такой поверхности поле будет случайным. Но нас будет интересовать не само поле, а усреднённый по ансамблю случайных поверхностей коэффициент отражения.

Поскольку нас интересуют лишь средние значения для описания статистических свойств поверхности ограничимся одномерной плотностью вероятности $\omega_1(x, y, z)$, которая представляет собой вероятность того, что высота поверхности ξ в точке с координатами y, z лежит в пределах $x < \xi(y, z) \le x + dx$. Одномерная плотность вероятности позволяет найти среднее значение и среднеквадратичное отклонение случайной величины или её функции.

В случае пространственно однородной случайной величины одномерная плотность вероятности одинакова во всех точках пространства

$$\omega_1(x, y, z) = \omega_1(x) = \omega_1(\xi).$$

Средняя высота поверхности над плоскостью $x = 0$ определяется выражением

$$\overline{\xi} = \int_{-\infty}^{\infty} \xi \omega_1(\xi) d\xi.$$

Разброс высот поверхности относительно среднего значения описывается среднеквадратичным отклонением δ

$$\delta^2 = \overline{(\xi - \overline{\xi})^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - \overline{\xi})^2 \omega_1(\xi) d\xi.$$

Отличие процесса отражения плоской электромагнитной волны от шероховатой и гладкой плоскостей заключается в том, что в случае гладкой плоскости фазы вторичных волн известны и определяются фазой падающей волны. В случае же статистически шероховатой поверхности фазы вторичных волн отличаются от значений, определяемых падающей волной, на случайные величины

$$\Delta\varphi(\xi) = k_0 \cdot 2\xi \cdot \cos\theta = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\xi \cdot \cos\theta,$$

где θ - угол падения, λ_0 - длина волны в свободном пространстве (в случае полого волновода).

В этом случае случайную комплексную амплитуду напряжённости электрического поля отражённой волны можно представить в виде

$$E_{\text{отр}} = E_{\text{пад}} \Gamma(\theta) \exp(ik_0 2\xi \cos\theta),$$

где $\Gamma(\theta)$ - коэффициент отражения от гладкой поверхности.

Её среднее значение определяется выражением

$$\overline{E}_{\text{отр}} = E_{\text{пад}} \Gamma(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ik_0 2\xi \cos\theta) \omega(\xi) d\xi.$$

Подставляя сюда плотность вероятности, получим средний коэффициент отражения от шероховатой поверхности

$$\overline{\Gamma}(\theta) = \Gamma(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ik_0 2\xi \cos\theta)\omega(\xi)d\xi .$$

Приравнивая полученную величину к коэффициенту отражения от идеально гладкой поверхности, получим значение эквивалентной удельной проводимости гладкой поверхности, имеющей такой же коэффициент отражения, как шероховатая поверхность.

$$\overline{\Gamma}(\theta) = \Gamma(\theta_{экв})$$

Как показывают расчёты, уменьшение коэффициента отражения на тысячные доли эквивалентно уменьшению удельной проводимости гладкой поверхности почти на порядок. В работе [5] подробно рассмотрены случаи нормального и равномерного распределений профиля поверхности. Однако, задание плотности вероятности, необходимое для анализа свойств шероховатой поверхности, не позволяет однозначно судить о форме её профиля.

Модели шероховатостей различной формы

Форма профиля шероховатой поверхности зависит от способа обработки и применяемого инструмента [6,7] и определяет статистические характеристики поверхности. В качестве модели такой поверхности рассмотрим периодически повторяющиеся неровности профиля различной формы. В перпендикулярном направлении будем считать профиль неизменным.

В этом приближении профиль поверхности описывается функцией одной переменной $\xi = \xi(x),\ -B < x < B$. Роль плотности вероятности в этом случае выполняет относительный интервал нахождения высоты профиля в пределах $\xi,\ \xi + d\xi$.

Полагая формально $\xi(x)$ случайной функцией, можем воспользоваться известным выражением, связывающим плотности вероятности случайной функции и её аргумента:

$$\omega_\xi(\xi) = \omega_x(\xi^{-1}(\xi))\left|\frac{\partial\xi^{-1}(\xi)}{\partial\xi}\right| .$$

Найдём соответствующие зависимости для прямоугольного, кусочно-линейного и плавного профилей.

В случае прямоугольной формы неровностей поверхности профиль описывается выражением

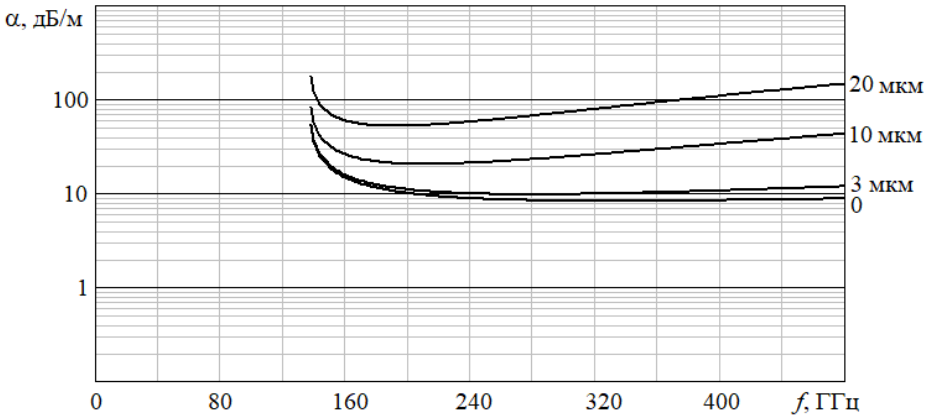
$$\xi(x) = A(\sigma(x+D) - \sigma(x-D)),$$

где $\sigma(x)$ - функция Хэвисайда или единичная функция, A – максимальная высота неровностей, D – поперечный размер неровностей. Такой форме неровностей соответствует плотность вероятности:

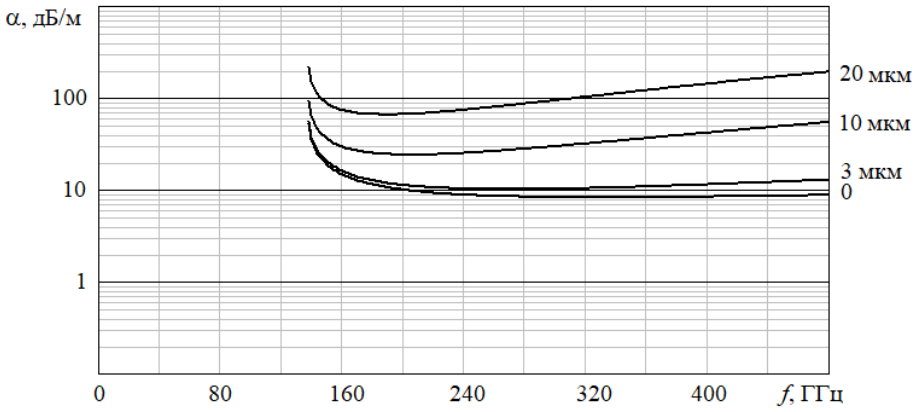
$$\omega_\xi(\xi) = \frac{B-D}{B}\delta(\xi) + \frac{D}{B}\delta(\xi - A),$$

где $\delta(\xi)$ - дельта-функция или функция Дирака.

На рис.1 представлены результаты расчёта погонных потерь прямоугольного волновода сечения 1,1 х 0,55 мм для прямоугольного профиля для различных значений высоты и ширины профиля.



а)



б)

Рис.1 Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода сечения 1,1 х 0,55 мм с прямоугольным профилем для относительной опорной длины профиля а) 75%, б) 50%

Как показывают приведённые зависимости наличие шероховатости поверхности может приводить к увеличению погонного затухания в волноводе почти на порядок. Наибольшее затухание наблюдается в случае, когда поперечный размер составляет половину периода неровностей.

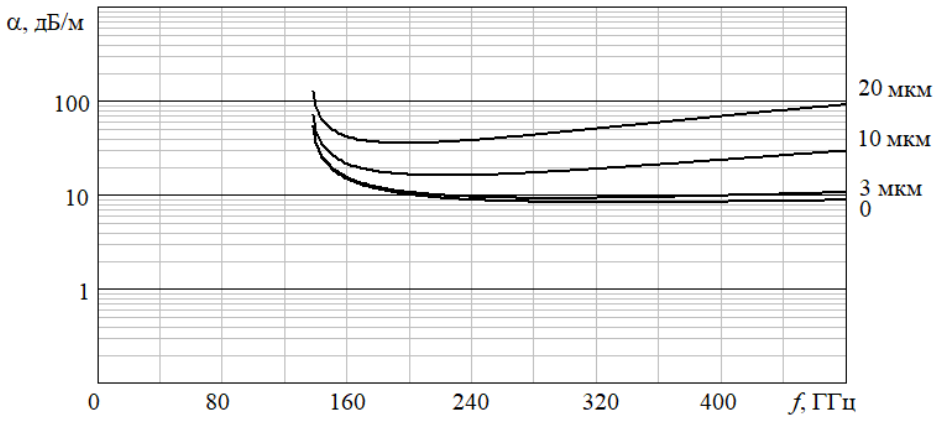
При кусочно-линейной аппроксимации форма профиля описывается выражением

$$\xi(x)=\left(\frac{A}{D}x+A\right)(\sigma(x+D)-\sigma(x))+\left(-\frac{A}{D}x+A\right)(\sigma(x)-\sigma(x-D)).$$

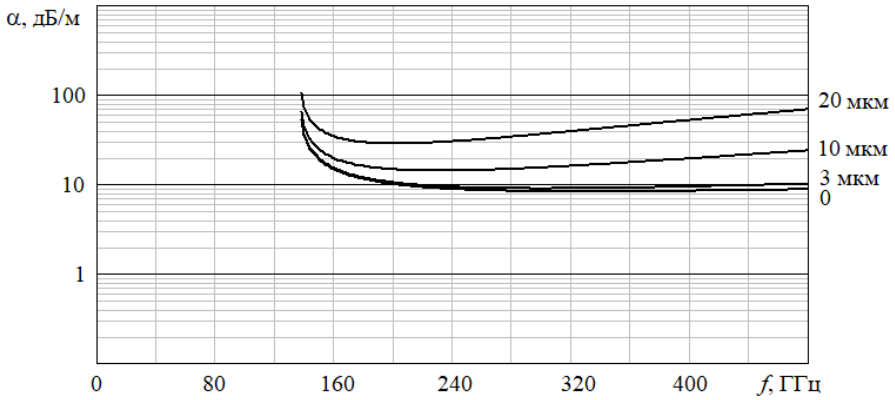
Соответствующее выражение для плотности вероятности имеет вид:

$$\omega_{\xi}(\xi)=\frac{B-D}{D}\delta(\xi)+\frac{D}{AB}.$$

Результаты расчёта погонных потерь прямоугольного волновода сечения 1,1 х 0,55 мм для кусочно-линейного профиля для различных значений высоты и ширины профиля представлены на рис.2.



а)

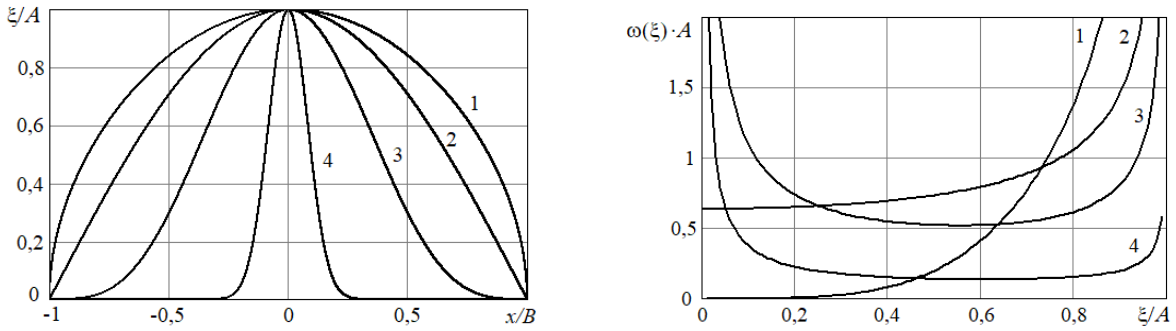


б)

Рис.2 Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода 1,1 х 0,55 мм с линейным профилем для относительной опорной длины профиля а) 75%, б) 50% (уровень сечения профиля 0%)

Как видно из сравнения с предыдущим рисунком, при одной и той же высоте неровностей увеличение затухания в случае прямоугольного профиля больше, чем в случае линейного.

Для описания плавного профиля использована функция $A\left|\cos^{m}(x)\right|$, где параметр m может меняться, позволяя моделировать различные относительные опорные длины профиля. Вид профиля при различных значениях параметра m и соответствующие плотности вероятности показаны на рис.3.



а) 1 – m = 0,5; 2 - m = 1; 3 - m = 3,5; 4 - m = 60 б) 1 – m = 0,5; 2 - m = 1; 3 - m = 3,5; 4 - m = 60

Рис.3. Форма профиля (а) и плотность вероятности (б) для различных значений параметра *m*

Аналитическое выражение для плотности вероятности имеет вид:

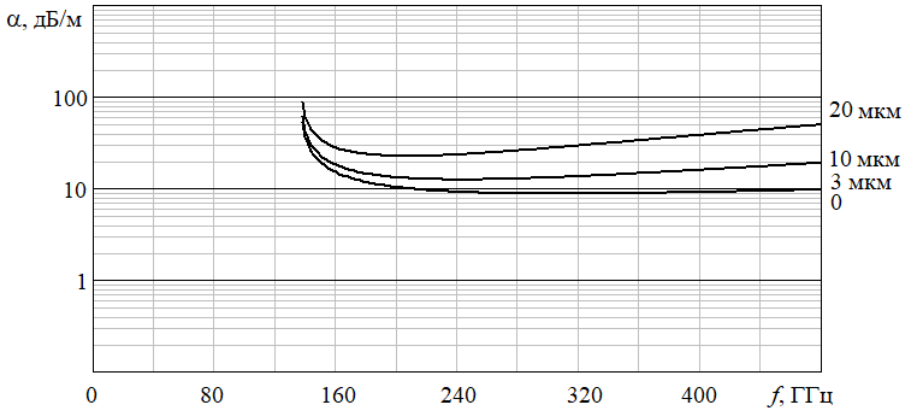
$$\omega_\xi(\xi) = \frac{1}{mA}\left(\frac{\xi}{A}\right)^{\frac{1}{m}-1} \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\xi}{A}\right)^{\frac{2}{m}}}}.$$

Результаты расчёта погонных потерь прямоугольного волновода сечения 1,1 х 0,55 мм для рассматриваемой формы профиля при различных значениях высоты профиля и параметра m представлены на рис.4.

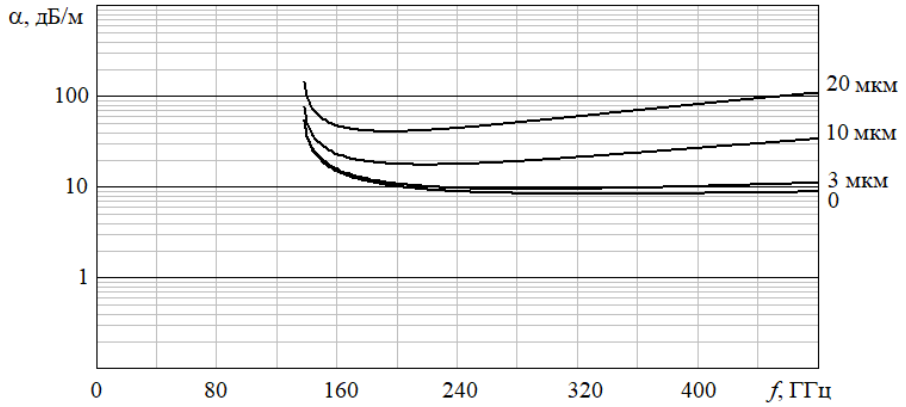
Как следует из этих зависимостей, максимум затухания наблюдается при значении параметра m, равном 3,5.

Выводы

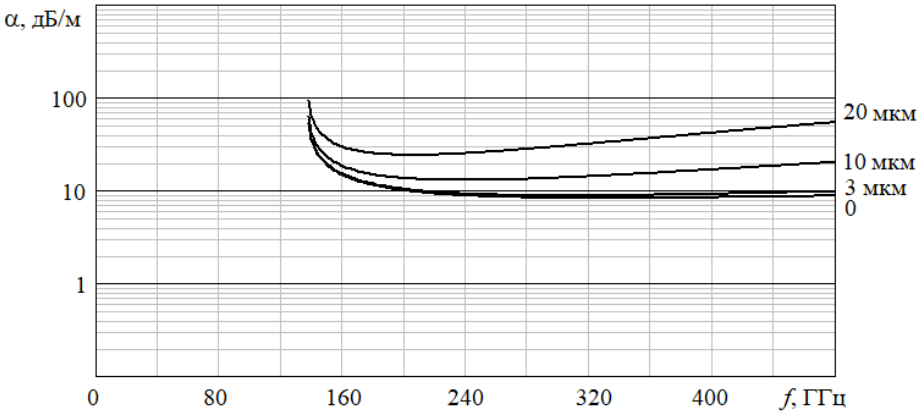
Анализ полученных зависимостей показывает, что наибольшее влияние на погонное затухание собственных волн оказывает высота неровностей профиля экранирующей поверхности. При равных значениях высоты неровностей наибольшее затухание наблюдается в случае прямоугольного профиля, когда ширина неровности равна половине её периода. Применение предложенной методики позволяет задать требования к качеству обработки экранирующих поверхностей направляющих структур, исходя из допустимого уровня затухания собственных волн.



а)



б)



в)

Рис.4 Зависимость от частоты погонных потерь прямоугольного волновода 1,1 х 0,55 мм с плавным профилем а) *m* = 0,5, б) *m* = 3,5, в) *m* = 60

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01628).

Список литературы

1. Ильинский, А.С. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями / А.С. Ильинский, Г.Я. Слепян. – М. : Изд-во МГУ, 1983. – 232 с.
2. Бирюков, В.В. Влияние конечной проводимости стенок на структуру поля и характеристики круглого волновода / В.В. Бирюков, В.А. Грачев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 50-53
3. Воробьёв, Е.А. Расчёт производственных допусков устройств СВЧ/ Е.А. Воробьёв. – Л.: Судостроение, 1980. – 148 с.
4. Якимов, А.Н. Оценка допустимой шероховатости обработки токонесущих поверхностей на СВЧ/ А.Н. Якимов, С.В. Назаров // Труды международного симпозиума Надёжность и качество. – 2008. – Т. 2. - С. 112 - 114.
5. Бирюков, В.В. Расчёт потерь в прямоугольном волноводе с шероховатыми экранирующими поверхностями / В.В. Бирюков // Антенны. – 2016. – № 7. – С. 53-57
6. Крайнов, В.В. Особенности применения электроплазменной обработки/ В.В. Крайнов, Н.М. Тудакова, И.Н. Фролова // Труды НГТУ им.Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5. - С. 25 - 30.
7. Стерехова, Д.И. Методы обеспечения шероховатости на поверхности каналов волноводов КВЧ диапазона / Д.И. Стерехова, И.В. Трифанов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2010. – Т. 1. - № 6. С. 293.

V.V. Biryukov[1], V.A. Grachev[1], S.G. Lobin[2]

THE EFFECT OF THE SIZE AND SHAPE OF THE SHIELDING SURFACE ROUGHNESS ON THE ATTENUATION OF SELF WAVES IN GUIDING ELECTRODYNAMIC STRUCTURES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev[1],
Scientific research Institute of measuring systems n.a. J. E. Sedakov[2]

Purpose: a study of the influence on the attenuation per meter of wave guides own electrodynamic structures of the height of roughness and profile shape of the shielding surface .

Design/methodology/approach: It is shown that the roughness of the shielding surfaces of the waveguides is equivalent to the decrease in conductivity of these surfaces compared to the value concerning to the boundary conditions of Shukin – Leontovich for perfectly smooth of surfaces.

Finding (Results): Examples of the calculation of the attenuation coefficient of a rectangular waveguide rough screening surfaces in the terahertz frequency range are presented.

Originality/value: The influence of the size and shape of the irregularities of the rough surface profile on an attenuation of the waveguide is studied. Given the statistical characteristics of different models of rough surface profile.

Key words: rectangular waveguide, loss factor, surface roughness.

УДК 621.37, 535.8

М.А. Палачев, В.В. Бирюков,В.А. Грачев, С.А. Капустин, А.С. Раевский

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ СВЧ РАДИОСИГНАЛОВ, ВЫПОЛНЕННОГО НА ДВУХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ ИНТЕНСИВНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: теоретический расчет радиофотонного смесителя, экспериментальное исследование спектрального состава оптических и радиочастотных сигналов в радиофотонном смесителе.

Методология: теоретический расчет с применением методов спектрального анализа сигналов, проведение эксперимента с использованием анализаторов спектра сигналов радио и оптического диапазонов.

Результаты: получены выражения для определения амплитудных коэффициентов гармонических составляющих в спектре выходного сигнала радиофотонного смесителя на выходе второго электрооптического модулятора. Проведено экспериментальное исследование в результате, которого были определены амплитуды комбинационных составляющих в оптическом спектре на выходе исследуемого смесителя.

Выводы: в оптическом спектре на выходе радиофотонного смесителя наблюдаются все девять гармонических составляющих, уровень комбинационных составляющих довольно высок.

Ключевые слова: радиофотоника, смеситель частоты, радиофотонный смеситель частот, электрооптический модулятор.

Введение

Смесители частоты находят свое применение в радиоприемной аппаратуре, оборудовании спутниковой связи, информационно-измерительных системах и других областях, где необходим перенос сигнала на промежуточную частоту для его регистрации и обработки. На сегодняшний день наибольшее распространение получили диодные смесители частоты, т.к. они отличаются хорошим быстродействием и невысоким уровнем шумов. Тем не менее, перспективными и принципиально новыми являются смесители частот, построенные на принципах радиофотоники(с использованием волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ) и двух электрооптических модуляторов интенсивности излучения). Смешение частот достигается за счет вывода рабочей точки модуляторов на нелинейный участок модуляционной характеристики (МХ) с помощью подачи напряжения на один из портов.

Теоретическая часть

Радиофотонный смеситель частот в общем случае состоит из трех блоков – блока электрооптического преобразования (ЭОП), оптоволоконного тракта (ОВТ) и блока оптоэлектронного преобразования (ОЭП). Для реализации широкополосных и сверхширокополосных смесителей оптимальным вариантом является использование внешней модуляции, поэтому блок ЭОП состоит из лазерного диода (ЛД) и двух модуляторов интенсивности излучения на базе интерферометра Маха-Цандера (ММЦ 1 и ММЦ 2). Блок ОВТ служит для передачи сигнала, а ОЭП осуществляет оптоэлектронное преобразование, как правило, он состоит из фотодетектора. Схема радиофотонного смесителя представлена на рис. 1.

Принцип работы данного смесителя заключается в следующем: в первом модуляторе Маха-Цандера (ММЦ 1) производится амплитудная модуляция оптического сигнала от лазерного диода $P_{\text{оп}}(t)$ входным электрическим сигналом $P_{\text{свч}}(t)$. После модуляции оптический сигнал $P_{\text{опм.1}}(t)$, будет содержать три спектральные составляющие с частотами

($f_{\text{оп}}$), ($f_{\text{оп}} + f_{\text{с}}$) и ($f_{\text{оп}} - f_{\text{с}}$). Затем, оптический сигнал с выхода ММЦ 1 через ОВТ 1 поступает во второй модулятор Маха-Цандера (ММЦ 2). В ММЦ 2 осуществляется амплитудная модуляция оптического сигнала $P_{\text{опм.1}}(t)$ сигналом гетеродина $P_{\text{гет}}(t)$. Продуктом этой модуляции является, модулированный оптический сигнал $P_{\text{опм.2}}(t)$, спектр которого содержит девять спектральных составляющих ($f_{\text{оп}}$), ($f_{\text{оп}} + f_{\text{с}}$), ($f_{\text{оп}} - f_{\text{с}}$), ($f_{\text{оп}} + f_{\text{г}}$), ($f_{\text{оп}} - f_{\text{г}}$), ($f_{\text{оп}} + f_{\text{с}} - f_{\text{г}}$), ($f_{\text{оп}} + f_{\text{с}} + f_{\text{г}}$), ($f_{\text{оп}} - f_{\text{с}} - f_{\text{г}}$) и ($f_{\text{оп}} - f_{\text{с}} + f_{\text{г}}$). Полученный оптический сигнал через ОВТ 2 поступает на оптический вход фотодетектора, на выходе которого формируется электрический сигнал $P_{\text{вых}}(t)$, содержащий четыре спектральных составляющих ($f_{\text{с}}$), ($f_{\text{г}}$), ($f_{\text{с}} + f_{\text{г}}$), ($f_{\text{с}} - f_{\text{г}}$). Необходимая спектральная составляющая может быть выделена соответствующим частотным фильтром. В результате на выходе будем иметь сигнал на промежуточной частоте $P_{\text{пч}}(t)$.

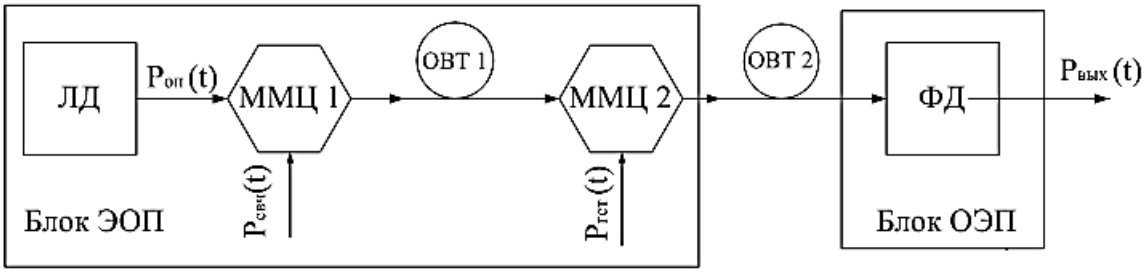


Рис. 1. Схема радиофотонного смесителя: ЛД – лазерный диод; ММЦ 1, ММЦ 2 – оптоэлектронные модуляторы на базе интерферометра Маха–Цандера; ОВТ 1, ОВТ 2 – оптоволоконные тракты; ФД – фотодетектор

Для определения уровня гармонических составляющих был произведен теоретический расчет спектра на выходе ММЦ 2.

Электромагнитная волна от лазерного излучателя с частотой w_0 и амплитудой E_0поступает на вход ММЦ 1, где разделяется на две волны с амплитудами$E_0/2$. На выходе ММЦ 1 получим:

$$E_{мод1} = E_0 \cdot e^{i(w_0 t+\varphi_0)} \cdot \cos(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_1+U_2}{U_\pi}) \cdot e^{\frac{i\pi}{4}(\frac{U_1-U_2}{U_\pi})},$$

где φ_0 – начальная фаза ММЦ 1; U_1, U_2 –напряжение приложенное к плечам модулятора; U_π- полуволновое напряжение.

Чтобы избежать частотного чирпа приравниваем напряжение, приложенное к плечам модулятора $U_1 = U_2$, в результате формулапринимает вид:

$$E_{мод1} = E_0 \cdot e^{i(w_0 t+\varphi_0)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{U_\pi}).$$

Представляем СВЧ сигнал поданный на управляющий вход ММЦ1 (U/U_π) как сумму гармонического сигнала и постоянного напряжения смещения

$$\frac{U}{U_\pi} = U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n),$$

где U_{01} - постоянное напряжение смещения; $U_x cos(w_n t + \varphi_n)$ - СВЧ сигнал с генератора 1.

В результате имеем:

$$E_{мод1} = E_0 \cdot e^{i(w_0 t+\varphi_0)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} \cdot [U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n)]).$$

Произведя аналогичные преобразования и действия, на выходе ММЦ 2 имеем:

$$E_{мод2} = \frac{E_0}{2} \cdot e^{i(w_0 t + \varphi_0 + \varphi_{02})} \cos(\frac{\pi}{2}[U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n)]) \cos(\frac{\pi}{2}[U_{02} + U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)]),$$

где U_{02} - постоянное напряжение смещения; $U_{x2} cos(w_m t + \varphi_m)$ - СВЧ сигнал с генератора 2; φ_{02} - начальная фаза ММЦ 2.

Распишем произведение косинусов:

$$\cos(\frac{\pi}{2}[U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n)]) \cos(\frac{\pi}{2}[U_{02} + U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)]) = \frac{1}{2}(\cos(\frac{\pi}{2}U_{01} -$$

$$-\frac{\pi}{2}U_{02} + \frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) - \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)) + \cos(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02} +$$

$$+\frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) + \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)))$$

Воспользуемся формулой Эйлера и перейдем к комплексной записи:

$$\cos(\frac{\pi}{2}[U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n)]) \cos(\frac{\pi}{2}[U_{02} + U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)]) =$$

$$= \frac{1}{2}\mathrm{Re}([\exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02} + \frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) - \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m))) +$$

$$+ (\exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02} + \frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) + \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m))])$$

Применим к каждому слагаемому формулу Ангера-Якоби:

$$e^{iz\cos(\theta)} \equiv \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(z) e^{in\theta}$$

После чего приходим к следующим выражениям:

$$\exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02} + \frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) - \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m))) =$$

$$= \exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02}) \cdot \exp(i(\frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) - \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)) =$$

$$= \exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02})) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\frac{\pi}{2}U_x) e^{i \cdot n(w_n t + \varphi_n)} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(-\frac{\pi}{2}U_{x2}) \cdot e^{i \cdot m(w_m t + \varphi_m)} =$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^{n+m} J_n(\frac{\pi}{2}U_x) \cdot J_m(-\frac{\pi}{2}U_{x2}) \cdot e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02})} \cdot e^{in(w_n t + \varphi_n)} \cdot e^{im(w_m t + \varphi_m)}$$

и

$$\exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02} + \frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) + \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m))) =$$

$$= \exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02}) \cdot \exp(i(\frac{\pi}{2}U_x \cos(w_n t + \varphi_n) + \frac{\pi}{2}U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)) =$$

$$= \exp(i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02})) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\frac{\pi}{2}U_x) e^{i \cdot n(w_n t + \varphi_n)} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(\frac{\pi}{2}U_{x2}) \cdot e^{i \cdot m(w_m t + \varphi_m)} =$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^{n+m} J_n(\frac{\pi}{2}U_x) \cdot J_m(\frac{\pi}{2}U_{x2}) \cdot e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02})} \cdot e^{i(n\varphi_n + m\varphi_m)} \cdot e^{i(mw_m + nw_n)t}$$

Объединяя полученные выражения, приходим к формулам:

$$E_0 \cdot e^{i(w_0 t + \varphi_0 + \varphi_{02})} \cos(\frac{\pi}{2}[U_{01} + U_x \cos(w_n t + \varphi_n)]) \cos(\frac{\pi}{2}[U_{02} + U_{x2} \cos(w_m t + \varphi_m)]) =$$

$$= E_0 \cdot e^{i(w_0 t + \varphi_0 + \varphi_{02})} \cdot \mathrm{Re} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_{n,m} e^{i(nw_n + mw_m)t}$$

$$W_{n,m} = \frac{1}{2} i^{n+m} [(-1)^m e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02})} + e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02})}] J_n(\frac{\pi}{2}U_x) J_m(\frac{\pi}{2}U_{x2}) e^{i(m\varphi_m + n\varphi_n)}$$

Модули амплитудных коэффициентов ряда Фурье равны:

$$| W_{n,m} | = | \frac{1}{2} i^{n+m} \| (-1)^m e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02})} + e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02})} \| J_n(\frac{\pi}{2}U_x) \| J_m(\frac{\pi}{2}U_{x2}) \| e^{i(m\varphi_m + n\varphi_n)} | =$$

$$= \frac{1}{2} [| (-1)^m e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} - \frac{\pi}{2}U_{02})} + e^{i(\frac{\pi}{2}U_{01} + \frac{\pi}{2}U_{02})} \| J_n(\frac{\pi}{2}U_x) J_m(\frac{\pi}{2}U_{x2}) |]$$

Экспериментальная часть

При экспериментальном исследовании радиофотонного смесителя одной из главных задач является снятие модуляционных характеристик оптоэлектронных модуляторов интенсивности излучения на базе интерферометра Маха-Цандера. Данная процедура необходима для определения полуволнового напряжения, начальной фазы модулятора и областей максимальной нелинейности. Установив рабочие точки модуляторов в одну из таких областей, будет наблюдаться появление сигнала на промежуточной частоте. Для создания радиофотонного смесителя использовались два модулятора OptilabIM-1550.

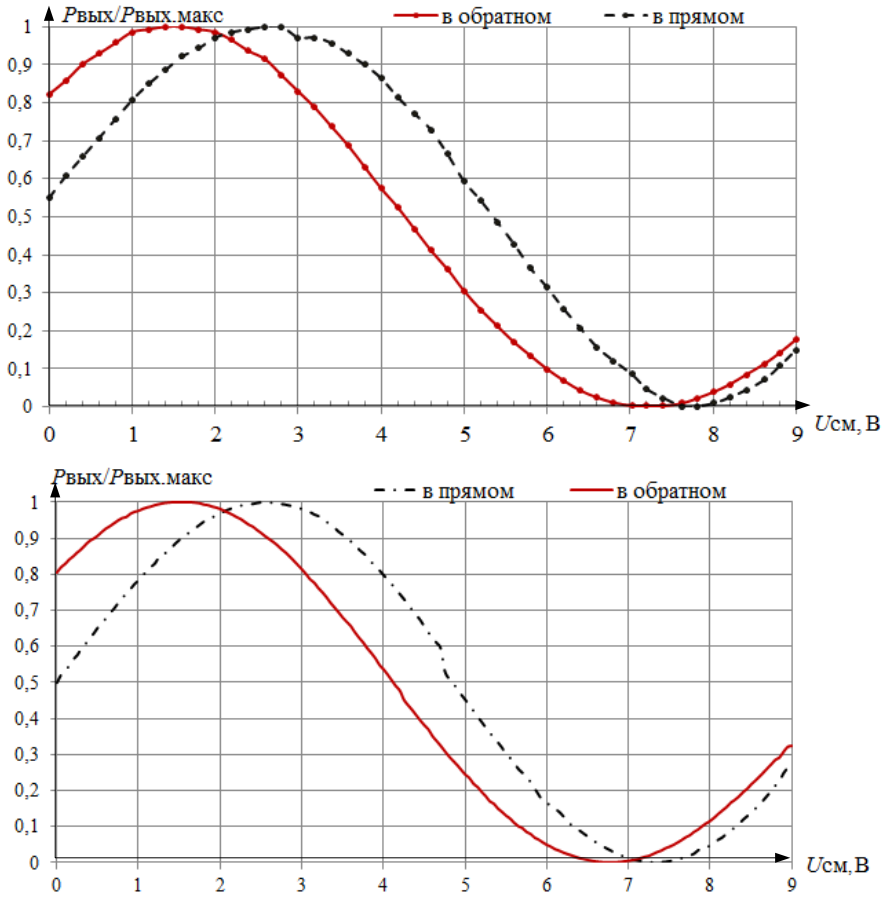


Рис. 2. Модуляционные характеристики ММЦ 1 и ММЦ 2

Модуляционная характеристика модуляторов представлена на рис.2,из которого видно, что области максимальной нелинейности располагаются в промежутках от 1 до 3,5 В и от 5 до 8,5 В.Полуволновые напряжения ММЦ 1 и ММЦ 2 составляют 5,1 В.

Подключаем выход ММЦ 1 к оптическому анализатору спектра ID-OSA. Установаем мощность оптического излучения 15 дБм и частоту 193,414 ТГц, мощность $P_{\text{свч}}(t)$равную 15 дБм, а частоту в 5 ГГц. Полученный спектр на выходе ММЦ 1, представлен на рис.3.

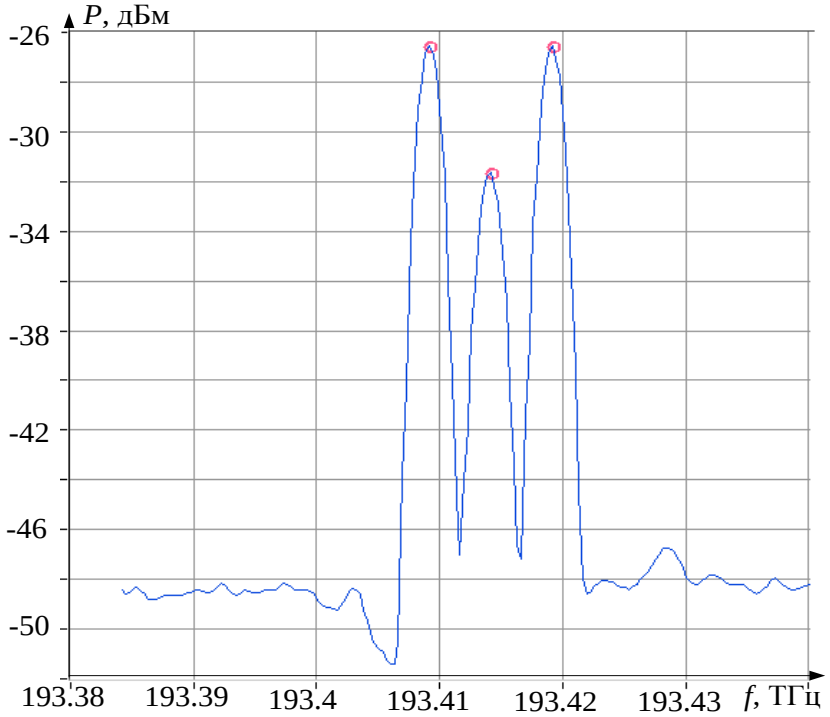


Рис. 3. Спектр на выходе ММЦ 1

Как видно из рис. 3 спектрна выходе ММЦ 1 содержит три гармонических составляющих, одна из которых – оптическая несущая, на частоте 193.414 ТГц и две комбинационных на частотах (193.419 ТГц и 193.409 ТГц).

Оптический спектр на выходе второго ЭОМ представлен на рис. 4 и 5. Мощность $P_{\text{оп}}(t)$составляет 15 дБм на частоте 193.414 ТГц; мощность СВЧ сигнала 15 дБм на частоте 4 ГГц; мощность сигнала гетеродина 20 дБм на частоте 12 ГГц. На выходе ММЦ 2 были получены спектры представленные на рис. 4 и рис. 5.Видно, что на выходе ММЦ 2 имеются все девять гармонических составляющих. Наиболее высокий уровень необходимых комбинационных составляющих $P_{\text{свч}}(t) + P_{\text{гет}}(t)$ и $P_{\text{свч}}(t) - P_{\text{гет}}(t)$ до оптоэлектронного преобразования составляет -17 дБм и достигается при $U_{01} = 1{,}97$ В и $U_{02} = 7{,}47$ В.

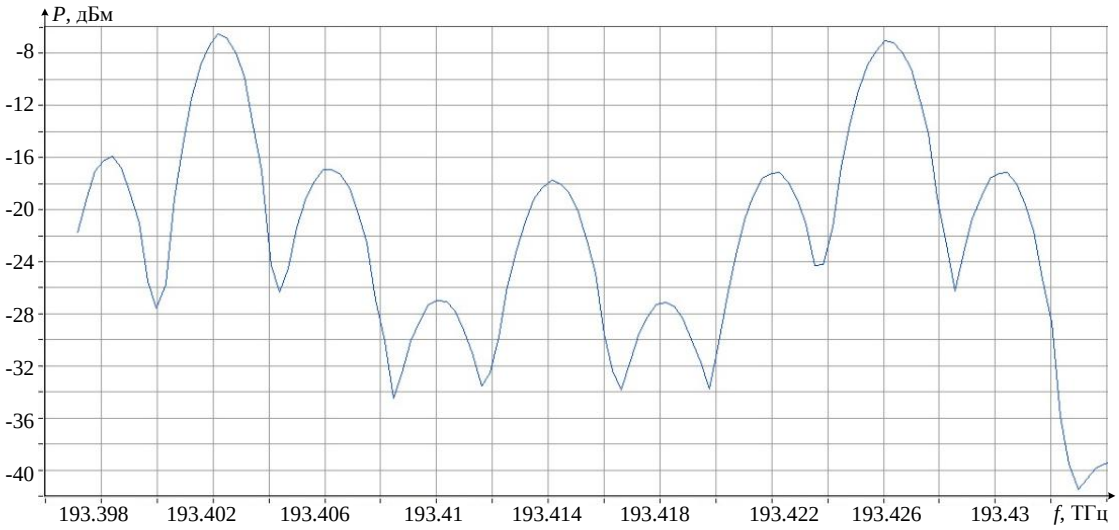


Рис. 4. Спектр оптического сигнала на выходе ММЦ 2 при$U_{01} = 1,97$ В и $U_{02} = 7,47$ В

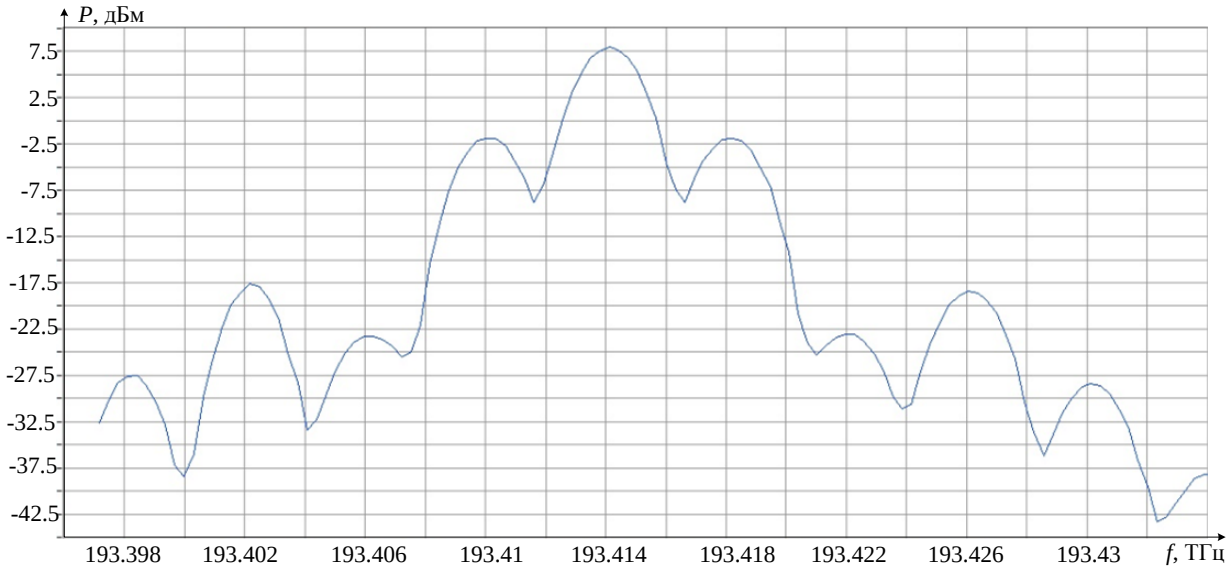


Рис. 5. Спектр оптического сигнала на выходе ММЦ 2, при $U_{01} = 1,98$ В и $U_{02} = 2,11$ В

Выводы

Таким образом, в данной работе была получена формула для нахождения амплитуды гармонических составляющих спектра напряженности на выходе ММЦ 2. Проведен эксперимент в результате, которого установлены уровни комбинационных составляющих на разностных и суммарных частотах. Недостатком данного радиофотонного смесителя, является низкий уровень комбинационных составляющих по сравнению с традиционными СВЧ смесителями.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19- 01628).

Библиографический список

1. Белоусов, А.А. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.В. Гамиловская, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов.

2. Manka M.E. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications // Microwave photonics, 2008. Jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photonics conference. DOI: 10.1109/MWP.2008.4666690.

3. Данилин, А. А. Приборы и техника радиоизмерений: учебное пособие / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. – 202 с.

M.A. Palachev, V.V. Biryukov, V.A. Grachev, S.A. Kapustin, A.S. Rayevsky

INVESTIGATION OF MIXER OF MICROWAVE RADIOSIGNALS IMPLEMENTED ON TWO ELECTRO-OPTICAL MODULATORS OF INTENSITY

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva

Purpose: theoretical calculation of a radio-photon mixer, experimental study of the spectral composition of optical and radio-frequency signals in a radio-photon mixer.

Methodology: theoretical calculation using spectral analysis of signals, conducting an experiment using spectrum analyzers for radio signals and optical bands.

Results: expressions were obtained for determining the amplitude coefficients of the harmonic components in the spectrum of the output signal of the radio-photon mixer at the output of the second electro-optical modulator. An experimental study was carried out as a result of which the amplitudes of the Raman components in the optical spectrum at the output of the mixer studied were determined.

Conclusions: all nine harmonic components are observed in the optical spectrum at the output of the radio-photon mixer, the level of the combination components is quite high.

Key words: radiophotonics, frequency mixer, radio-frequency frequency mixer, electro-optical modulator.

УДК 621.396.67

Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов, Ю.А. Светлаков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК КВЧ ДИАПАЗОНА С ВОЛНОВОДНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Приводятся результаты проектирования и исследования микрополосковых антенных решеток восьми миллиметрового диапазона длин волн. Для достижения высокого значения КПД в антеннах реализуется гибридная техника питания/возбуждения с использованием волновода прямоугольного сечения. Приводятся результаты исследования одномерной и двумерной микрополосковых антенных решеток и особенности их изготовления.

Ключевые слова: микрополосковые антенные решетки, последовательное возбуждение, апертурное возбуждение микрополосковых антенн, волновод прямоугольного сечения.

При построении микрополосковых антенных решеток обычно применяют микрополосковую технику возбуждения (питания) [1]. Главным недостатком микрополосковой техники возбуждения антенных решеток является низкий коэффициент полезного действия (КПД) (до 30%), что особенно критично в миллиметровом диапазоне длин волн [2]. Для устранения этого недостатка, была предложена система возбуждения на основе металлического волновода прямоугольного сечения. С помощью такой гибридной – волноводно-микрополосковой техники ожидалось добиться существенного повышения КПД (до 75%) [3] в антенных решетках КВЧ диапазона применяемых в разрабатываемых бортовых антенно-фидерных системах.

Разрабатывались и исследовались два типа гибридных антенных решеток [4]: одномерная (линейка) и двумерная. Одномерная решетка конструктивно состоит из волновода стандартного сечения 7,2 х 3,4 мм без одной из широких стенок, которую конструктивно заменяет пластина фольгированного диэлектрика. На внутренней (по отношению к волноводу) поверхности пластины диэлектрика располагаются щели связи. На внешней поверхности располагаются микрополосковые печатные излучатели (МПИ). Через щели связи осуществляется возбуждение микрополосковых излучателей. Двумерная решетка состоит из восьми микрополосковых линеек с последовательным возбуждением МПИ квадратной формы с угла. Оптимизация конструкций антенных решеток проводилась с помощью электродинамического моделирования в программном пакете CST MS.

В докладе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования характеристик излучения одномерной решетки (линейки), излучающими элементами которой являются микрополосковые вибраторы. С целью получения наибольшего коэффициента усиления (КУ) в линейке реализуется резонансный тип возбуждения с максимумом диаграммы направленности (ДН) перпендикулярно к широкой стенке питающего - магистрального волновода. Проектирование и оптимизация конфигурации излучателей в антенной решетке осуществлялось в пакете трехмерного моделирования CST MS [4].

Основными задачами являлись: 1) исследование достижимой рабочей полосы частот в антенных решетках, 2) экспериментальное исследование частотной зависимости коэффициента полезного действия изготовленных антенных решеток.

Концепция гибридного возбуждения, заключается в следующем: основная мода волновода прямоугольного сечения ТЕ10 возбуждает прорезанные в широкой стенке

волновода продольные щели, которые в свою очередь возбуждают МПИ, расположенные на верхней стороне диэлектрической подложки. Метод возбуждения МПИ аналогичен апертурному [5]. Нижний слой металлизации диэлектрической подложки с прорезанными щелями служит волноводу верхней широкой стенкой.

Использование МПИ в составе волноводной линейки приводит к следующему положительному эффекту: используемые МПИ прямоугольной формы имеют ширину ДН меньше, чем ширина ДН излучающей щели, расположенной в широкой стенке волновода. Таким образом, снижаются эффекты взаимодействия излучателей в составе решетки как друг с другом, так и с окружающими объектами.

Исходными данными проектирования одномерной решетки являлись: полоса рабочих частот 32-35 ГГц, ширина ДН не более 10°, уровень боковых лепестков не более -13 дБ, линейная поляризация излучения. Тип разрабатываемой и исследуемой антенны - резонансная, возможные отклонения максимума ДН от нормали к широкой стенке волновода не более 3°.

Поперечные размеры возбуждающего волновода были выбраны стандартными для восьми миллиметрового диапазона - 7,2×3,4 мм. В качестве подложки микрополосковой решетки был использован фольгированный диэлектрик Rogers 3003 толщиной 0,508 мм и относительной диэлектрической проницаемостью ε=3.

В результате проектирования были изготовлены образцы антенны (условное название - ВМЛ 8, которая представлена на рис. 1) и исследованы их характеристики. На резонансной частоте в антенне реализовано равноамплитудное распределение возбуждения.

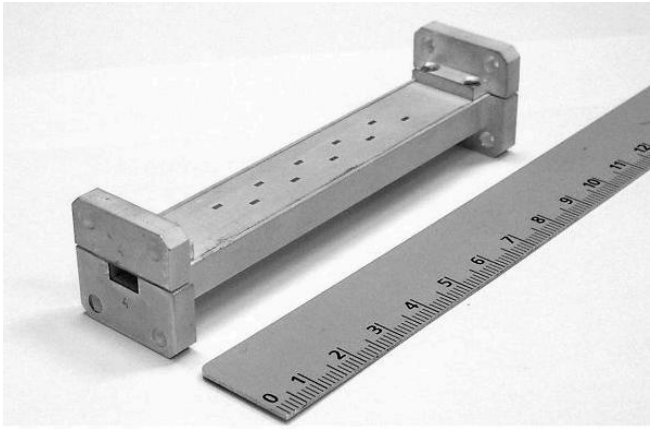


Рис. 1. Антенна ВМЛ 8

В докладе приводятся удовлетворительно согласующиеся результаты теоретического и экспериментального исследований рассматриваемых антенных решеток.

Измерения КУ полученных антенных решеток проводились в дальней зоне с помощью измерительного комплекса антенно-фидерных систем, разработанного в «НИИИС им. Ю.Е. Седакова».

Оценка коэффициента полезного действия антенн η была произведена на частоте 34,5 ГГц, применяя подход, описанный в работе [6]. Результат оценки – $\eta \approx 90$ %, что является высоким значением для антенн, построенных с использованием микрополосковых линий и приемлемым значением для волноводно-щелевых антенн.

В докладе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования характеристик излучения спроектированной и изготовленной микрополосковой двумерной решетки восьмимиллиметрового диапазона длин волн [4], с использованием волноводного возбуждения, излучающими элементами которой являются последовательно питаемые патч-

антенны. Проектирование и оптимизация конфигурации излучателей антенной решетки осуществлялись в пакете трехмерного моделирования CST MS.

На рис. 2 представлена конструкция (модель) двумерной микрополосковой линейки с волноводным возбуждением: 1 - вход волновода, 2 - расположение короткозамыкателя, 3 -микрополосковые линейки с МПИ.

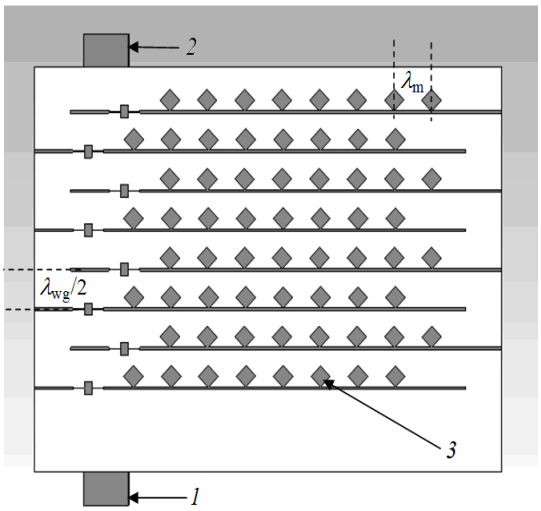


Рис. 2. Модель двумерной микрополосковой линейки с волноводным возбуждением

Двумерная решетка состоит из восьми микрополосковых линеек с последовательным возбуждением с угла МПИ квадратной формы. МПИ находятся вне линии питания и соединяются с ней отрезками микрополосковых линий. Антенная линейка с волноводным возбуждением является в данном случае питающим, магистральным волноводом. Спроектированная и изготовленная антенна (условное название - МПАР 8) представлена на рис. 3.

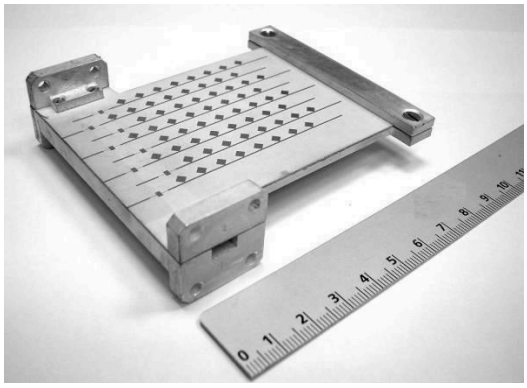


Рис. 3. Антенна МПАР 8

В качестве подложки микрополосковой решетки был использован фольгированный диэлектрик Rogers 3003 толщиной 0,508 мм и относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3$ (измерения на частоте 10 ГГц). Резонансная частота излучения спроектированной двумерной решетки 33 ГГц.

В магистральном волноводе реализован резонансный режим с короткозамыкателем. В излучающих микрополосковых линейках реализован режим бегущей волны с отклонением максимума ДН антенны от нормали к плоскости антенны. В результате возбуждения МПИ

квадратной формы, согласно резонаторной модели [6], возбуждаются две вырожденные моды (1, 0) и (0, 1). Поляризация излучения МПИ в данном случае линейная.

На рис. 4 представлена экспериментально полученная частотная зависимость коэффициента отражения (КО) изготовленной антенны. Рабочие полосы частот по уровню КО -10дБ - 32,7…34,7 ГГц.

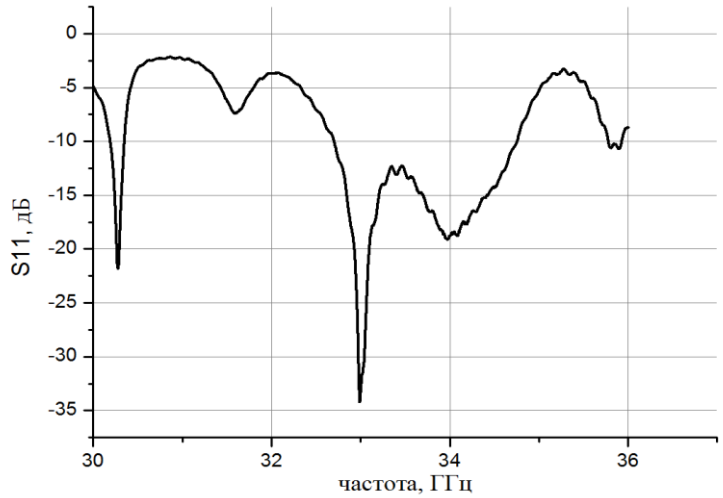


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения

На рис. 5 представлена измеренная ДН антенной решетки в Н- и Е-плоскостях (сплошная линия - в Е плоскости, штрихпунктирная - в Н – плоскости).

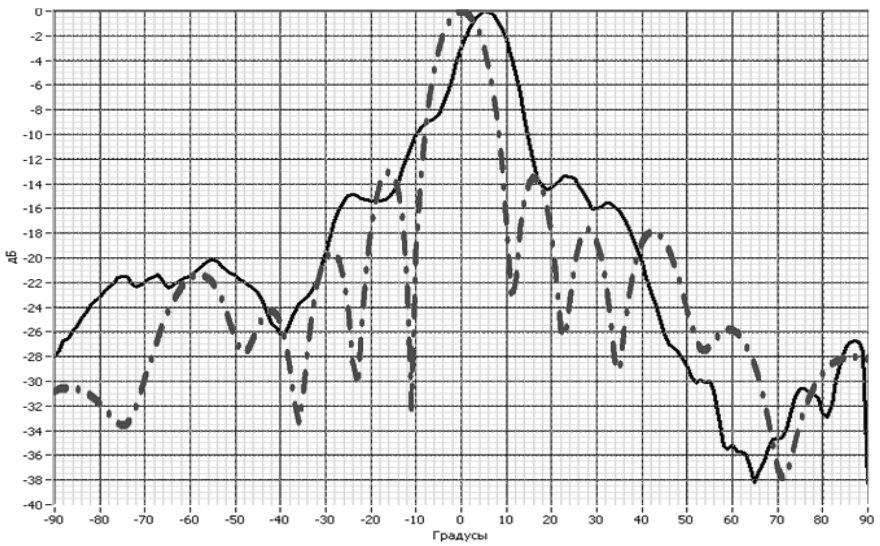


Рис. 5. ДН антенной решетки МПАР 8

Коэффициент усиления антенны МПАР 8 на частоте 33 ГГц составил 22 дБ. Оценка коэффициента полезного действия η антенны выполнялась согласно рекомендациям [6], η = 70%.

Что касается технологического обеспечения проектирования антенных решёток, то следует отметить, что уже на этапе синтеза и оптимизации конструкций учитывались возможности технологического обеспечения изготовления [7, 8] разрабатываемых антенных решеток. Это, прежде всего доступные материалы с необходимыми электрофизическими

характеристиками и технологии, обеспечивающие изготовление и совмещение элементов антенн.

Изготовление экспериментальных образцов антенных решеток производилось с применением технологических процессов производства печатных плат (изготовление платы с излучающими микрополосковыми элементами и щелями связи), механообработки (изготовление корпусов и фланцев), сборки (совмещение излучающих элементов решетки и волноводных каналов), а также технологических процессов гальванических покрытий (нанесение покрытия на детали антенны). Применение данных технологических процессов позволило разработать технологию изготовления рассматриваемых антенных решеток, обеспечивающую требуемую точность, как изготовления отдельных деталей, так и их совмещения при сборке антенн.

Следует отметить, что наиболее сложной задачей при разработке технологии являлось обеспечение взаиморасположение с заданной точностью элементов антенн (что характерно для антенной техники, особенно для миллиметрового диапазона длин волн). Данная задача решалась как с помощью программных средств (при разработке управляющих программ для фотохимического травления при формировании микрополосковых элементов платы), так и с помощью технологических приемов и средств (применение специальной оснастки, последовательность технологических переходов при изготовлении и др.).

Выводы

В данной работе приведены результаты проектирования одномерной и двумерной антенных решеток восьми миллиметрового диапазона длин волн. Главная особенность исследуемых решеток - применение волновода прямоугольного сечения в качестве возбуждающего элемента конструкции. Использование подобной гибридной техники возбуждения позволило увеличить КПД микрополосковых решеток: для линейной решетки до 90 %, для двумерной решетки до 70 %.

Другим эффектом применения гибридной техники является расширение рабочей полосы частот до 6% в резонансном режиме по уровню КО минус 10 дБ, что предоставляет разработчику осуществлять гибкую настройку антенн.

Гибридная техника сочетает в себе конструктивную простоту и удовлетворительные характеристики излучения микрополосковых антенн.

В работе приведены удовлетворительно согласующиеся результаты теоретического и экспериментального исследований двух типов антенных решеток: одномерной и двумерной.

Полученные экспериментальные результаты можно считать верификацией не только модели и техники гибридного возбуждения антенных решеток, но и верификацией технологических процессов их изготовления.

Библиографический список

1. BalanisC.A.,Antenna Theory: Analysis and Design. 2-d edition / C.A.Balanis //NY, John Wiley &Sons, Inc., - 1997.

2. Мануилов,М.Б., ЛерерВ.А., СинявскийГ.П. Методырасчетаиновыепримененияволноводно-щелевыхантенныхрешеток / М.Б. Мануилов,В.А. Лерер, Г.П. Синявский//Успехисовременной радиоэлектроники. Зарубежнаярадиоэлектроника. - 2007, - № 5 -С. 1-29.

3. VanDerWilt,F.P. "A 40 GHzplanarantennausinghybridcoupling"/ F.P. VanDerWilt,J.H.M. Strijbos //PerspectivesRadioAstron. Technol. Largeantennaarrays, - 1999, - PP. 129-134.

4. Варенцов, Е.Л., Проектирование микрополосковых антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн с волноводным возбуждением/ Е.Л. Варенцов , И.А. Илларионов, А.В. Кашин, Ю.А. Светлаков// Антенны, - 2016, - № 1 (221), - С. 76-84.

5. Waterhouse,R.B. MicrostripPatchAntennas: ADesigner'sGuide/ R. B. Waterhouse//Kluwer, Boston.- 2003.

6. Wu, W. Designof an efficient X-band waveguide-fed microstrip patch antennas /W. Wu,J. Yin, N. Yuan// IEEE Trans. on Antennas and propagation.-2007.- Vol. 55 (7).-PP.1933-1939.
7. Седаков, А.Ю. Структура технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ-компонентов бортовых РЛС / А.Ю. Седаков // Антенны. – 2010. – № 10 (161). – С. 57-64
8. Козлов, В.А. Структура технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ устройств / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Информационные системы и технологии ИСТ-2011: Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – С. 92-93.
9. Светлаков, Ю.А. Совершенствование и развитие технологической базы проектирования и изготовления СВЧ устройств/ Ю.А. Светлаков //: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2017 – Нижний Новгород, НГТУим. Р.Е. Алексеева, 2017, –С. 1344-1349.

E.L. Varentsov, I.A. Illarionov, Yu.A. Svetlakov

DESIGNING OF THE ANTENNA MICROSTRIPS ARRAYS OF THE ENF RANGE WITH WAVEGUIDE FEEDING. TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING OF SUCH AERIALS

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”

The results of the numerical calculations and experimental studies of the microstrip antenna arrays characteristics are presented. The hybrid feeding technique is used in the microstrip antenna array design to achieve the high efficiency. The radiation patterns and reflection coefficients of the one-dimensional and two-dimensional microstrip antenna arrays are measured and compared with numerical results. Technological features of manufacturing of such aerials are considered.

Keywords: microstrip antenna array, series feed, aperture coupling, rectangular waveguide.

УДК 621.3.029.6

М.П. Гладышева, Е.В. Колпакова, Д.Е. Орехов, Л.И. Прокофьев

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ LTCC-ПЛАТ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В докладе рассматриваются результаты исследований по использованию отечественной системы материалов (керамики и проводниковых паст) для изготовления по технологии многослойных керамических плат сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн.

Приводятся сравнительные характеристики применяемых материалов отечественного и импортного производства, особенности маршрута и технологических режимов изготовления многослойных керамических плат из отечественных материалов.

*Ключевые слова:*многослойная керамическая плата, технология низкотемпературного совместного обжига, технология LTCC, LTCC-плата.

Технология изготовления многослойных керамических плат (МКП) методом низкотемпературного совместного обжига (LowTemperatureCofireCeramic – LTCC) широко применяется в области создания СВЧ техники.Широкий диапазон рабочих частот МКП 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.

Применяемый в данной технологии комплект материалов включает в себя сырую керамическую ленту, проводниковые пасты на основе благородных металлов Ag, Au, Ag/Pd, Au/Pt, обладающих высокой проводимостью, резистивные и диэлектрические пасты. Совместный обжиг спрессованных слоев МКП осуществляется при температуре не выше 900 ºС, что, собственно, и обеспечивает возможность использования проводниковых паст с высокой проводимостью. Получение многослойных структур позволяет размещать пассивные элементы устройства (линии связи, экранные области, резисторы, конденсаторы и др.) не в одной плоскости платы, а в ее объеме, формируя сложные функциональные узлы, создание которых в одной плоскости принципиально невозможно. Высокоинтегрированные радиоэлектронные устройства, созданные по технологии LTCC, обладают высокой надежностью, компактностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам.

В НИИИС имеется опыт проектирования LTCC-устройств и создан участок по изготовлению многослойных керамических LTCC-плат, оснащенный современным технологическим оборудованием.Маршрут изготовления показан на рис. 1.

В настоящее время в России комплект материалов для технологии LTCC выпускают два предприятия:

- АО «НПП «Исток» (г. Фрязино Московской области) - стеклокерамический материал марки СКМ;
- ООО «НПП «ДЕЛЬТА-ПАСТЫ» (г. Москва) - проводниковые пасты [2].

Данный комплект разрабатывался как аналог LTCC материалов фирмы DuPont (США). В таблице 1 приведены основные свойства стеклокерамического материала СКМ в сравнении с керамикой GreenTape^{TM} 951 фирмы DuPont [2-4].

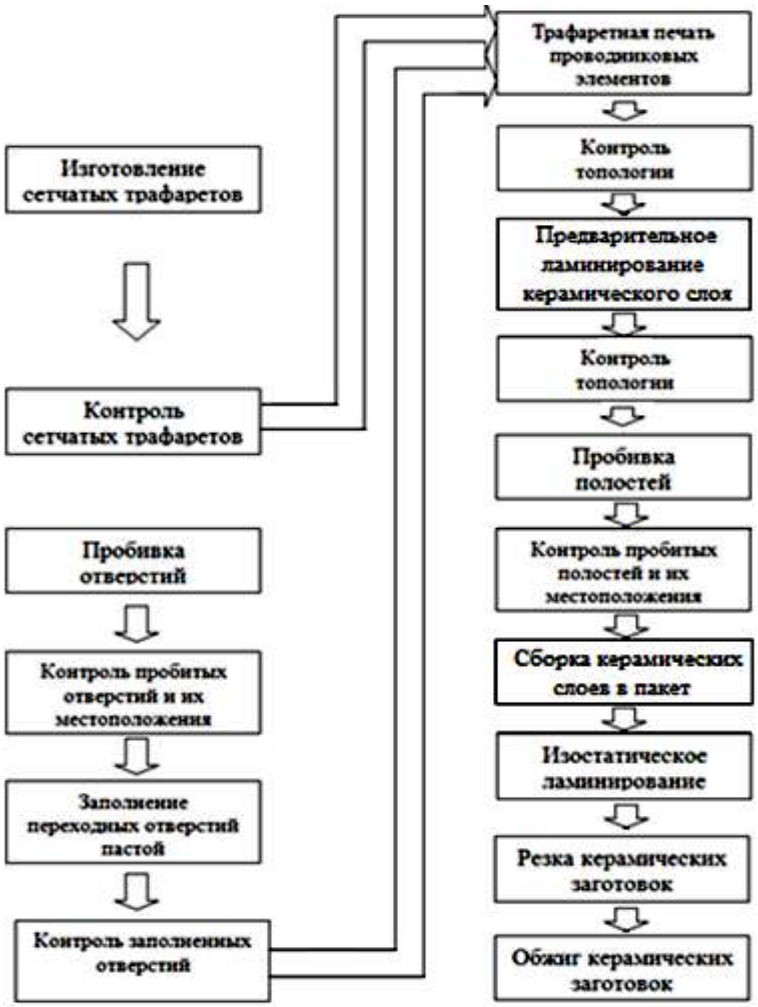


Рис. 1. Маршрут изготовления многослойных керамических плат по технологии LTCC в НИИИС

Таблица 1

Свойства стеклокерамики СКМ в сравнении с керамикой GreenTape™ 951

Параметр	Тип керамики	
	СКМ	Green Tape 951
Толщина пленки, мкм	100±10 150±15 250±20	951PT 114±18 951P2 165±18 951PX 254±18
Диэлектрическая постоянная, ε	(6,8-7,0) на 20 ГГц	7,8 на 10 ГГц
Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ	0,0015 на 20 ГГц	0,0015 на 10 ГГц
Объемное удельное электрическое сопротивление при 100 В, Ом·см	1×10^{12}	1×10^{12}
Напряжение пробоя, кВ/мм	≥ 10	> 40
Усадка (X,Y), %	(8-13) ± 0,3	12,7 ± 0,3
Плотность, ρ,г/см^3	2,8	3,1
Кривизна поверхности, мкм/см	20	< 20
Механическая прочность при статическом изгибе, МПа	200	320
ТКЛР,α×10^{-6}м/°С	5,0-7,0	5,8

При сравнении свойств видно, что керамика СКМ в основном не уступает керамике GreenTape 951. Существенные различия имеются по прочности и усадке. Величину прочности керамики СКМ можно считать приемлемой. Но вопрос с усадкой сложнее. В отличие от импортной керамики усадка СКМ существенно отличается от партии к партии поставляемой керамики. Это осложняет производство изделий, так как изменение коэффициента усадки в таких широких пределах ведет к необходимости изготовления нескольких комплектов фотошаблонов и программ пробивки отверстий и полостей.

В таблице 2 приведены основные свойства и типы паст отечественного производства в сравнении с пастами производства фирмы DuPont [3,4].По своим электрическим свойствам отечественные пасты не уступают пастам фирмы DuPont. Однако, отечественные пасты обладают меньшей стабильностью технологических свойств (вязкости, скорости подсыхания, чувствительности к дозировке разбавителя и др.), что приводит к необходимости корректировок режимов трафаретной печати.

Изготовить МКП из отечественных материалов, используя ранее разработанный маршрут для создания плат из материалов фирмы DuPont, не удалось. Для решения задачи маршрут пришлось существенно доработать.

В частности, с целью устранения возникающих в процессе ламинирования вздутий керамики, деформаций донышек полостей, нарушения плоскостности, проступания на поверхности МКП топологии предыдущего слоя, была введена дополнительная операция ламинирования каждого керамического слоя.

На этапе проведения операции обжига по многостадийному температурному профилю, рекомендованному производителем керамики СКМ, также столкнулись с проблемой получения МКП удовлетворительного качества. Решить проблему неплоскостности удалось путем проведения обжига под нагрузкой.

Также в маршрут изготовления МКП перед проведением монтажно-сборочных операций была введена дополнительная операция удаления стекла, образующегося на поверхности керамики и металлизации плат при обжиге. Обработку плат проводили в агрессивномтравителе с плавиковой кислотой.

Таблица 2

Свойства проводниковых паст производства ООО «НПП «ДЕЛЬТА-ПАСТЫ» и производства фирмы DuPont (США)

Назначениепаст	Состав	Удельное поверхностное сопротивление пленки, мОм/кв., (мОм/отв.)	
		пасты ООО «НПП«ДЕЛЬТА-ПАСТЫ»	пасты фирмыDuPont
Заполнение отверстий межслойных переходов	**Ag**	**5**	**6**
Внутренние проводники	**Ag**	**4,5**	**< 5**
Внутренние экраны	**Ag**	**4,5**	**< 6**
Наружныепроводникиподтермокомпрессию	**Au**	**5**	**< 6**
Наружные проводники под пайку низкотемпературными припоями (Au-Sn)	**Au**	**5**	**-**
Наружные проводники под пайку высокотемпературными припоями	**Ag/Pd**	**40**	**< 50**

На контактных площадках (КП) МКП из отечественных материалов получены положительные результаты при проведении: термозвуковой сварки золотой проволоки диаметром 20 мкм. Прочность сварных соединений составляет 1,5-2 гс; ультразвуковой

микросварки алюминиевой проволоки диаметром 25 и 30 мкм. Прочность сварных соединений составляет 6-7 гс; исследования режимов пайки на МКП из отечественных материалов показали, что КП:

- пригодны к пайке паяльником серебросодержащими припоями типа ПСрОС 3-58, ПСр2;
- пригодны к групповой пайке в ИК-конвекционной печи с применением припойных паст на основе сплава Sn62Pb36Ag2;
- обеспечивают прочность соединения (адгезию) не менее 50кгс/см^2;
- выдерживают 3 перепайки припоем ПСрОС3-58.

Внешний вид некоторых изготавливаемых в институте МКП приведен на рис. 2.

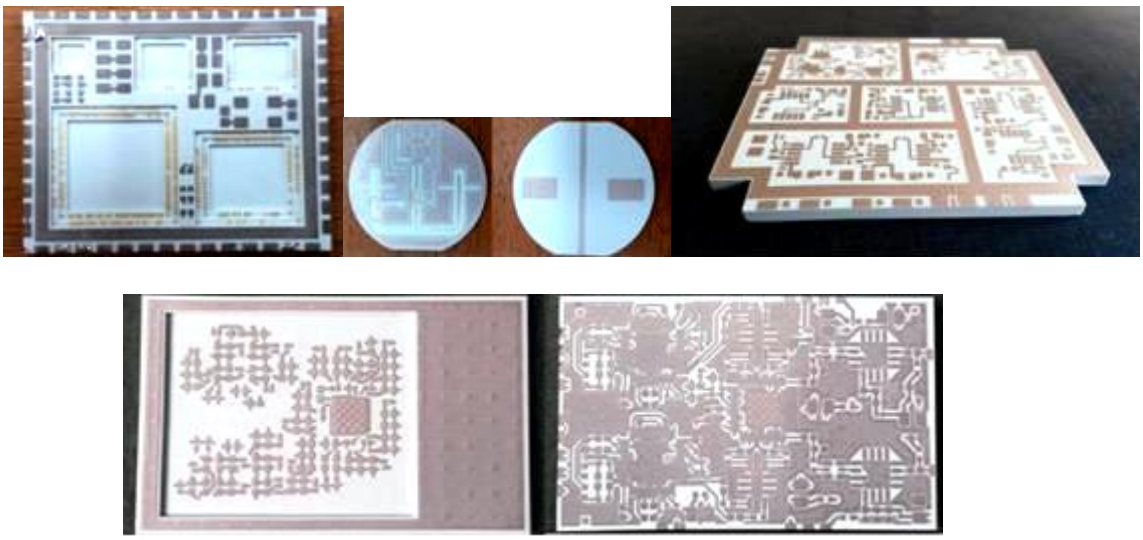


Рис. 2. Внешний вид изготавливаемых многослойных керамических плат

В результате введения дополнительных операций послойного ламинирования, удаления стекла, корректировки режимов трафаретной печати, режима обжига под нагрузкой были получены МКП со следующими характеристиками:

- максимальные габаритные размеры МКП– 85×85 мм;
- минимальные габаритные размеры МКП– 10×10 мм;
- количество керамических слоев – до 14;
- минимальный диаметр переходного отверстия – 200 мкм;
- минимальные ширина проводник/зазор – 150/150 мкм;
- допустимое отклонение размеров элементов – ±25 мкм;
- неплоскостность – не более 50 мкм;
- диапазон рабочих температур - от минус 60 до плюс 125 °С.

Выводы

Разработанный комплект отечественныхLTCC-материалов позволяет изготавливать МКП с требуемыми техническими характеристиками. Однако, для обеспечения стабильности технологии, снижения трудоемкости и повышения выхода годных деталей целесообразно продолжить разработчикам материалов совершенствование своей продукции по следующим направлениям: уменьшить разброс коэффициентов усадки керамики от партии к партии до ±0,3 %; исключить выход стеклообразных продуктов на поверхность МКП в процессе обжига; стабилизировать технологические свойства паст.

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 г, №5, - С.190-196.
2. Ляпин, Л.В. Отечественная система низкотемпературной керамики LTCC СКМ / Л.В. Ляпин, С.Н. Сытилин, А.В. Осипов //Материалы межотраслевого семинара «Вопросы освоения LTCC-технологии на Российских предприятиях, разработки и изготовления на ее основе СВЧ аналоговой и цифровой РЭА», ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Н. Новгород, 2009 г.
3.Электронный ресурс «http://www.mcm.dupont.com».
4. Технические условия ТУ 6366-004-07622667-2012 «Материалы LTCC» г. Фрязино, 2013 г.

M.P. Gladysheva, E.VKolpakova, D.E. Orehov, L.I. Prokofiev

RESEARCHES OF MANUFACTURING TECHNIQUES MULTILAYERED CERAMIC LTCC-PLATES FROMDOMESTIC MATERIALS

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-RussianScientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye.Sedakov”

In the report results of researches on use of domestic's system of materials for manufacturing on technology of ceramic multilayer plates ofUHF ranges are considered.

Comparative characteristics of materials of domestic's and import's manufacture, feature of a manufacturing route and technological modes of manufacturing ceramic multilayer plates from domestic's materials are represented.

Keywords: ceramic multilayer plate,Low Temperature Co fire Ceramic, technological modes of manufacturing ceramic.

УДК 621.3.049.77

С.В. Горохов, А.В. Негин, В.Е. Сергеев

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДАТЧИКОВ УГЛА ПОВОРОТА

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В настоящей работе показаны результаты разработки топологии и технологии изготовления магниторезистивных преобразователей (МРП) для датчиков угла поворота. Выходные электрофизические характеристики МРП аналогичны датчику KMZ – 43 T фирмы Philips.

Ключевые слова: магниторезистивный преобразователь, датчики угла поворота, мост Уинстона, анизотропный магниторезистивный эффект.

Датчики магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезистивных структур занимают большой объем на рынке микроэлектроники, благодаря таким их свойствам как:энергонезависимость, широкий температурный диапазон, радиационная стойкость, отсутствие механического контакта, высокая надежность, низкий порог чувствительности и многим другим[1]. Требования к современным системам управления постоянно ужесточаются и соответственно повышаются требования к разрешающей способности датчика угла поворота. Поэтому необходимо постоянно разрабатывать новые конструкторские и технологические решения.

Основная цель работы – разработка конструкции и технологии изготовления МРП на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (АМР) для датчика угла поворота с минимальным эффектом размагничивающих полей и возможностью устранения технологического разбаланса моста Уинстона.

АМР эффект проявляется в том, что сопротивление тонкой ферромагнитной пленки, измеренное вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН), оказывается несколько выше сопротивления пленки вдоль оси трудного намагничивания (ОТН).Величина АМР эффекта при комнатной температуре составляет 1,5–2,5% в зависимости от материала магниторезистивного слоя [1],[4].Характеристики МРП на основе АМР эффекта позволяют использовать их для решения таких задач как: бесконтактное измерение тока в электрических цепях, скоростей вращения и углов поворота подвижных деталей механизмов, магнитных полей в диапазоне от единиц нТл до сотен мкТл. Формирование МРП производится на основе магниторезистивных пленок с наведенной анизотропией. Анизотропии в тонких пленках добиваются посредством напыления пленок из сплавов с содержанием Fe, Ni и Co во внешнем магнитном поле.

АМР эффект имеет угловую зависимость, чтоиспользуется для создания датчиков определения углового положения.Угловые измерения представляют собой измерение выходных напряжений с мостов Уинстона засчет изменения внутреннего намагничиваниямагниторезистивных полосок от воздействия внешнего магнитного поля, такого чтоб направление обоих векторов стало одинаковым. При этом внешнее поле должно быть много больше чем внутреннее намагничивание магниторезистивных полосок. Следовательно, угловые МРП работают в режиме насыщения. При измерении углов поворота используют схему установки датчика, изображенную на рис. 1[6].На деталь, угол поворота которой требуется измерять, устанавливается постоянный магнит. Магнит вращается перед датчиком, причем внутренний вектор магнита должен быть параллелен внутреннему вектору намагничивания датчика в контрольной точке, выбранной за нулевое положение.Выходная характеристика моста Уинстона будет соответствовать функции

синуса двойного угла, чтопозволяет определять углы в диапазоне от 0° до 90°.Для определения углов от 0° до 180° используют два моста сдвинутые друг относительно друга на 45°. Выходное напряжение мостов Уинстона будут соответствовать функциям *sin 2α, cos 2α*, соответственно.Обработка выходных сигналов двух мостов позволяет получить линейную функцию зависимости сигнала от угла поворота по формуле:

$$\Theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{U_{a,\sin}}{U_{a,\cos}}\right),$$

где, *Ua,sin*и*Ua,cos*выходные сигналы двух мостов.

Схематическое изображение стандартной топологии углового датчика и передаточная характеристика изображены на рис. 2 (а, б)[2],[3],[5],[6].

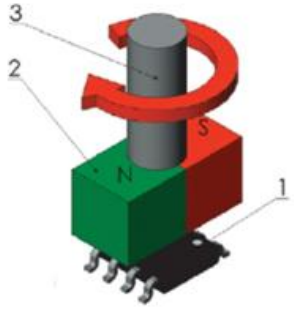
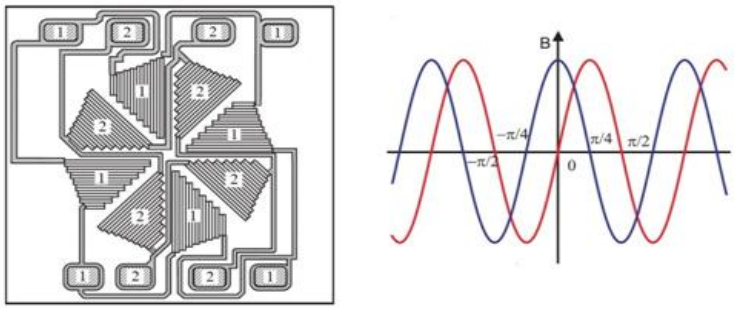


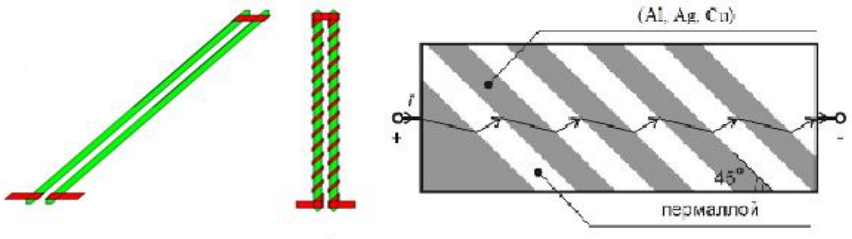
Рис.1.Схема установки датчика углового положения:1 - угловой магниторезистивный датчик; 2 – постоянный магнит;3 - вращающаяся деталь механизма



а б

Рис.2. Топология углового АМР датчика с двухмостовой схемой (а), передаточная характеристика углового АМР датчика с двухмостовой схемой (б). Цифрами 1 и 2 обозначены измерительные мосты двухмостовой схемы.

Для наличия «полезного» выходного сигнала с моста Уинстона от воздействия внешнего магнитного поля, необходимо создать смещение тока в магниторезистивных полосках относительно ОЛН. Существует две схемы при которых создается смещение на 45°, это полюса Барбера (ПБ) и наклонное расположение магниторезистивных полосок (рис. 3).



а б в

Рис. 3. Способ задания смещения:а – наклонные магниторезистивные полоски; б – полюса Барбера; в – прохождение тока через Барбер - полюсную структуру.

В преобразователях с наклонными полосками смещение получается посредством расположения магниторезистивных полосок под углами 0°, 45° и 90°. В структуре с применением ПБ смещение тока получается в нанесении проводников с малым сопротивлением (Al, Ag, Cu)под углом 45° градусов относительно направления магниторезистивных полосок.

При любом способе смещения тока в магниторезистивных полосках, воздействие магнитного поля будет вызывать уменьшение сопротивления одной пары плеч моста Уинстона и увеличение сопротивления в другой паре, что послужит появлению «полезного» выходного сигнала.

Как было описано выше, угловые МРП имеют особенность – работа в состоянии насыщения. Однако, размагничивающее поле, для короткой стороны магниторезистивной полоски, на порядок больше чем для длинной стороны.Это приводит к разнице в сопротивлении плеч моста и, следовательно, к увеличению разбаланса. Физический смысл размагничивающих полей состоит в том, что во внешнем магнитном поле на краях ферромагнитного образца образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное поле обратного (по отношению к внешнему полю) направления. Размагничивающее поле пропорционально намагниченности.

В данной работе показана разработка новой топологии МРП с минимальным эффектом размагничивающих полей.Основой МРП являлось два измерительных моста Уинстона смещённых друг относительно друга на 45°. Обеспечение четной характеристики выходного сигнала определяется созданием ПБ на магниторезистивных полосках. Целесообразность применениянданной структуры заключалось в том, что все магниторезистивные полоски в мосте Уинстона расположены одинаково по отношению к ОЛН (0° и 45°). По этому принципу в данной работе были разработаны два типа МРП (рис. 4) с различной длинной магниторезистивных полосок (рис. 4 а) и с одинаковой длиной магниторезистивных полосок(рис. 4 б).Так же в данных топологиях обеспечена возможность коррекции технологического разбаланса мостов посредством лазерного выжигания части подгоночных сопротивлений выделенных на рисунках темным контуром.

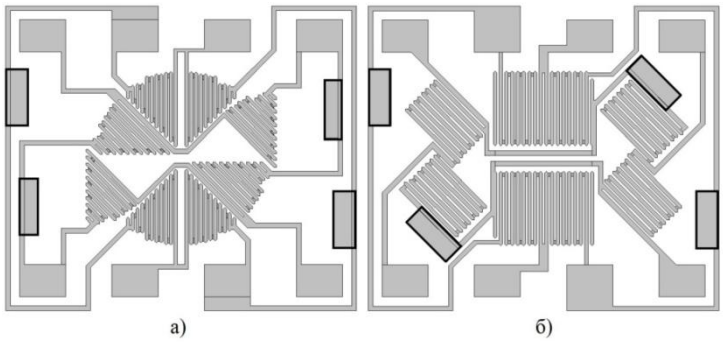


Рис.4. Эскиз топологии угловых МРП: а) топология первого типа; б) топология второго типа

На основе проведенных исследований выбрана структурадля изготовления МРП - сплав FeNiCo.За один цикл откачки рабочей камеры, установки электронно – лучевого напыления «Оратория – 9М»с безмасляной системой откачки путём последовательного вакуумного напыления на подложку, напыляют структуруFeNiCo – Ta – Cu – FeNiCo. Из которой путём фотолитографического травления через совмещенный фотошаблон сначала формируют контур моста Уинстона с рисунком проводящего слоя, включающим полоски, перемычки, проводники и контактные площадки, а затем, через другой фотошаблон магниторезистивные полоски и ПБ с образованием топологии моста Уинстона [7].

Функциональное назначение слоев следующее:

- первый слой FeNiCoявляется магниточувствительным,
- второй слой Ta – защитный слой, с большим удельным поверхностным сопротивлением, он практически не вносит вклада в сопротивление моста,
- третий слой Cu – проводящий слой, служит для формирования электрической разводки, перемычек, ПБ и контактных площадок,
- четвертый слой FeNiCo –защищает медь от окисления.

В работе были определены режимы напыления и фотолитографического травления структуры с использованием фоторезиста micropositS1813SP15. Точностьизготовления ширины элементов составила: для магниторезистивных полосок шириной 40 мкм не более 1,5 мкм, а для ПБ шириной 24 мкмне более 1 мкм.

Для снятия выходных напряжений с МРПиспользовался стенд включающий в себя: пульт управления, соленоид с 2000 витками создающий напряженность магнитного поля порядка 12 мТл, контактное приспособление для подачи напряжения и снятия выходных напряжений и 2 источника питания.На рис. 5представлены выходные напряжения МРП топологии первого типа (выходные напряжения МРП второго типа аналогичны). Так же на рисунке 5представлены графики функций *sin(2x)* и *cos(2x)* умноженные на амплитуду выходного сигнала.

Из рис. 5 видно, что угловые выходные характеристики мостов Уинстона МРП существенно не отличаются от расчетных функций *sin*и *cos* двойного угла. Выходная характеристика МРП соответствует заявленным параметрам датчика KMZ – 43T, что позволяет использовать его в датчиках угла поворота в качестве первичного преобразователя магнитного поля.

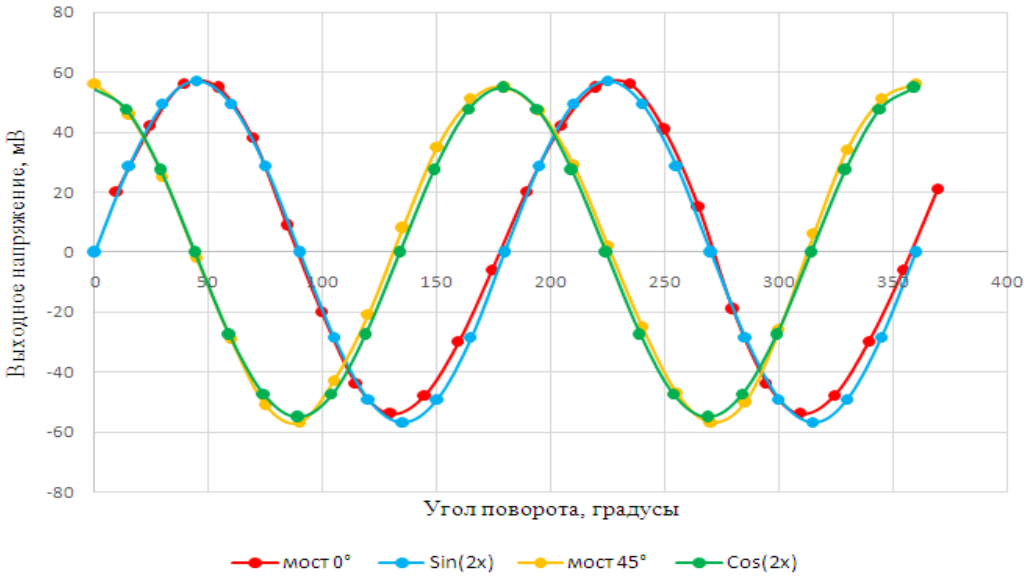


Рис. 5. Выходная характеристика двух измерительных мостов Уинстона в МРП с топологией первого типа (рисунок 4 а) в сравнении с функциями *Sin(2x)*и*Cos(2x)*

Выводы

1. Разработаны две конструкции МРП для датчика угла поворота. Для данного типа МРП применена полюс – Барберная структура для смещения тока в магниторезистивных полосках с целью получения минимального эффекта размагничивающих полей.

2. Разработаны МРП с угловой зависимостью по характеристикеаналогичной датчику KMZ – 43T фирмы Philips. В МРП предусмотрена возможность коррекции разбаланса мостов Уинстона за счет технологической операции лазерной подгонки сопротивлений плеч моста.

3. МРП позволяют использовать их в датчиках угла поворота в качестве первичного преобразователя магнитного поля.

Библиографический список

1. Борисов, А. Современные AMP датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей / А. Борисов // Компоненты и технологии,№7, 2006.
2. Касаткин, С.И.Анизотропные магниторезистивные датчики магнитного поля и тока / С.И. Касаткин, А.М. Муравьев, Н.В. Плотникова, А.Н. Сауров, [и др.] // Автоматика и телемеханика, №6, 2009.
3. Ширяев, Ю.Три кита бесконтактных датчиков положения HoneywellS&C: магнитное поле, инфракрасный свет и ультразвук / Ю.Ширяев // Компоненты и технологии,№1, 2011.
4. Ameличев, В.В.Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта / В.В. Ameличев, И.А. Гамарц И.А., С.И. Касаткин,В.В. Лопатин, [и др.] // Нано – и микросистемная техника, №2, 2010.
5. Преображенский, А.А.Магнитные материалы и элементы // А.А. Преображенский // издательство «Высшая школа», Москва, 1976.
6. Сысоева, С.Автомобильные датчики положения, современные технология и новые перспективы /С.Сысоева // Компоненты и технологии, №4, 2005.
7. ПатентРФ №2016105484/28 клH01L 43/12от 14.02.2017.

S.V. Gorokhov, A.V. Negin, V.E. Sergeev

DEVELOPMENT OF DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MAGNETORESISTIVE TRANSDUCERS FOR ANGLE SENSORS.

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"

This paper shows the results of the development of technology for manufacturing magnetoresistive transducers for angle sensors.The output electrophysics are similar to the sensors KMZ – 43Tof the company Philips.

Keywords: magnetoresistive transducers, angle sensors, Winston bridge, anisotropic magnetoresistive effect.

УДК 621.372.831

С.М. Гаранин, И.Н. Данилов, Н.А. Новоселова, С.Б. Раевский

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ЛЕММЕ ЛОРЕНЦА, ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНО-НЕРЕГУЛЯРНЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена развитию метода интегральных уравнений, основанного на лемме Лоренца, которое заключается в его адаптации для расчета характеристик передачи плавно-нерегулярных несоосных согласующих экранированных волноводных переходов прямоугольного поперечного сечения. Представлены основные преимущества предлагаемого метода по сравнению с существующими численными методами решения дифракционных задач. Разработан численно-аналитический алгоритм решения поставленной задачи, введено принципиально новое понятие: «4W-кратный волновод сравнения».

Ключевые слова: интегральные уравнения, лемма Лоренца, согласующий переход, задача оптимизации, электрический диполь, магнитный диполь, несоосные волноводы, 4W-кратный волновод сравнения, волновая поверхность.

Введение

Существующие в настоящее время системы автоматизированного проектирования (САПР), основанные на приближенных численных методах [1-2], как правило, позволяют рассчитывать лишь интегральные характеристики устройств, обходя четкое представление физики электромагнитных процессов, знание которых позволяет находить принципиально новые конструктивные решения. Препятствием к использованию указанных САПР в поисковых работах является также их, как правило, импортное происхождение, зачастую умышленно закрывающее доступ к внутренней структуре алгоритмов. Зарубежные алгоритмы расчета функциональных узлов высокочастотных диапазонов являются, как правило «черными ящиками», в которых нельзя отследить всю последовательность выполняемых расчетных операций, проанализировать физику происходящих в устройстве процессов, учесть несовершенство алгоритма расчета при выполнении нестандартных операций. При этом время расчета относительно сложных устройств с их помощью зачастую оказывается весьма значительным. В связи с этим, в современной технической электродинамике актуальным остается вопрос совершенствования существующих и создания новых методов решения краевых задач, к которым относятся дифракционные задачи о расчете характеристик передачи различных нерегулярных направляющих структур.

Основными целями настоящей работы являются: развитие метода интегральных уравнений, основанного на лемме Лоренца, заключающееся в его адаптации к расчету характеристик передачи несоосных согласующих экранированных волноводных переходов прямоугольного поперечного сечения; построение на основе указанного метода численно-аналитического расчетного алгоритма; его численная реализация и проверка достоверности получаемых результатов расчета.

Методика расчета характеристик передачи несоосного волноводного перехода

Область рассматриваемой волноведущей структуры представляет собой объем, ограниченный поверхностями S_1, S_2, S_3, в котором существуют электромагнитные поля $\vec{E}_1, \vec{H}_1$ и $\vec{E}_2, \vec{H}_2$, созданные соответственно источниками $\vec{j}_1^{e,m}$ и $\vec{j}_2^{e,m}$. Поверхность нерегулярной области S_2 описывается непрерывными функциями профиля продольного сечения $x=f_1(z)$, $x=f_2(z)$, $y=f_3(z)$ и $y=f_4(z)$. Поля $\vec{E}_1, \vec{H}_1$ переносят энергию в рассматриваемой структуре. Они удовлетворяют уравнениям Максвелла и граничным условиям:

$$E_\tau|_S = 0,\ H_n|_S = 0.$$

Исследуемая направляющая структура изображена на рис. 1.

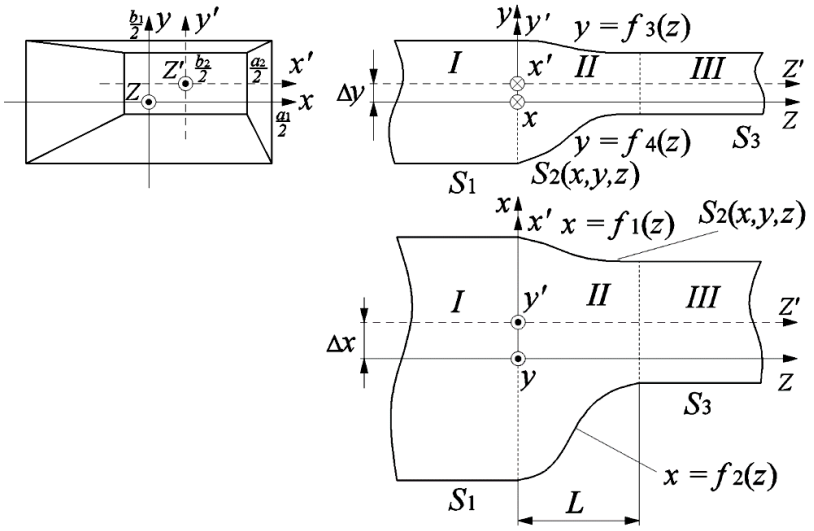


Рис. 1. Плавный переход между двумя несоосными прямоугольными волноводами

Источники $\vec{j}_2^{e,m}$ являются вспомогательными, и располагаются вблизи соединения экранированных волноводов.

Выбрав в качестве вспомогательных источников $\vec{j}_2^{e,m}$ электрические и магнитные диполи, следуя методике, предложенной в работе [3], получаем интегральные уравнения Фредгольма второго рода:

$$\int_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2\right] d\vec{S} = -I_0^e L E_1\left(\vec{r}_{j_2^e}\right);$$

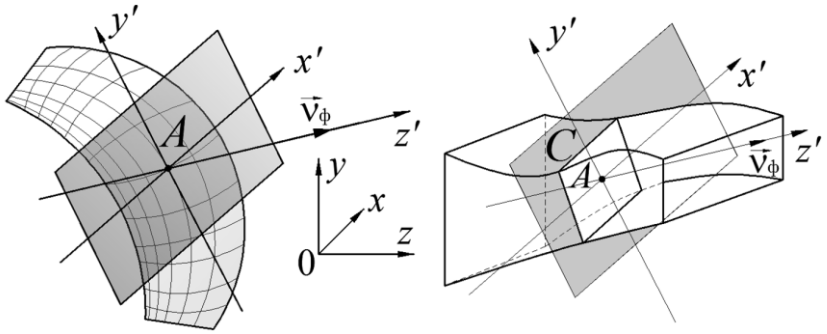
$$\int_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2\right] d\vec{S} = I_0^m L H_1\left(\vec{r}_{j_2^m}\right).$$

Первое уравнение соответствует случаю, когда вспомогательное поле создается электрическим диполем, второе – когда поле создается магнитным диполем. Здесь $\vec{r}$ и $\vec{r}_{j_2^{e,m}}$ – координаты точки наблюдения и точек вспомогательных источников, $I_0^{e,m}$ – амплитуды линейных электрических и магнитных токов на диполях, $\vec{L}$ – вектор, модуль которого равен значению длины диполя – L, а его направление соответствует ориентации диполя в пространстве. Записывая данные интегральные уравнения в точках, где расположены вспомогательные источники и выполняя численное интегрирование, получаем систему линейных алгебраических уравнений, которая решается относительно искомых интегральных характеристик исследуемого нерегулярного участка направляющей системы.

Рассмотрим структуру, изображенную на рис. 1. Пусть со стороны первого волновода падает одна из его собственных волн. В результате дифракции этой волны в нерегулярной области в первом волноводе возбуждается бесконечный набор отраженных волн с коэффициентами отражения R_{mn}^E (для волн типа E) и R_{mn}^H (для волн типа H), а во втором – бесконечный набор прошедших волн с коэффициентами прохождения B_{mn}^E (для волн типа E) и B_{mn}^H (для волн типа H).

Электромагнитную волну с неплоским фазовым фронтом в нерегулярной области направляющей структуры можно аппроксимировать набором локальных плоских волн, векторы фазовых скоростей которых нормальны по отношению к фронту

распространяющейся волны в каждой его точке. Волновая поверхность неплоской волны аппроксимируется плоскостью равных фаз, касательной по отношению к указанной поверхности в заданной точке *A* (рис. 2а). Пересечение полученной таким образом плоскости равных фаз и проводящей поверхности рассматриваемой направляющей структуры образует контур *C* (рис.2б) поперечного сечения волновода сравнения (ВС) [4].

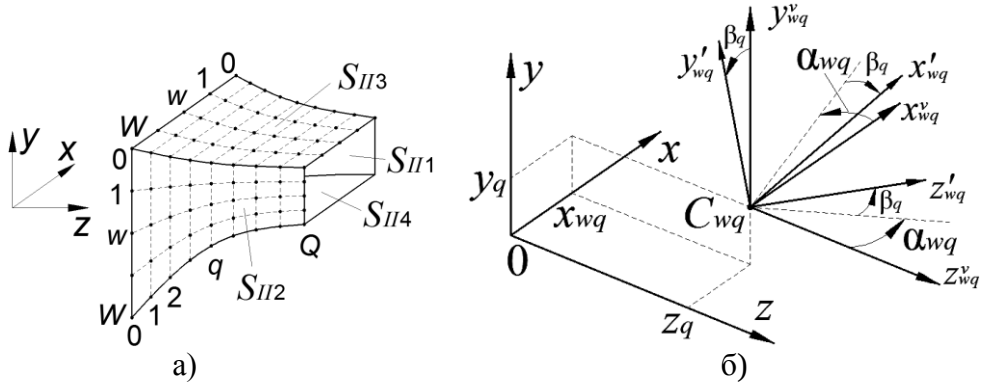


а) б)

Рис. 2. Аппроксимация волновой поверхности нерегулярного отрезка направляющей структуры плоскостью равных фаз в точке *A*

В точке *A* направление вектора фазовой скорости $\vec{v}_ф$ электромагнитной волны, распространяющейся в рассматриваемой направляющей структуре, совпадает с тем же вектором волны ВС, поперечное сечение которого ограничено контуром *C*. Таким образом, компоненты электромагнитного поля в точке *A* приближенно можно представить в виде сумм компонент полей собственных волн указанного ВС.

Рассмотрим процесс встраивания численного интегрирования в процедуру метода коллокаций, на основе которой предлагается производить алгебраизацию интегральных уравнений. На поверхности нерегулярной области строится сеть точек (рис. 3а), которые при численном интегрировании используются в качестве узлов. Декартову систему координат (*x*,*y*,*z*) назовем базовой (далее БСК). Возьмем точку C_{wq} на поверхности нерегулярной области S_{II3}, где *w* – индекс точки по оси *x* БСК, *q* – по оси *z* БСК. Введем понятие локальной системы координат $\left(x'_{wq}, y'_{wq}, z'_{wq}\right)$ (далее ЛСК). Под ЛСК будем понимать декартову систему координат, привязанную к поверхности каждого ВС: начало ЛСК размещается в узловой точке, две поперечные координатные оси (x'_{wq}, y'_{wq}) ЛСК откладываются в поперечном сечении ВС, продольная ось (z'_{wq}) – сонаправлена с вектором фазовой скорости электромагнитной волны в ВС, и соответственно, с вектором фазовой скорости волны, имеющей неплоскую волновую поверхность, в узловой точке нерегулярного участка направляющей структуры. Для получения формул преобразования координат, связывающих БСК и ЛСК используется промежуточная вспомогательная система координат $\left(x^v_{wq}, y^v_{wq}, z^v_{wq}\right)$ (ВСК). Начало ВСК (рис.3б) размещено в точке с координатами узла C_{wq}, а координатные оси x^v_{wq}, y^v_{wq} и z^v_{wq} параллельны осям *x*, *y* и *z* БСК, соответственно. Используя формулы преобразования координат, связывающие ЛСК, ВСК и БСК, получаем приближенную запись компонент полей в узловой точке C_{wq} на поверхности нерегулярной области S_{II3} в виде суперпозиции собственных волн регулярного ВС, построенного для указанной точки. Аналогичным образом получаем запись компонент полей для остальных точек на поверхности несоосного волноводного перехода.



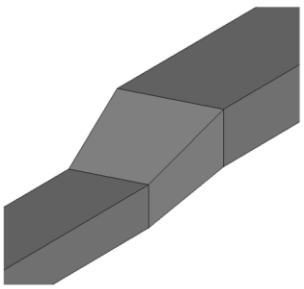
а) б)

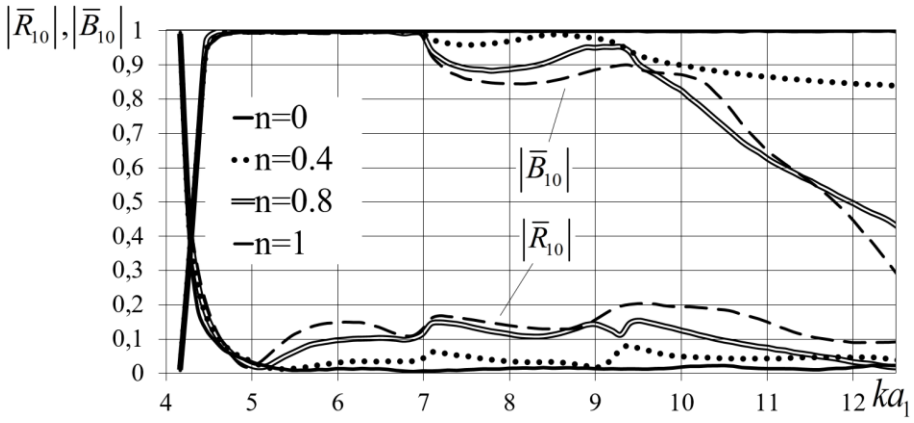
Рис. 3. Сеть узловых точек и взаимная ориентация ЛСК и БСК

Таким образом, в каждом сечении *z=const* в нерегулярной области структуры на каждой из поверхностей S_{II1}, S_{II2}, S_{II3} и S_{II4}, определяется по *W* узловых точек интегрирования. Для определения приближенных значений компонент полей, продольного и поперечного волновых чисел каждой из указанных точек ставится в соответствие свой ВС. Следовательно, для каждого поперечного сечения волноводного перехода можно ввести принципиально новое понятие: 4*W*-кратный ВС. Применение 4*W*-кратного ВС в разработанном алгоритме позволяет учесть такие важные физические эффекты, как изменение формы поверхности равных фаз распространяющейся электромагнитной волны в нерегулярной области направляющей структуры и смещение критических частот волн при несоосном соединении регулярных экранированных волноводов, что обеспечивает электродинамическую строгость алгоритма и повышает точность результатов расчета.

Результаты расчета исследуемого перехода

На рис. 4 представлены: внешний вид рассматриваемого волноводного перехода (рис. 4а) и результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $\left|\bar{R}_{10}^{H}\right|$ и прохождения $\left|\bar{B}_{10}^{H}\right|$ основной волны H_{10} при различных значениях смещения по координате *y* БСК оси второго волновода относительно оси первого на величину $\Delta y=nb_1$ (рис. 4б), где *n* – коэффициент смещения осей согласуемых волноводов. Результаты расчета получены в приближении *N*=10 при учете десяти распространяющихся и запредельных волн *H*- и *E*-типов по порядку следования их критических частот.





а) б)

Рис. 4. Характеристики передачи волноводного перехода

На рис. 5 совместно представлены результаты расчета характеристик передачи согласующего перехода со смещенной осью второго волновода относительно оси первого по координате *y* БСК на величину $\Delta y=0.4b_1$, полученные посредством предложенного алгоритма

и САПР CST Microwave Studio. Расхождение полученных результатов расчета не превышает 4.3%, что подтверждает корректность результатов, найденных посредством разработанного алгоритма.

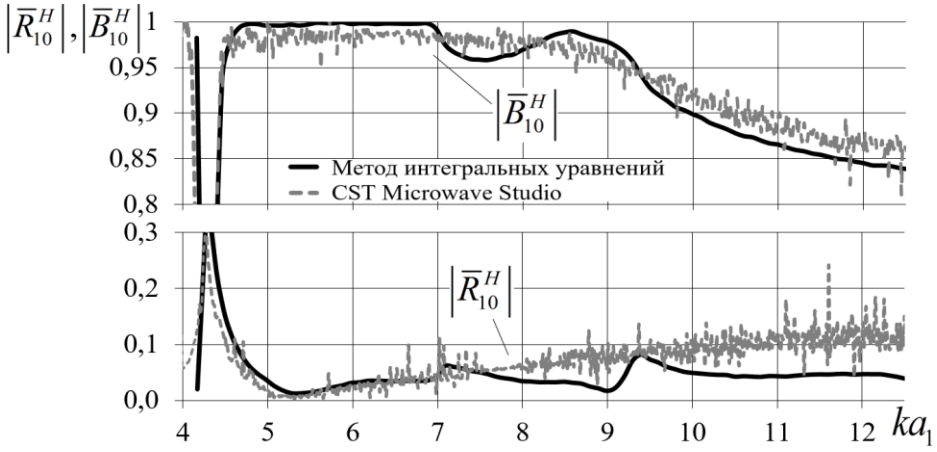
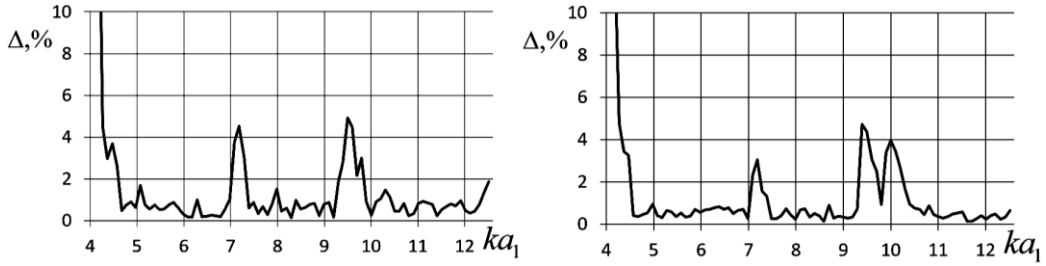


Рис. 5. Сравнение с результатами, полученными с помощью САПР

Основным критерием корректности результатов решения дифракционной задачи является точность выполнения закона сохранения энергии (ЗСЭ). Соотношение, из которого определяется значение относительной погрешности выполнения ЗСЭ, имеет вид:

$$\Delta = \left| \sum_{m,n} \left| \overline{R}_{mn}^{E,H} \right|^2 F^{E,H} + \sum_{m,n} \left| \overline{B}_{mn}^{E,H} \right|^2 K^{E,H} - 1 \right| \cdot 100\%,$$

где $\left|\overline{R}_{mn}^{E,H}\right|$ и $\left|\overline{B}_{mn}^{E,H}\right|$ – модули коэффициентов отражения и прохождения волн E_{mn} и H_{mn}, $F^{E,H}$ и $K^{E,H}$ – функции, зависящие от соотношений размеров согласуемых волноводов и волновых чисел электромагнитных волн, учитываемых в различных областях структуры. Строго говоря, для получения корректных результатов решения поставленной дифракционной задачи необходимо решить задачу оптимизации месторасположения вспомогательных источников. В рамках настоящей работы указанная задача решалась численно методом покоординатного спуска [5]. Было задано предельно допустимое значение погрешности выполнения ЗСЭ, составляющее 5%. Изменение координат вспомогательных источников и решение дифракционной задачи производились итерационно до достижения погрешности значения, меньшего заданного предельно допустимого. На рис. 6 представлены частотные зависимости относительной погрешности выполнения ЗСЭ для линейного волноводного перехода.



а) б)

Рис. 6. Зависимости относительных погрешностей выполнения ЗСЭ от нормированной частоты при смещении оси второго волновода относительно первого по оси *y* на величины: (а) – $\Delta y=0.4b_1$, (б) – $\Delta y=0.8b_1$

На рис. 7 приведены результаты исследования сходимости решения поставленной дифракционной задачи. Рис. 7а соответствует ka_1=7.69, 7б – ka_1=11.51. Из рисунка видно, что

при увеличении номера приближения относительная погрешность выполнения ЗСЭ Δ уменьшается и стремится к нулю. При этом различие численных значений модулей коэффициентов отражения и прохождения в девятом и десятом приближениях составляет примерно 0.6%. Таким образом, можно сделать вывод о наличии сходимости решений поставленной дифракционной задачи и корректности результатов расчета в выбранном приближении.

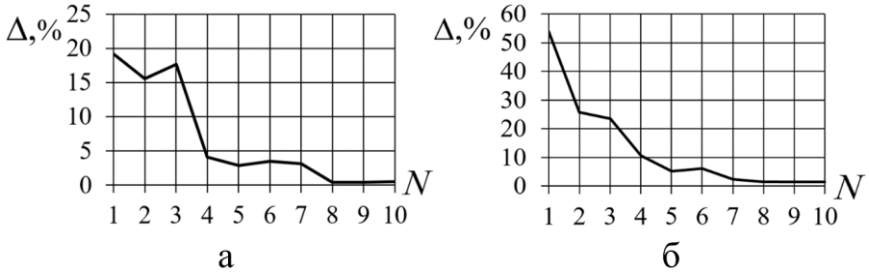


Рис. 7. Зависимости относительной погрешности выполнения ЗСЭ от номера приближения

Выводы

Основным результатом настоящей работы является развитие метода интегральных уравнений, основанного на лемме Лоренца. На основе указанного метода разработана методика алгебраизации системы исходных интегральных уравнений, основанная на методе коллокаций, и позволяющая построить простой расчетный алгоритм. При этом введен новый термин: 4W-кратный волновод сравнения. Кроме того, в работе приведены результаты численной реализации построенного алгоритма в виде результатов расчета частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения рассматриваемой направляющей структуры. Результаты расчета получены в конечном приближении с учетом как распространяющихся, так и запредельных волн высших типов. Корректность результатов расчета подтверждена многосторонней проверкой, включающей: исследование внутренней сходимости, сравнение с результатами современного лицензированного средства автоматизированного проектирования, а также проверку выполнения закона сохранения энергии.

Библиографический список

1. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев – М.: Наука, 1978. – 592 с.
2. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд – М.: Мир, 1979. – 392 с.
3. Раевский, С. Б. Метод интегральных уравнений для расчета нерегулярных волноводов / С. Б. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. – Т.12. – №3. – С. 34-37.
4. Каценеленбаум, Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б. З. Каценеленбаум – АН СССР, 1961. – 216 с.
5. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с., ил.

S.M. Garanin, I.N. Danilov, N.A. Novoselova, S.B. Raevskii

THE METHOD OF INTEGRAL EQUATIONS, BASED ON THE LORENTZ'S LEMMA, FOR THE CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL-IRREGULAR SHIELDED RECTANGULAR WAVEGUIDE TRANSITIONS

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

The present paper is devoted to the development of the method of integral equations, based on the Lorentz lemma. The development consists in adaptation of the method to the calculation of transmission characteristics of smoothly irregular misaligned matching shielded waveguide transitions of a rectangular cross section. The main advantages of the proposed method in comparison with the existing numerical methods for solving diffraction problems are presented. A numerical-analytical algorithm for solving the problem are developed, a fundamentally new term are introduced: «4W-fold comparison waveguide».

Key words: integral equations, Lorentz's lemma, matching transition, optimization problem, electric dipole, magnetic dipole, misaligned waveguides, 4W-fold waveguide of comparison, wave surface.

УДК 621.372.831

С.М. Гаранин, И.Н. Данилов, Н.А. Новоселова, С.Б. Раевский

РЕШЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЗАДАЧИ О РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ СКРУТКИ НА БАЗЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА, ОСНОВАННОГО НА ЛЕММЕ ЛОРЕНЦА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе предлагается метод интегральных уравнений, основанный на лемме Лоренца, для решения дифракционной задача о расчете характеристик передачи скрутки на базе экранированного прямоугольного волновода. На основе предлагаемого метода построен сравнительно простой расчетный алгоритм, не требующий значительных затрат машинного времени при его численной реализации. Для волноводных скруток с различными геометрическими параметрами получены результаты расчетов, корректность которых подтверждена их многосторонней проверкой.

Ключевые слова: лемма Лоренца, характеристики передачи, волноводная скрутка, вспомогательный источник, волновод сравнения.

Введение

Волноводные скрутки в настоящее время, как правило, применяются в устройствах СВЧ- и КВЧ-диапазонов и антенно-фидерных системах [1] для поворота плоскости поляризации распространяющихся в них электромагнитных волн. Для достижения хорошего согласования длина скрутки должна выбираться равной целому числу полуволн, а при широкополосном согласовании она должна быть не менее $(2 – 3)\lambda$ [2]. На практике не всегда удается применить сравнительно протяженные согласующие устройства (в частности волноводные скрутки) в силу жестких ограничений, накладываемых на массогабаритные показатели аппаратуры (подвижные радиолокационные комплексы, летательные аппараты, бортовая аппаратура систем спутниковой навигации и т.д.). В связи с этим существенное практическое значение имеет всестороннее исследование частотных зависимостей характеристик передачи при различных значениях угла поворота контура поперечного сечения в конце скрутки относительно того же контура в ее начале, и при различных значениях длины волноводной скрутки для обеспечения возможности проектирования максимально компактного устройства с требуемыми для выполнения конкретной задачи характеристиками. Для решения задачи проектирования функциональных узлов СВЧ- и КВЧ-диапазонов в настоящей работе предлагается метод интегральных уравнений, основанный на лемме Лоренца [3]. Указанный метод имеет целый ряд достоинств: сравнительная простота процедуры алгебраизации; физическая и математическая обоснованности; возможность априорного анализа ожидаемых результатов и физических процессов, происходящих в рассчитываемом устройстве; электродинамическая прозрачность расчетного алгоритма; а также универсальность в плане расчета экранированных направляющих структур с произвольными геометрическими параметрами.

Цель настоящей работы заключается в адаптации метода интегральных уравнений, основанного на лемме Лоренца, к расчету характеристик передачи волноводных скруток прямоугольного поперечного сечения, а также в построении на его основе численно-аналитического расчетного алгоритма и в его численной реализации.

Краткое описание алгоритма расчета характеристик передачи волноводной скрутки

Интегральные уравнения, решаемые относительно неизвестных характеристик передачи рассматриваемой направляющей структуры, имеют [4] вид:

$$\int_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2\right] d\vec{S} = -I_0^e L E_1\left(\vec{r}_{j_2^e}\right);$$

$$\int_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2\right] d\vec{S} = I_0^m L H_1\left(\vec{r}_{j_2^m}\right).$$

Здесь $\left(\vec{E}_1, \vec{H}_1\right)$ – электрическое и магнитное поля распространяющихся в структуре волн, $\left(\vec{E}_2, \vec{H}_2\right)$ – поля, создаваемые вспомогательными источниками (электрическими и магнитными диполями); $\vec{r}$ и $\vec{r}_{j_2^{e,m}}$ – координаты точки наблюдения и точек вспомогательных источников, $I_0^{e,m}$ – амплитуды линейных электрических и магнитных токов на диполях, $\vec{L}$ – вектор, модуль которого равен значению длины диполя – L, а его направление соответствует ориентации диполя в пространстве.

Внешний вид и схематическое изображение волноводной скрутки изображены на рис. 1.

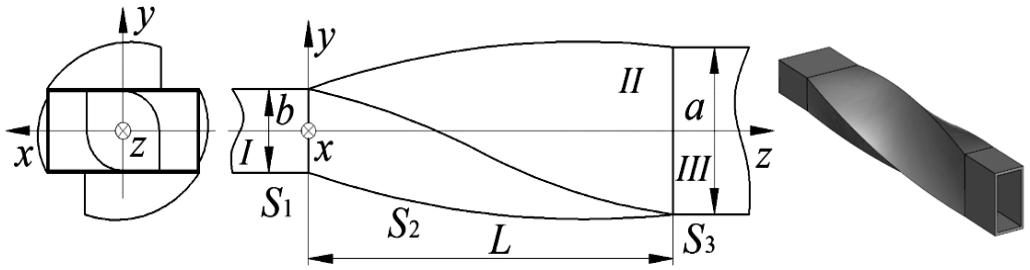
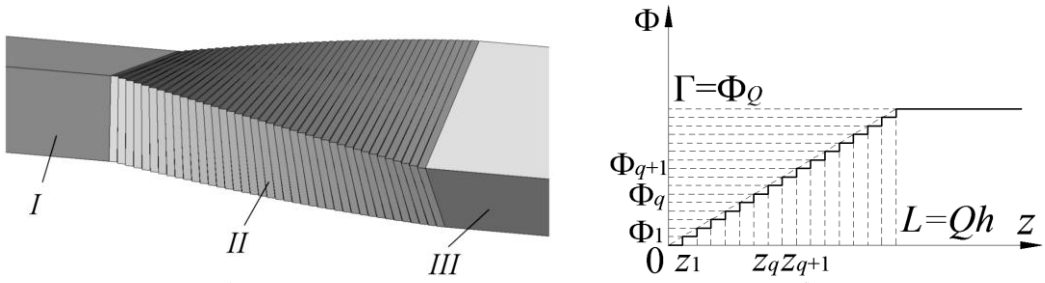


Рис. 1. Изображение скрученного волновода прямоугольного поперечного сечения

При решении задачи в приближении N, имеем $4N$ неизвестных амплитудных коэффициентов. Следовательно, интегральные уравнения необходимо записывать в $4N$ точках, где располагаются вспомогательные источники. Вычисляя интегралы в левых частях исходных уравнений, получаем систему линейных алгебраических уравнений порядка $4N$, которая решается относительно комплексных амплитудных коэффициентов учитываемых волн.

Для получения приближенной записи компонент полей на поверхности волноводной скрутки ее необходимо представить в виде модели ступенчатого скрученного волновода, то есть в виде каскадного соединения конечного числа регулярных волноводов сравнения (ВС) [5], как изображено на рисунке 2а.



а) б)

Рис. 2. Модель ступенчатого скрученного волновода

На рисунке 2б представлена зависимость угла поворота контура поперечного сечения рассматриваемой направляющей структуры от продольной координаты z. Систему координат (x,y,z) будем называть базовой (БСК). Привяжем к поверхности каждого ВС свою декартову систему координат, которую будем называть локальной (ЛСК). Взаимная ориентация БСК и ЛСК q-того ВС модели волноводной скрутки представлена на рисунке 3.

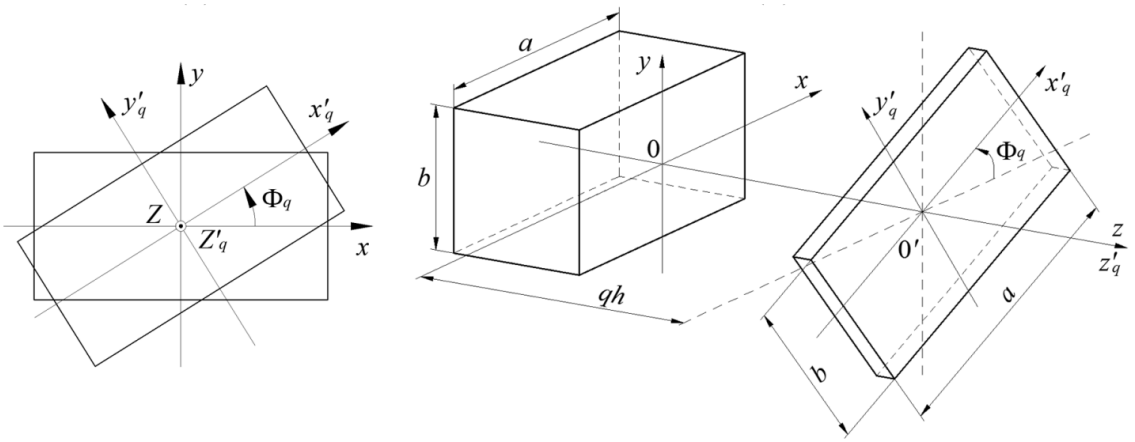


Рис. 3. Взаимная ориентация БСК и ЛСК в исследуемой волноведущей структуре

Следовательно, формулы преобразования координат, связывающие БСК и ЛСК q-того ВС, имеют [6] вид:

$$x'_q = x\cos\left(\Phi_q\right) + y\sin\left(\Phi_q\right);$$

$$y'_q = -x\sin\left(\Phi_q\right) + y\cos\left(\Phi_q\right).$$

Используя вышеуказанные формулы продольные компоненты электрического и магнитного полей E- и H-волн можно записать в виде:

$$E_z^{E(II)} = A_{mn}^E\left(\chi_{mn}^{(II)}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi m}{a}\left(x\cos\left(\Phi_q\right) + y\sin\left(\Phi_q\right) + \frac{a}{2}\right)\right)\sin\left(\frac{\pi n}{b}\left(-x\sin\left(\Phi_q\right) + y\cos\left(\Phi_q\right) + \frac{b}{2}\right)\right)e^{-j\beta_{mn}^{(II)}z} +$$

$$+\sum_{m,n=0}^{\infty} C_{mn}^E\left(\chi_{mn}^{(II)}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi m}{a}\left(x\cos\left(\Phi_q\right) + y\sin\left(\Phi_q\right) + \frac{a}{2}\right)\right)\sin\left(\frac{\pi n}{b}\left(-x\sin\left(\Phi_q\right) + y\cos\left(\Phi_q\right) + \frac{b}{2}\right)\right)e^{j\beta_{mn}^{(II)}z};$$

$$H_z^{H(II)} = A_{mn}^H\left(\chi_{mn}^{(II)}\right)^2 \cos\left(\frac{\pi m}{a}\left(x\cos\left(\Phi_q\right) + y\sin\left(\Phi_q\right) + \frac{a}{2}\right)\right)\cos\left(\frac{\pi n}{b}\left(-x\sin\left(\Phi_q\right) + y\cos\left(\Phi_q\right) + \frac{b}{2}\right)\right)e^{-j\beta_{mn}^{(II)}z} +$$

$$+\sum_{m,n=0}^{\infty} C_{mn}^H\left(\chi_{mn}^{(II)}\right)^2 \cos\left(\frac{\pi m}{a}\left(x\cos\left(\Phi_q\right) + y\sin\left(\Phi_q\right) + \frac{a}{2}\right)\right)\cos\left(\frac{\pi n}{b}\left(-x\sin\left(\Phi_q\right) + y\cos\left(\Phi_q\right) + \frac{b}{2}\right)\right)e^{j\beta_{mn}^{(II)}z}.$$

Здесь $\chi_{mn}^{(II)}$, $\beta_{mn}^{(II)}$ – поперечное и продольное волновые числа в области волноводной скрутки, Φ_q – угол поворота контура поперечного сечения q-того ВС относительно контура первого регулярного волновода.

Выражение, определяющее поперечное волновое число в рассматриваемой направляющей структуре, имеет вид:

$$\chi_{mn}^{(II)} = \sqrt{\left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2}.$$

Выражение, определяющее связь продольного и поперечного волновых чисел имеет вид:

$$\varepsilon\mu\omega^2 = \left(\chi_{mn}^{(II)}\right)^2 + \left(\beta_{mn}^{(II)}\right)^2.$$

Подставляя в исходные интегральные уравнения компоненты полей учитываемых волн в первом, втором регулярных волноводах и в области волноводной скрутки, а также компоненты полей вспомогательных источников, вычисляя поверхностные интегралы, входящие в состав указанных уравнений, получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая решается относительно неизвестных амплитудных коэффициентов волн.

Результаты расчета характеристик передачи волноводной скрутки

На рисунке 4 изображены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $\left|\bar{R}_{10}^{H}\right|$ и прохождения $\left|\bar{B}_{10}^{H}\right|$ основной волны H_{10} при различных значениях длины волноводной скрутки (угол ее поворота составляет 90°). Результаты расчета получены в многомодовом режиме в приближении N=10 при учете как распространяющихся, так и запредельных (реактивно затухающих) волн E- и H-типов.

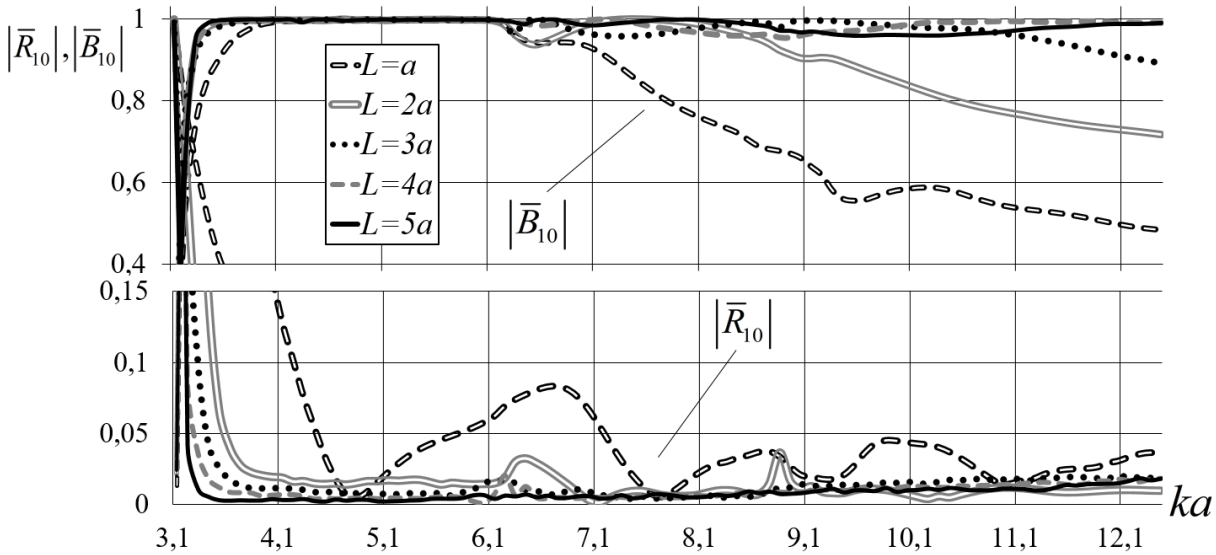


Рис. 4. Характеристики передачи основной волны волноводной скрутки при различных значениях ее длины

Как видно из рисунка 4 кривые модулей коэффициентов отражения и прохождения волны H_{10} имеют сложную немонотонную частотную зависимость, связанную с особенностями энергетического обмена волны H_{10} с волнами высших типов в исследуемой направляющей структуре.

При решении поставленной задачи основным критерием корректности результатов является минимизация погрешности выполнения закона сохранения энергии (ЗСЭ). Погрешность определяется из соотношения:

$$\Delta = \left| \sum_{m,n} \left| \bar{R}_{mn}^{E,H} \right|^2 F^{E,H} + \sum_{m,n} \left| \bar{B}_{mn}^{E,H} \right|^2 K^{E,H} - 1 \right| \cdot 100\%,$$

где $\left|\bar{R}_{mn}^{E,H}\right|$ и $\left|\bar{B}_{mn}^{E,H}\right|$ – модули коэффициентов отражения и прохождения волн E_{mn} и H_{mn}, $F^{E,H}$ и $K^{E,H}$ – функции, зависящие от соотношений размеров согласуемых волноводов и волновых чисел электромагнитных волн, учитываемых в различных областях структуры. При этом результаты расчета считаются корректными если значение погрешности не превышает 5%.

На рисунке 5 совместно представлены результаты расчета характеристик передачи рассматриваемой направляющей структуры при длине волноводной скрутки L=4a, полученные посредством предлагаемого алгоритма и средства автоматизированного проектирования (САПР) CST Microwave Studio [7]. Угол поворота волноводной скрутки Г=90°.

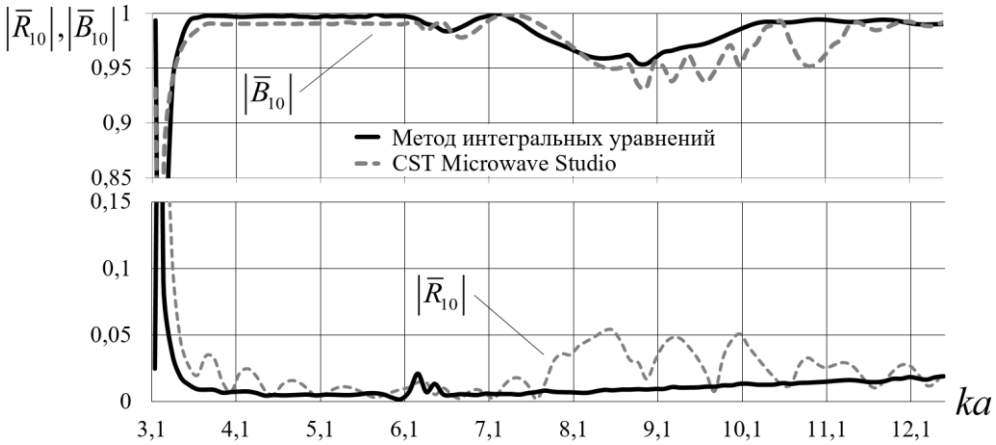


Рис. 5. Сравнение с результатами, полученными посредством САПР

Сравнение результатов, представленных на рисунке 5 позволяет сделать вывод о хорошем качественном и количественном совпадении результатов расчета в исследуемом диапазоне нормированных частот (расхождение результатов не превышает 3.5%).

На рисунке 6 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения волн высших типов волноводной скрутки длиной L=5a с углом ее поворота Г=90°. Кривые 1 и 2 на рисунке – соответственно, модули коэффициентов отражения и прохождения волны H_{10}, кривые 3 и 4 – волны H_{20}, кривая 5 – коэффициент прохождения волны H_{01}, 6 и 7 – модули коэффициентов отражения и прохождения волны H_{21}, 8 и 9 – волны E_{21}, 10 – коэффициент отражения волны H_{30}.

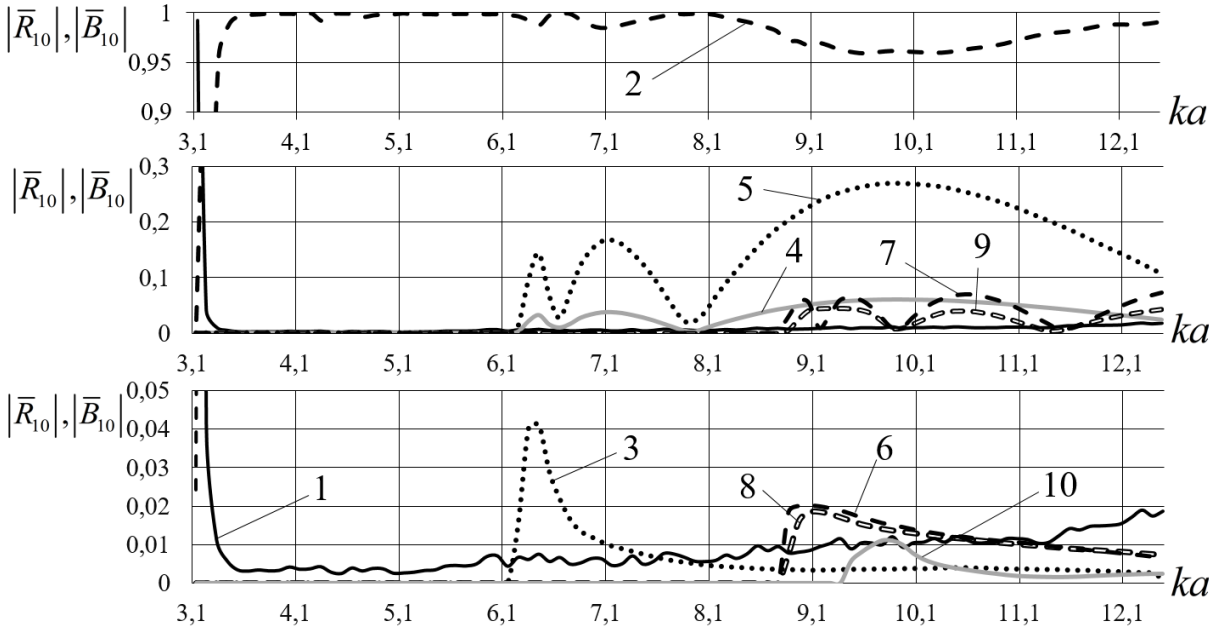
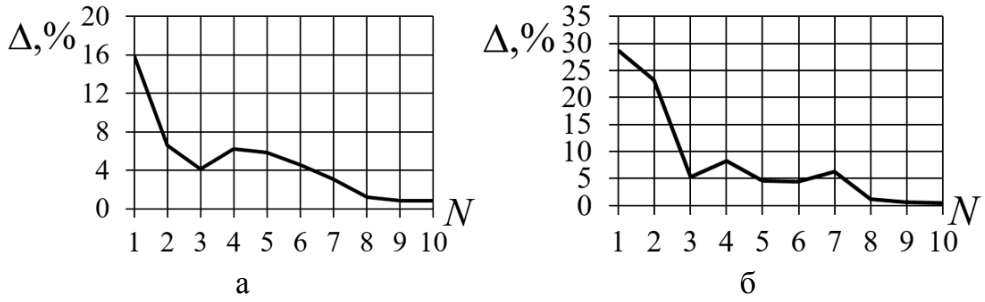


Рис. 6. Характеристики передачи волн высших типов волноводной скрутки

Для оценки обоснованности разработанного на основе метода интегральных уравнений расчетного алгоритма в рамках настоящей работы проведено исследование сходимости решения поставленной дифракционной задачи. Результаты исследования изображены на рисунке 7. Из него видно, что при увеличении номера приближения относительная погрешность выполнения ЗСЭ уменьшается и стремится к нулю, что подтверждает наличие указанной выше сходимости. Кроме того, относительное расхождение результатов расчета характеристик передачи в приближениях N=9 и N=10 не превышает 0.2%. Дальнейшее увеличение номера приближение приводит к существенному

возрастанию порядка СЛАУ при незначительном изменении результатов расчета, что подтверждает корректность выбора рабочего приближения (N=10).



а б

Рис. 7. Результаты исследования сходимости решения поставленной дифракционной задачи

Выводы

Метод интегральных уравнений, основанный на лемме Лоренца, адаптирован к расчету частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения экранированной скрутки на базе прямоугольного волновода. Разработан сравнительно простой расчетный численно-аналитический алгоритм, не требующий значительных затрат вычислительных ресурсов ЭВМ. Для корректного представления компонент полей на поверхности нерегулярной области рассматриваемой направляющей структуры последняя аппроксимирована моделью скрученного ступенчатого волновода. Получены результаты расчетов характеристик передачи как основной, так и волн высших типов рассматриваемой направляющей структуры. Оценка корректности полученных результатов расчета осуществлена путем их сравнения с результатами, полученными с помощью САПР СВЧ, проверкой выполнения ЗСЭ, а также исследованием внутренней сходимости.

Библиографический список

1. Левин, Л. Теория волноводов. Методы решения волноводных задач / Л. Левин // Под ред. В. И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 312 с., ил.
2. Харвей, А. Ф. Техника сверхвысоких частот. Том 1 / А. Ф. Харвей. – М.: Советское радио, 1965. – 784 с.
3. Белов, Ю. Г. О расчете гофрированных волноводов / Ю. Г. Белов, С. Б. Раевский // Изв. ВУЗов СССР – Радиофизика. – 1975. – Т.18. – №10. – С. 1523-1527.
4. Раевский, С. Б. Метод интегральных уравнений для расчета нерегулярных волноводов / С. Б. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. – Т.12. – №3. – С. 34-37.
5. Каценеленбаум, Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б. З. Каценеленбаум – АН СССР, 1961. – 216 с.
6. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
7. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А. А. Курушин, А. Н. Пластиков – М.: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.

S.M. Garanin, I.N. Danilov, N.A. Novoselova, S.B. Raevskii

THE SOLUTION OF THE DIFFRACTION PROBLEM OF CALCULATION OF TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF TWIST ON THE BASIS OF THE RECTANGULAR WAVEGUIDE USING THE METHOD, BASED ON LORENTZ'S LEMMA

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

In this paper, we propose the method of integral equations based on the Lorentz's lemma to solve the diffraction problem of calculating the transmission characteristics of the twist on the basis of a shielded rectangular waveguide. On the basis of the proposed method, a relatively simple computational algorithm is constructed that does not require significant computer time in its numerical implementation. For waveguide twists with different geometric parameters, the results of calculations are obtained, the correctness of which is confirmed by their multilateral verification.

Key words: Lorentz's lemma, transmission characteristics, waveguide twist, auxiliary source, waveguide of comparison.

УДК 621.3.029.6

Т.Л. Гудина, Ю.А. Светлаков

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ПОДЛОЖКАХ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ВК 100-1 С МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ДЛЯ НЧ И СВЧ МИКРОПЛАТ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Разработана технология лазерной размерной обработки отверстий, в том числе сложной формы, в подложках из керамического материала ВК 100-1 с нанесенной топологией и металлизацией, используемая при изготовлении НЧ и СВЧ микроплат.

Ключевые слова: лазерная размерная обработка, керамический материал ВК 100-1, микроплата, металлизация.

В настоящее время получила распространение лазерная размерная обработка материалов благодаря таким преимуществам, как автоматизация выполнения операции, высокая скорость обработки, точность изготовления деталей и др.

Ранее в «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» была разработана и внедрена в производство технология лазерной размерной обработки отверстий в подложках из керамического материала ВК 100-1 (поликора) без нанесенной металлизации, применяемая, например, при изготовлении переходных или теплопроводных отверстий в гибридных тонкопленочных микроплатах [1].

Однако нередко возникают задачи получения отверстий и пазов сложной формы или нескольких отверстий различных диаметров в подложках из поликора с ранее нанесенной топологией на лицевой стороне и с металлизацией обратной стороны, используемых например, в качестве установочных при изготовлении тонкопленочных микроплат СВЧ диапазона для ВЧ блоков. Ранее такие отверстия и пазы или изготавливались методом сверления алмазными сверлами, что достаточно трудоемко, или их изготовление было невозможно, например, при сложной форме отверстий.

Цель проведенной работы – разработка технологии размерной обработки отверстий, в том числе сложной формы, в подложках из керамического материала ВК 100-1 с нанесенной топологией на лицевой стороне и с металлизацией обратной стороны методом лазерной обработки с точностью и качеством обработанных поверхностей в соответствии с требованиями, предъявляемыми нормативной документацией к изготовлению НЧ и СВЧ микроплат (точность обработки, отсутствие трещин, грата, количество и размер сколов, оплавление металлизации). Работа проводилась в рамках совершенствования структуры технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ устройств бортовых радиоэлектронных устройств, разрабатываемых в «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» последние годы [2].

Исследование технологии лазерной размерной обработки проводилось на подложках из материала ВК 100-1 толщиной 0,5 мм и 1 мм, с пленочными элементамина лицевой стороне микроплат (материал элементов - ванадий-медь-золото)и металлизацией обратной стороны (материал металлизации - ванадий-медь-золото и ванадий-медь-олово-висмут).

Очевидно, что отверстия и пазы на микроплате могут располагаться с лицевой стороны как на пленочном элементе, так и в свободной от топологии зоне, а с обратной стороны как в зоне металлизации, так и в свободной от металлизации зоне.

Производить лазерную обработку отверстий, расположенных с лицевой стороны на элементе топологии, было признано нецелесообразным в связи с тем, что после лазерной обработки на лицевой стороне возникает большое количество грата, а его удаление приводит к дефектам покрытия (царапинам).

Поэтому исследования проводились для двух вариантов расположения вырезаемых элементов в микроплатах:

1. Вырезаемые элементы расположены с лицевой стороны в свободных от топологии зонах(материал элементов топологии - ванадий-медь-золото),с обратной - в свободных от металлизации зонах (материал металлизации - ванадий-медь-золото).

2. Вырезаемые элементы расположены с лицевой стороны в свободных от топологии зонах(материал элементов топологии - ванадий-медь-золото), с обратной - в зоне металлизации (материал металлизации - ванадий-медь-олово-висмут).

Обработка отверстий выполнялась на лазерной установке МЛП1-015-ЛД (производства ЗАО «НПП ЭСТО»). В качестве источника лазерного излучения на установке используется твердотельный импульсный волоконный лазер YLR-150/1500-QCW с диодной накачкой и длиной волны излучения 1,07 мкм. На установке управление параметрами лазерного излучения (энергия, частота, длительность и форма импульса) и технологическими параметрами (количество обходов, скорость обхода контура и др.) производится от ЧПУ-системы. Обработка производится по управляющей программе, создаваемой в системе программирования, которая использует для построения траектории обработки графическую информацию (чертеж), созданную в графических редакторах (CAD-системы, Corel-Draw и др.). Это позволяет изготавливать детали с отверстиями сложной конфигурации и разнообразным взаимным расположением.

В результате экспериментальных работ были подобраны значения параметров лазерного излучения и технологических параметров обработки.

Для обработки был выбран импульсный режим лазерного излучения с прямоугольной формой импульса и с малой длительностью. С энергетической точки зрения импульсный режим работы лазера для микрообработки предпочтительней, чем непрерывный [3]. Это связано с тем, что при импульсном режиме пороговая плотность мощности излучения, необходимая для процесса обработки, меньше чем при непрерывном, поэтому испарение материала на импульсном режиме происходит при меньших значениях мощности излучения. Применение импульса с прямоугольной формой обусловлено тем, что импульсы с более быстрым ростом и спадом обеспечивают доставку мощности к рабочей зоне, превышающей уровень порога обработки материалов, поэтому оптимальным является импульс с короткими передним и задним фронтом [3].

Уменьшение длительности импульса также ведет к снижению пороговой плотности мощности[3].Чем меньше длительность импульса лазерного излучения, тем меньшее тепловое и деформационное влияние оно оказывает на обрабатываемый материал вне зоны обработки: если импульс достаточно короткий, а плотность энергии достаточно высока, то малый объем материала может быть расплавлен и испарен до того, как тепло из зоны облучения успеет распространиться в окружающий материал [4]. Исходя из этого, в процессе обработки применялись импульсы лазерного излучения с минимально возможной длительностью для данного лазера (0,2 мс).

Значения энергии импульса выбирались минимально возможными для сквозного прорезания поликоровых подложек. При этом для прорезания подложек толщиной 1 мм необходимые значения энергии импульса приблизительно в 2 раза больше, чем для подложек толщиной 0,5 мм. Для вырезания отверстий в свободных от топологии и металлизации зонах требуются более высокие значения энергии импульса, чем при расположении вырезаемых отверстий в зоне металлизации, в связи с большим поглощением лазерного излучения металлизированным поликором.

При выбранных значениях энергии импульса подбирались значения частоты модуляции импульсов. Было выявлено, что данный параметр значительно влияет именно на оплавление металлизированного слоя, что объясняется, вероятно, сильным разогреванием слоя металла при большой частоте импульсов с достаточно большой энергией. Далее для выбранных значений частоты модуляции импульсов выбирались значения скорости обхода

контура лазерным лучом: при повышении скорости не производилось сквозного прорезания подложки, так как контур не успевал перекрываться точечными импульсами, при низкой скорости обхода контура наблюдалось увеличение оплавления металлизации в связи с повышенным разогревом слоя металлизации в зоне обработки.

При лазерной обработке на выбранных режимах было определено минимальное расстояние от границы отверстия, вырезаемого в зонах, свободных от топологии и металлизации, до металлизированного слоя- 0,2 мм (при меньшем расстоянии -недопустимое нормативной документацией оплавление металлизации). Фотографии обработанных отверстий (пазов) представлены на рис. 1.

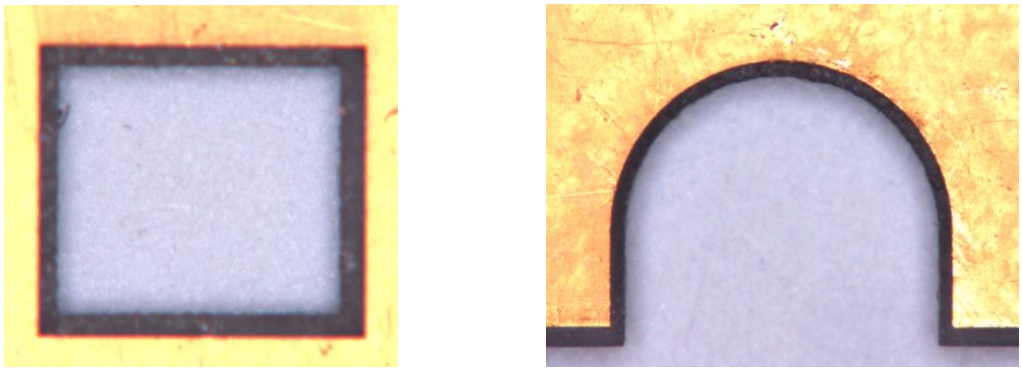


Рис. 1 - Фотографии отверстий в поликоровой подложке, обработанных лазерным методом, расстояние до металлизации (ванадий-медь-золото) - 0,2 мм

Также была определена максимальная ширина зоны оплавления металлизации при лазерной вырезке отверстий, расположенных с обратной стороны в зоне сплошной металлизации:0,5 мм – для подложек толщиной 0,5 мм, и 0,8 мм - для подложек толщиной 1 мм (что связано с более высокими значениями энергии импульсов, необходимыми для сквозной прошивки заготовок большей толщины).

Выбранные сочетания параметров лазерного излучения и технологических параметров обработки позволяют производить размерную обработку элементов подложек толщиной до 1 мм с точностью по 11 – 12 квалитету с требуемым качеством для изготовления НЧ и СВЧ микроплат. На рис. 2 представлены фотографии микроплаты с отверстиями, расположенными с лицевой и обратной сторон в свободных от топологии и металлизации зонах(материал элементов топологии и металлизации - ванадий-медь-золото).

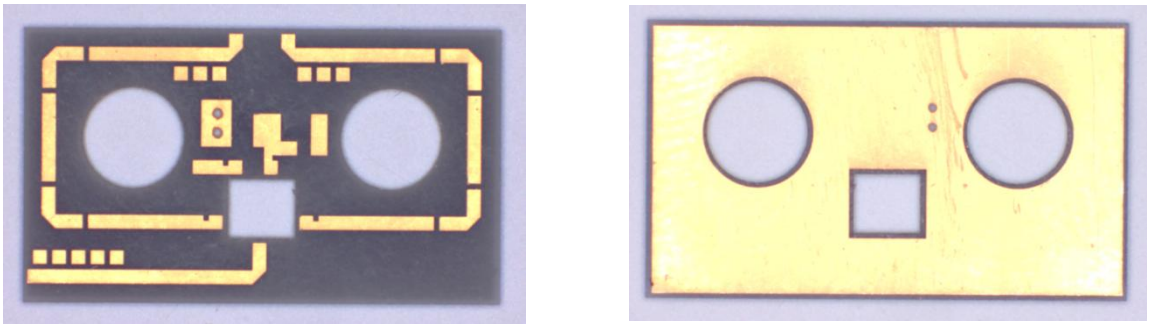


Рис. 2 - Фотографии микроплаты с топологий на лицевой и металлизацией на обратной стороне (материал элементов топологии и металлизации ванадий-медь-золото)

На рис. 3 представлены фотографии микроплаты с отверстиями, расположенымис лицевой стороны в свободных от топологии зонах(материал элементов топологии - ванадий-

медь-золото), с обратной - в зоне металлизации (материал металлизации - ванадий-медь-олово-висмут).

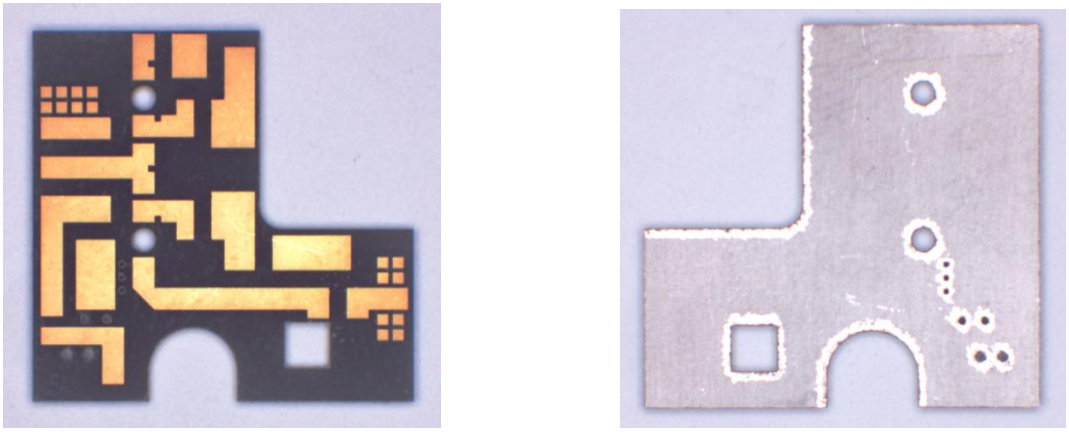


Рис. 3 - Фотографии микроплаты с топологий на лицевой и металлизацией на обратной стороне (материал элементов топологии -ванадий-медь-золото, материал металлизации - ванадий-медь-олово-висмут)

В результате проведенных работ был разработан и внедрен в производство технологический процесс «Обработка деталей на лазерной машине МЛП1-015-ЛД», который обеспечивает вырезку элементов микроплат с нанесенными топологией и металлизацией с точностью по 11 - 12 квалитетам в подложках из керамического материала ВК 100-1 при изготовлении СВЧ и НЧ микроплат. Минимальные линейные размеры вырезаемого контура (диаметр отверстия) – 0,2 мм; размеры сколов на острых кромках вырезаемого контура - не более 0,2 мм, минимальное расстояние от вырезаемых элементов до металлизации – 0,2 мм; ширина зоны оплавления металлизации на обратной стороне заготовки толщиной 0,5 мм – 0,5 мм, заготовки толщиной 1 мм - 0,8 мм, отсутствие трещин, изменения цвета материала, минимальное количество грата и др. Разработка и внедрение данного технологического процесса расширили возможности технологического обеспечения проектирования и изготовления радиоэлектронных компонентов, в том числе ВЧ и СВЧ устройств в.

Выводы

Разработана технология лазерной размерной обработки отверстий, в том числе сложной формы, в подложках из керамического материала ВК 100-1 с нанесенной топологией на лицевой стороне и с металлизацией обратной стороны с точностью и качеством обработанных поверхностей в соответствии с требованиями, предъявляемыми нормативной документацией к изготовлению НЧ и СВЧ микроплат.

Результаты работы позволили расширить возможности технологической базы [5]«НИИИС им. Ю.Е. Седакова», в частности размерной обработки микроплат, для проектирования и изготовления СВЧ устройств.

Библиографический список

1. Гудина Т.Л., Разработка технологии лазерной обработки отверстий в подложках из керамического материала ВК 100-1 для НЧ и СВЧ микроплат/: Т.Л. Гудина, Ю.А. Светлаков // Материалы XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2016. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016.- С. 125.
2. Козлов, В.А. Структура технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ устройств / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Информационные системы и технологии ИСТ-2011: Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – С. 92-93.
3. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка/ В.П. Вейко// Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО (ТУ), 2005.–110 с.
4. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. Учебное пособие/ В.А. Парфенов// Санкт-Петербург, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. -.59 с.
5. Светлаков, Ю.А. Совершенствование и развитие технологической базы проектирования и изготовления СВЧ устройств/ Ю.А. Светлаков //: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2017 – Нижний Новгород, НГТУим. Р.Е. Алексеева, 2017. – С. 1344-1349.

T.L. Gudina, Yu.A. Svetlakov

ENGINEERING OF THE TECHNOLOGY OF LASER DIMENSIONAL PROCESSING OF HOLES IN SUBSTRATES FROM CERAMICS ВК100-1 WITH METALLIZATION FOR MICROPLATES OF LF AND UHF RANGES

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”

The technology of laser dimensional processing of holes (including the difficult form of holes) in substrates from ceramics ВК100-1 (Russia) is developed. There is a topology (metallization) on surfaces of substrates. The technology is used at manufacturing of microplates of LF and UHF ranges.

Keywords: laser dimensional processing, ceramics ВК100-1, microplates, metallization.

УДК 621.396.6.002.72

Т.Л. Гудина, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ КВЧ ДИАПАЗОНА.

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Рассматривается структурная схема технологического процесса формирования излучающего полотна волноводно-щелевой антенной решетки при проектировании и изготовлении, применяемой на предприятии-разработчике СВЧ устройств.

Ключевые слова: СВЧ компоненты, электроэрозионная размерная обработка, технологическое обеспечение, ВЩАР, системное проектирование.

При системном подходе к проектированию СВЧ компонентов бортовых РЛС [1], эффективность технологического обеспечения проектирования и изготовления компонентов [2] во многом зависит от имеющейся в распоряжении разработчика технологической базы [3], формирование и совершенствование которой является непрерывным процессом и осуществляется одновременно с самими проектированием и изготовлением [4]. Технологическое обеспечениепроектирования и изготовления устройств и их компонентов [2]в значительной мере влияет на конструктивное исполнение деталей, узлов и устройства в целом, а также на их надежность в процессе эксплуатации, стабильность технических характеристик при воздействии дестабилизирующих факторов.

При проектировании волноводно-щелевых антенных решеток (ВЩАР) КВЧ диапазона, в процессе анализа имеющихся и необходимых дополнительных технологических средств [2, 3], одной из решаемых задач был выбор методов и технологий, применяемых для их изготовления [5]. Данный анализ показал, что для формирования излучающего полотна ВЩАР КВЧ диапазона можно использовать методы на базе фотохимического травления, гальванопластики и электроэрозионной обработки (ЭЭО). Потенциальные возможности этих методов по точности превышают требования, накладываемые электродинамикой, и при выборе метода большее значение имеют другие факторы [5]: наличие на предприятии задела технологических средств; экологическая безопасность операций; чувствительность к квалификации персонала (степень автоматизации подготовки и проведения технологического процесса); надежность конструкции изготавливаемого изделия; длительность и непрерывность производственного цикла изготовления и др.

В работе [5] авторами сделан вывод, чтоизготовление ВЩАР с применением метода ЭЭО обеспечивает (по сравнению с другими перечисленными выше базовыми методами) максимальную надежность и стабильность характеристик ВЩАР в эксплуатации за счет отсутствия в ней соединений материалов с различными физико-механическими свойствами и исключения сборочных операций, таких как пайка и гальванопластическое наращивание излучающего полотна.

Рассмотрим в общем виде процесс проектирования и формирования (изготовления) излучающей апертуры ВЩАР (как компонента СВЧ устройства) на примере разработанного технологического процесса изготовления излучающего полотна ВЩАР с использованием имеющихсятехнологических средств (технологическое оборудование и его оснащение, технологические процессы общего назначения и т. д.), на момент начала проектирования, и созданных технологических средств в процессе проектирования и изготовления [3]ВЩАР.

При разработке ВЩАР использовались алгоритмы и программы автоматизированного проектирования линейных и плоских однолучевых ВЩАР [6], которые предусматривают возможность анализа регулярных и случайных отклонений основных размеров (длины и ширины щелевых отверстий, их смещений, углов наклона) от номинальных значений с

целью определения допусков на изготовление элементов ВЩАР. Процесс моделирования ВЩАР включает несколько этапов. Сначала производится выбор структуры антенной решетки (вид излучающих щелевых отверстий и отверстий связи, размеров магистральных волноводов и излучающих волноводов) по требованиям, предъявляемым к направлению главного лепестка ДН, к ширине главного лепестка, уровню бокового излучения, поляризации в соответствии со стандартными рекомендациями. Затем проводятся расчеты конструктивных параметров ВЩАР, исходя из размеров излучающей апертуры, электрических и механических свойств материалов, требуемой жесткости и размеров конструкции. Далее эти данные, дополненные сведениями о толщине и проводимости стенок волноводов, форме концов щелей используются в процессе расчета геометрических размеров и расположения излучающих щелевых отверстий на стенках волноводов.

В процессе решения задачи проектирования ВЩАР создается база данных для разработки конструкторской документации (КД) и управляющей программы (УП) для размерной электроэрозионной обработки.

ВКД предусматривается наличие нескольких технологических щелевых отверстий, расположенных на излучающем полотне вне рабочей зоны излучающей апертуры ВЩАР. Эти технологические отверстия предназначены для возможности контроля и коррекции электрических параметров изготавливаемого конкретного образца антенны при выполнении технологического процесса формирования апертуры ВЩАР и, тем самым, в конечном итоге повышения выхода годных ВЩАР.

Дело в том, что погрешности изготовления ВЩАР, как и любых других изделий, имеют случайную и систематическую составляющие. Систематическая составляющая определяется погрешностями изготовления оснастки и электрода-инструмента, погрешностями базирования оснастки и инструмента, систематической составляющей погрешности станка и др. С помощью технологических отверстий эта составляющая реальных отклонений конкретного экземпляра ВЩАР может быть оценена и скомпенсирована. Требования к точности расположения и выполнения размеров рабочих и технологических отверстий должны быть одинаковы. После создания излучающей апертуры технологические отверстия закорачиваются и не участвуют в работе готового устройства.

Схема технологического процесса с использованием пакета синтеза и анализа ВЩАР представлена на рис. 1.

Разработанная конструкторская документация служит исходными данными для проведения технологической подготовки производства (ТПП) антенн в целом и, в частности, размерной обработки излучающих щелевых отверстий апертуры ВЩАР.

Результатом проведения ТПП является комплект технологической документации (ТД), технологическая оснастка, электроды-инструменты (ЭИ) и управляющие программы для станка, которые должныобеспечивать получение заданной точности размеров и качество обрабатываемых поверхностей. Следует отметить, что использование конкретно указанной установки (AM35L) продиктовано наличием её и других, применяемых в технологии, технологических средств в составе технологической базы на момент начала проектирования.

Размерную обработку излучающих щелевых отверстий производят на электроэрозионной копировально-прошивочной установке (фирма «Sodick», Япония) с компьютерным числовым программным управлением (КПЧУ). Разработку УП производят непосредственно на станке с помощью программного обеспечения (ПО), входящего в комплект установки.

Возможно также получение УП с помощью другого ПО, например, пакета «Гемма» с модулем для разработки УП для ЭЭО, оснащенным драйвером для данной установки, на отдельном автоматизированном рабочем месте (АРМ) технолога. Работа КЧПУ генератора установки AM35L и ПО производится в среде операционной системы WindowsNT. Генерация УП производится в системе «LNAssist», входящей в комплект ПО КЧПУ-

генератора станка. Ввод технологических параметров в систему «LN Assist» производят в «диалоговом» режиме.

Рис.1. Схема технологического процесса с использованием пакета синтеза и анализа ВЩАР

Режимы обработки выбираются, исходя из вводимых в процессе «диалогового» режима технологических параметров: материала электрода-инструмента, требуемой шероховатости обрабатываемых поверхностей, схемы обработки, глубины обработки, площади обработки и др. Высокая степень автоматизации разработки УП на установке AM35L позволяет быстро и

качественно выполнять эту процедуру, снижает вероятность ошибок за счет контроля УП программными средствами, в том числе графическими (прорисовка траектории ЭИ относительно базовых поверхностей, покадровое перемещение ЭИ с индикацией перемещения и др.). Система «LN Assist» позволяет определять оптимальную величину межэлектродного зазора при обработке (расстояние между ЭИ и обрабатываемой поверхностью), что позволяет назначать оптимальные размеры рабочей части ЭИ при его проектировании. Все отмеченные процедуры, проводимые на данном станке с помощью программного обеспечения установки AM35L, фактически являются моделированием технологического процесса с высокой степенью получения ожидаемого результата, т.е выполнения заданных в КД параметров элементов конструкции.

Выполнение щелевых отверстий излучающей апертуры корпуса является одной из заключительных операций размерной обработки функциональных элементов ВЩАР. Для проведения этой операции заготовку корпуса ВЩАР базируют относительно направлений координатных перемещений и закрепляют на столе станка в приспособлении.

Далее проводят процедуру выверки и установки ЭИ относительно базовых поверхностей заготовки и перемещение в положение начала обработки по УП. Запускают УП и производят обработку технологических отверстий. Затем, не снимая заготовку со стола станка, производят контроль фактических размеров и расположения отверстий с помощью средств измерений, которыми оснащена установка. После соответствующей обработки полученных данных сравнивают их с расчетными.

При выявлении значимых систематических отклонений определяют поправочные коэффициенты, и производят перерасчет размеров и расположения необработанных отверстий.

Результаты расчета заносят в базу данных, после чего корректируют УП для обработки. Таким образом, на данном этапе осуществляется компенсация реально полученных систематических отклонений размеров и расположения щелевых излучателей с целью достижения оптимальных электродинамических параметров решетки.

После этого обрабатывают все отверстия апертуры ВЩАР по УП. В процессе ЭЭО ЭИ изнашивается, его стойкости хватает на обработку нескольких отверстий (или группы отверстий – при применении многоместного ЭИ). Для обеспечения требуемой точности необходимо производить смену ЭИ после его допустимого износа ЭИ. Для этого в УП предусматривают программные остановки. Во время этих остановок также производится оперативный контроль размеров отверстий, выполненных с помощью снимаемого (отработанного) ЭИ, контрольно-измерительными средствами из оснащения установки без снятия корпуса ВЩАР со стола станка. Данный контроль направлен на оперативное выявление случайных ошибок и принятие решений в случае их обнаружения.

По завершении ЭЭО корпус ВЩАР снимают со станка и предъявляют в отдел технического контроля (ОТК) для контроля щелевых отверстий излучающей апертуры ВЩАР. Далее корпус ВЩАР направляют на операцию по закоротке технологических отверстий и сборку, после чего проводят проверку ВЩАР по электрофизическим параметрам.

Разработанная схема направлена на повышение качества и точности изготовления ВЩАР КВЧ диапазона и позволяет за счет оперативного вмешательства в процесс формирования излучающей апертуры значительно снизить уровень брака дорогостоящих изделий. Она обеспечивает изготовление ВЩАР с заданными энергетическими характеристиками, лежащими в пределах допустимых погрешностей.

Анализ статистических данных показал, что доверительные интервалы полученных размеров щелевых отверстий и их позиционирования находятся в пределах полей допусков по 9 квалитету, что полностью удовлетворяет техническим требованиям, сформулированным для ВЩАР КВЧ диапазона при их проектировании.

В качестве примера в таблице 1 приведены результаты измерений и статистической обработки длины и ширины излучающих отверстий (с размерами по КД - $4{,}16^{+{,}048}\times 0{,}4^{+0{,}04}$). Расчет погрешностей размеров проводился с доверительной вероятностью 0,95.

Таблица 1

Результаты статистической обработки отклонений от номинальных значений размеров излучающих отверстий в макетах ВЩАР

Статистические характеристики	**Измеряемый параметр**	
	Длина излучающих отверстий $4{,}16^{+{,}048}$, мм	**Ширина излучающих отверстий $0{,}4^{+0{,}04}$,мм**
$\bar{X}$ **, мм**	**4,164**	**0,432**
S, мм	**0,0087**	**0,0103**
±ΔX, мм	**0,018**	**0,021**
V, %	**0,0216**	**0,248**
ξ, %	**0,043**	**0,489**

$\bar{X}$ **–** среднее значение измеряемого параметра;
S– стандартное отклонение результатов измерения;
±ΔX – границы доверительных интервалов;
V– коэффициент вариации;
ξ – относительная ошибка.

Из данных таблицы 1 видно, что среднеквадратическое отклонение размеров составляет 8–10 мкм. Такой результат удовлетворяет требованиям электродинамических расчетов, что подтверждается измерением основных характеристик ВЩАР в реальных условиях.

С помощью рассмотренной технологии были получены полнофункциональные ВЩАР. Проверка функционирования ВЩАР в целом с изготовлением ИП таким способом, показала, что электродинамические характеристики ВЩАР (форма, направление и ширина главного луча диаграммы направленности, коэффициент усиления, уровень боковых лепестков) соответствуют расчетным.

Подводя итог, констатируем, что метод ЭЭО ИП в наибольшей степени удовлетворяет требованиям экологической безопасности и устойчивости к ошибкам исполнителей [5]. Его недостаток заключается в том, что этот метод требует применения дорогостоящих оборудования и расходных материалов. Изготовление ВЩАР в целом с применением метода ЭЭО обеспечивает (по сравнению с другими методами) максимальную надежность и стабильность характеристик ВЩАР в эксплуатации за счет отсутствия в ней соединений материалов с различными физико-механическими свойствами и исключения сборочных операций, таких как пайка и гальванопластическое наращивание излучающего полотна [5].

Выводы

Разработанные технологические процессы изготовления компонентов ВЩАР с применением ЭЭО обеспечивают максимальную надежность и стабильность характеристик ВЩАР в эксплуатации, в том числе, за счет отсутствия в ней соединений материалов с различными физико-механическими свойствами и исключения сборочных операций, таких как пайка и гальванопластическое наращивание излучающего полотна.Приведенный пример в докладе, показывает эффективность применения размерной ЭЭО (с применением конкретного оборудования, ПО и других технологических средств) для решения задачи формирования излучающего полотна при изготовлении ВЩАР.

Библиографический список

1. Козлов В.А., Седаков А.Ю. Системный подход к проектированию СВЧ компонентов бортовых РЛС // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы докладов IX Международной научно-технической конференции – Челябинск, 2010. – С. 123.
2. Седаков, А.Ю. Структура технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ-компонентов бортовых РЛС / А.Ю. Седаков // Антенны.– 2010. – № 10 (161). – С. 57-64.
3. Светлаков, Ю.А. Совершенствование и развитие технологической базы проектирования и изготовления СВЧ устройств/ Ю.А. Светлаков //: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2017 – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017, – 1 С. 1344-1349.
4. Козлов, В.А. Структура технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ устройств / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Информационные системы и технологии ИСТ-2011: Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – С. 92-93.
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. Кашин, А.В. Бортовые антенные системы СВЧ. Структурный подход.: учеб.пособие / А.В. Кашин, А.Ю. Седаков // НГТУ им. Р.Е. Алексеева. –Нижний Новгород, 2011.-143 с.

T.L. Gudina, Yu.A. Svetlakov, A.Yu Sedakov

TECHNOLOGY OF FORMATION OF THE APERTURE OF SLOTTED-WAVEGUIDE ARRAYS FOR ANTENNA'S ENF RANGE.

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”

Ehe block diagramme of technological process of formation of a aperture of the slotted-waveguide arrays antenna is considered. designing and manufacturing is applied enterprise-developer of microwave devices.

Keywords: microwave devices, electroerosive dimensional processing, technological maintenance, slotted-waveguide arrays, system designing.

УДК 621.37

С.П. Дорохов

ПАССИВНЫЙ ТРАНСПОНДЕР НА ОСНОВЕ РАДИОМЕТКИ НА ПАВ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия
«Российский федеральный ядерный центр
всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
«Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Показана возможность создания радиотранспондера с амплитудной кодировкой информационного сигнала на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ. Решена задача согласования входного преобразователя многоканальной ОЛЗ с приемо-передающей антенной радиотранспондера, снижено влияние переотражений и увеличено отношение сигнал/шум.

Ключевые слова: транспондер, радиометка, многоканальная отражательная линия задержки, поверхностная акустическая волна, встречно-штыревой преобразователь, амплитудное кодирование информационного сигнала.

Введение

Проектирование устройств, работа которых основывается на использовании поверхностных акустических волн (ПАВ), является перспективным направлением создания энергонезависимых транспондеров, осуществляющих идентификацию и контроль состояния объектов. Транспондером формируется уникальный информационный сигнал, состоящий из паспортных импульсов (идентифицируют порядковый номер объекта) и датчиковых импульсов физических величин (позволяют проконтролировать состояние объекта).

Главные преимущества транспондеров, как элементов систем дистанционной идентификации, заключаются в их энергонезависимости и устойчивости к ионизирующему излучению. Эти качества очень важны при использовании транспондеров в системах учета и контроля состояния опасных объектов.

Преобразование сигналов с датчиков физических параметров и формирование информационного сигнала осуществляется за счет создания радиометки на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Формирование радиометки основывается на преобразовании импульса опроса в информационный кодированный сигнал, содержащий индивидуальный код, заложенный в данной радиометке.

В настоящее время существует несколько методов кодирования информации в системах радиочастотной идентификации с помощью последовательности импульсов, подробно описаны в [1]. Наиболее простым и надежным способом кодирования, обеспечивающим достаточную дальность идентификации объекта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов и необходимую достоверность получаемых данных, является амплитудное кодирование.

В работе представлены результаты создания пассивного транспондера на основе радиометки на ПАВ с амплитудной кодировкой информационного сигнала.

Постановка задачи

Для формирования сигнала пассивной радиометки в транспондере используется отражательная линия задержки (ОЛЗ) на ПАВ, обеспечивающая начальную задержку $t_н$ ответного информационного сигнала, которая необходима для достоверной идентификации объекта. Начальная задержка формируемого информационного отклика позволяет получить уровень отраженных сигналов от находящихся поблизости объектов (не имеющих радиометки) и принимаемых антенной считывателя ниже уровня шумов в приемном устройстве.

Конструкция ОЛЗ на ПАВ с амплитудным кодированием представлена на рис. 1. Кодированная последовательность импульсов формируется путем переотражения сигнала опроса от системы отражательных структур путем наличия или отсутствия отраженного импульса в заданном временном интервале. Информационный сигнал имеет двоичную кодировку, где наличие импульса соответствует логической «1», а отсутствие – «0». Таким образом, емкость информационного сигнала при амплитудном кодировании составляет 2^n, где n – число отражательных структур (импульсов информационного сигнала).

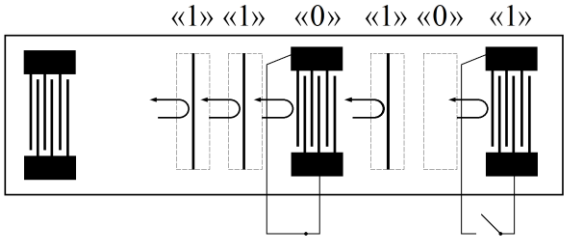


Рис. 1. Конструкция ОЛЗ на ПАВ с амплитудным кодированием.

При осуществлении кодирования ОЛЗ часть импульсов, отвечающих за идентификационный номер объекта, должна присутствовать или отсутствовать, тем самым обозначая «1» или «0» соответственно. Для этого задается определенный уровень сигнала, при превышении которого импульс распознается как «1», если амплитуда импульса меньше заданного уровня, импульс идентифицируется как «0». При этом в случае наличия ложного сигнала на месте отсутствующего информационного импульса «0», с амплитудой, превышающей заданный уровень, системой обработки информационного сигнала приемным устройством он может быть интерпретирован как информационный импульс «1», следовательно, будет получен недостоверный результат идентификации. При проектировании ОЛЗ вопрос определения уровня ложных сигналов является одним из основных, поскольку отношение сигнал/шум влияет на дальность действия системы опроса [2]

$$r = \frac{1}{4\pi}\sqrt[4]{\frac{P_0 G_i^2 G_e^2 \lambda^4}{kT_0 \Delta f F \frac{S}{N} IL}}, \qquad (1)$$

где P_0 – излучаемая мощность; G_i – коэффициент усиления антенны считывателя; G_e – коэффициент усиления антенны радиотранспондера; IL – потери в ОЛЗ; kT_0 – энергия шума приемной антенны; Δf – полоса рабочих частот приемника считывателя; F – коэффициент шума системы; λ – длина волны на рабочей частоте; S/N – отношение сигнал/шум.

Основными недостатками конструкции, представленной на рис. 1 являются:

- потери, обусловленные двунаправленностью входного преобразователя;
- возникающие ложные сигналы, обусловленные импульсами двойного прохождения, значительно ухудшающие отношение сигнал/шум;
- недостаточная технологичность конструкции.

Для увеличения дальности идентификации и повышения достоверности информационного сигнала радиотранспондера необходимо разработать ОЛЗ на ПАВ с оптимизированной топологией для выполнения монтажных операций, в которой снижено влияние переотражений и увеличено отношение сигнал/шум.

Принцип работы и описание конструкции ОЛЗ на ПАВ

Работа ОЛЗ основывается на возбуждении ПАВ встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) при подаче на него активирующего радиоимпульса опроса, прохождении ПАВ по акустическому каналу и последующем преобразовании энергии, отраженной ПАВ, в информационный сигнал.

Для уменьшения влияния переотражений в акустическом канале должно находиться минимальное количество рефлекторов, таким образом, оптимального результата можно добиться, расположив в каждом из акустических каналов по 3 элемента: 2 из которых являются отражательными элементами, формирующими информационный сигнал, и 1 входной/выходной элемент, преобразующий электромагнитный сигнал в акустическую волну и обратно. Преимуществом такой конструкции является возможность пространственного разнесения акустических каналов, обеспечивающих пониженный уровень ложных импульсов при формировании информационного сигнала с высоким коэффициентом отражения от каждой отражательной структуры.

Входные преобразователи в ОЛЗ соединены между собой и выполнены в виде ВШП. Все отражательные элементы ОЛЗ также выполнены в виде встречно-штыревых преобразователей для возможности осуществления внешней регулировки амплитуд импульсов информационного сигнала [3]. Регулировка амплитуд отраженных импульсов необходима для уменьшения неравномерности импульсов информационного сигнала, что упрощает его обработку. Коэффициент металлизации отражательных элементов подбирается так, чтобы при замыкании ВШП эффективность отражения ПАВ от него была минимальна. Таким образом, выполнение рефлекторов в виде ВШП позволяет управлять импульсами информационного сигнала с помощью внешней электрической нагрузки, при этом, соответственно, можно менять код, формируемый ОЛЗ.

В предлагаемой конструкции все отражательные элементы расположены относительно друг друга на одной линии и имеют одинаковые расстояния до края пьезоэлектрической подложки. Такое расположение рефлекторов значительно повышает технологичность монтажных операций при разварке перемычек с контактных площадок на выводы корпуса, в который устанавливается ОЛЗ.

Топология ОЛЗ выполняется на материале подложки $LiNbO_3$ срез 128°*YX*, т. к. данный материал широко распространен, наиболее отработан технологически, обладает высоким коэффициентом электоромеханической связи, низким коэффициентом затухания и отвечает всем необходимым требованиям [4].

Структурная схема многоканальной отражательной линии задержки представлена на рис. 2.

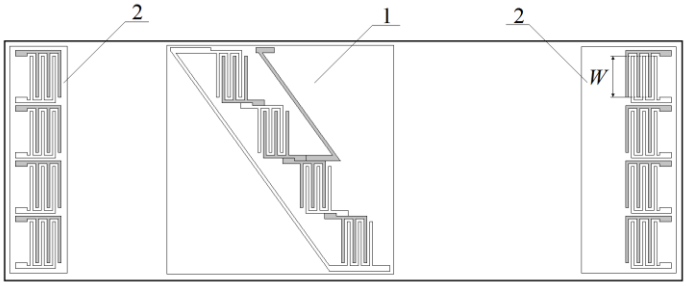


Рис. 2. Структурная схема многоканальной ОЛЗ. 1 – входной/выходной преобразователь, 2 – отражательные элементы, *W* – апертура отражательного элемента.

При необходимости формирования информационного сигнала большой емкости увеличивается число акустических каналов, определяемых количеством ВШП, образующих общую конструкцию. Таким образом, основная сложность данной конструкции заключается в согласовании входного/выходного преобразователя с внешним волновым трактом.

Согласование входного преобразователя

Из [5] известно, что на центральной частоте активная составляющая сопротивления излучения имеет вид:

$$R_a(\omega_c) \approx \frac{G_a(\omega_c)}{(\omega_c C_t)^2}, \quad (2)$$

где $G_a(\omega_c)$ – активная составляющая проводимости излучения, ω_c – центральная частота, C_t – статическая емкость единичного ВШП.

Статическая емкость единичного ВШП вычисляется по формуле [6]:

$$C_t = WN_p(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)\frac{K(k_2)}{K(k_2^{'})}, \quad (3)$$

где W – апертура ВШП, N_p – число пар электродов, $K(k_2)$ – полный эллиптический интеграл первого рода; $k_2 = \sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{d}{h}\right)$, h – период решетки, d – ширина электродов, $k_2^{'} = \sqrt{1-k_2^2}$,

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{11}^T \varepsilon_{33}^T - \left(\varepsilon_{13}^T\right)^2}}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где ε_{11}^T, ε_{33}^T, ε_{13}^T – компоненты матрицы диэлектрической проницаемости подложки.

Как было показано в работе [7], для уменьшения дифракционных потерь при распространении ПАВ апертура W единичных ВШП входного преобразователя должна удовлетворять условию:

$$W > \sqrt{\lambda x|1+\gamma|}, \quad (5)$$

где λ – длина ПАВ, x – расстояние от ВШП входного преобразователя до самого дальнего отражательного элемента, γ – параметр анизотропии.

В монографии [1] активную составляющую сопротивления излучения эквидистантного неаподизованного ВШП на центральной частоте предлагается рассчитывать по формуле:

$$G_a(\omega_c) = \frac{8}{\pi}k^2 f_0 C_t N_p, \quad (6)$$

где k^2 – коэффициент электро-механической связи, f_0 – частота акустического синхронизма.

Таким образом, значение величины $R_a(\omega_c)$ может быть скорректировано схемой включения единичных ВШП входного преобразователя, подбором их оптимальной апертуры W и количества пар электродов, что позволит получить необходимое значение входного импеданса ОЛЗ для осуществления хорошего согласования ее входного преобразователя с внешним волновым трактом.

В конструкции, представленной на рис. 2, оптимального результата можно добиться, используя последовательно-параллельное подключение единичных ВШП входного преобразователя между собой [8].

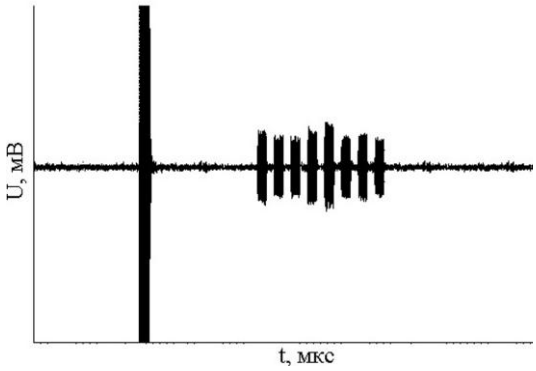


Рис. 3. Параллельное подключение

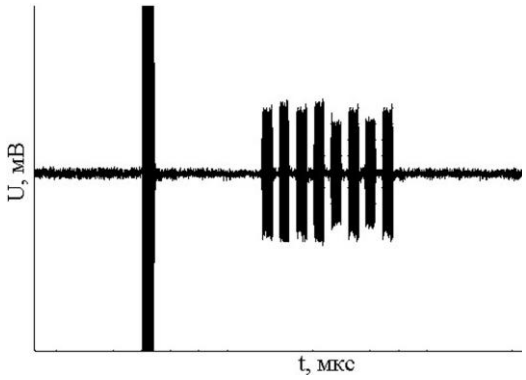


Рис. 4. Последовательно-параллельное подключение

На рис. 3, 4 представлены осциллограммы информационных сигналов с параллельным подключением единичных ВШП входного преобразователя и последовательно-параллельным соответственно, из которых видно, что при последовательно-параллельном подключении удалось снизить затухание амплитуд импульсов информационного сигнала на ~ 3 дБ (по напряжению), при этом получив равномерность импульсов информационного сигнала, не превышающую 5 дБ (по напряжению).

Выполнение шин подключения входного преобразователя с наклоном позволяет часть энергии ПАВ, отраженной от них при ее прохождении по акустическому каналу, отклонить от направления распространения чистой моды (совпадающего с кристаллографической осью пьезоэлектрической подложки), исключая, таким образом, дополнительные паразитные переотражения ПАВ.

Практическая реализация радиотранспондера на основе многоканальной ОЛЗ

Транспондер использует энергию инициирующего радиоимпульса для формирования информационного кодированного сигнала с контролируемого объекта. Приемопередающая антенна транспондера принимает короткий инициирующий радиоимпульс, который по коаксиальному кабелю передается на входной/выходной преобразователь, преобразующий его в поверхностную акустическую волну, распространяющуюся от него в обе стороны, каждая в своем акустическом канале. ПАВ, достигнув отражательных элементов отражается от них и достигает входного/выходного преобразователя, который преобразует ее в ответный радиоимпульс, содержащий информационную посылку, включающую в себя идентификационный номер охраняемого объекта и информацию о состоянии пороговых или аналоговых датчиков. Пороговые или аналоговые датчики могут размещаться внутри охраняемого объекта, в местах воздействия критических нагрузок или в местах особого контроля изменений физических параметров и находиться как внутри корпуса транспондера, так и вне его. Коэффициент металлизации отражательных элементов подбирается таким образом, что при срабатывании датчика происходит замыкание (или размыкание) соответствующего ВШП, вследствие чего изменяется коэффициент отражения ПАВ до минимального (или максимального) значения, тем самым изменяются амплитуды импульсов, по изменению которых можно сделать выводы о состоянии охраняемого объекта.

На рис. 5 приведена схема построения транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ. При реализации данной конструкции существует возможность согласования входного преобразователя ОЛЗ с приемо-передающей антенной изменением длины коаксиального кабеля.

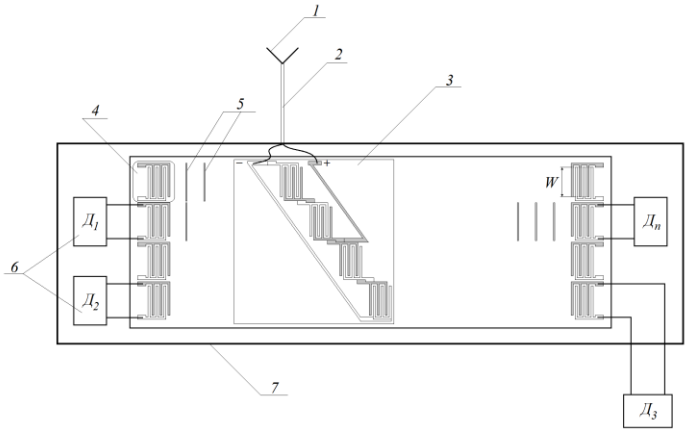


Рис. 5. Схема реализации транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ 1 – приемопередающая антенна, 2 – коаксиальный кабель, соединяющий приемопередающую антенну с входным/выходным преобразователем многоканальной ОЛЗ, 3 – входной/выходной преобразователь многоканальной ОЛЗ, 4 – отражательные элементы, выполненные в виде ВШП, 5 – отражательные рефлекторы, 6 – пороговые или аналоговые датчики, подключаемые к выводам ВШП, 7 – корпус транспондера, *W* – апертура ВШП.

В транспондере на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ максимальное количество контролируемых параметров (число устанавливаемых датчиков контроля) равно удвоенному числу единичных ВШП, образующих входной/выходной преобразователь. Кроме того, информационную емкость транспондера можно увеличить, располагая перед отражательными элементами, выполненными в виде ВШП, дополнительные отражательные рефлекторы, а кодирование информационного сигнала можно осуществлять как топологическим способом, т. е. включением или исключением отражательного рефлектора из топологии многоканальной ОЛЗ на ПАВ, так и шунтированием отражательных элементов. Если эксплуатация транспондера предполагается в нормальных условиях, для увеличения информационной емкости можно использовать время-позиционного кодирование.

Выводы

Для создания пассивного транспондера была разработана оптимизированная конструкция многоканальной ОЛЗ с амплитудной кодировкой информационного сигнала. В ходе ее разработки была решена задача согласования входного преобразователя с приемо-передающей антенной транспондера, снижено влияние переотражений и увеличено отношение сигнал/шум.

Полученное значение дальности идентификации позволяет дистанционно передавать информацию о состоянии охраняемого объекта в процессе воздействия на него критических дестабилизирующих факторов (например, в процессе пожара).

Библиографический список

1. Балышева О.Л., Григорьевский В.И., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф., Мансфельд Г.Д. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования //Под ред. академика РАН Гуляева Ю.В. – М.: Радиотехника, 2012. – 576 с.

2. Reindl L., Scholl G., Ostertag T., Scherr H., Wolff U., Schmidt F. Theory and Application of Passive SAW Radio Transponders as Sensors // IEEE Trans. On UFFC. 1998. V.45. №5. P. 1281 – 1291.

3. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах: RU 2522886 C2 / С.П. Дорохов, И.А. Князев, А.С. Салов - №2012145915/08; Заявл. 26.10.2012. Опубл. 20.07.2014 Бюл. № 20.

4. Результаты экспериментального исследования влияния ионизирующего излучения на отражательные линии задержки на поверхностных акустических волнах / С.П. Дорохов,

А.С. Салов – X Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов (г. Саров, 16-19 октября 2012 г.). – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – 445 – 450 с.

5. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах / Д. Морган. – М: Радио и связь, 1990. – 416 с.

6. С.П. Дорохов, В.А. Козлов, А.С. Салов. Затухание информационного сигнала многоканальной ОЛЗ на ПАВ / XIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2017: Материалы конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е Алексеева, 2017. – 1277 – 1280 с.

7. С.П. Дорохов, В.А. Козлов, А.С. Салов. Оптимизация конструкции многоканальной ОЛЗ на ПАВ // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. - №2 – с. 22-26.

8. Многоканальная отражательная линия задержки RU 2610415 C1 / С.П. Дорохов, А.С. Салов - №2015146785; Заявл. 29.10.2015. Опубл. 10.02.2017 Бюл. №4.

Dorokhov S.P.

A PASSIVE TRANSPONDER BASED ON SAW - RADIO TAG

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"

The study has demonstrated a possibility to manufacture a transponder with amplitude coding of data signals based on a multi-channel reflective delay line (RDL) on a surface acoustic wave (SAW). A task to match a multi-channel RDL input transducer with a radio-transponder combined antenna has been solved, re-reflection affect has been reduced and signal/noise ratio has been increased.

Key words: transponder, radio tag, multi-channel reflective delay line, surface acoustic wave, interdigital transducer, amplitude coding of data signals.

УДК 621.38

С.П. Дорохов, В.А. Козлов, А.С. Салов

ТРАНСПОНДЕРНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ И КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ С ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия
«Российский федеральный ядерный центр
всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
«Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Показана возможность организации мониторинга объектов с опасными материалами на основе транспондерной системы. Представлена техническая реализация транспондерной системы, основным преимуществом которой является универсальность, поскольку ее можно использовать во всем цикле обращения с контейнерами: от установки на предприятии изготовителе, при транспортировке и в дальнейшей эксплуатации в хранилище.

Ключевые слова: транспондерная система, транспондер, многоканальная отражательная линия задержки, поверхностная акустическая волна, встречно-штыревой преобразователь, датчики контроля.

Введение

Одним из важных аспектов борьбы с несанкционированным использованием радиоактивных материалов является организация их мониторинга в процессе длительного хранения, основной задачей которого является контроль сохранности и состояния содержимого в контейнере.

Бесконтактный мониторинг объектов особенно актуален в тех случаях, когда важны не только оперативность и высокая производительность процессов идентификации и контроля состояния объекта, но и обеспечение безопасности персонала. К таким опасным объектам относятся, прежде всего, контейнеры, содержащие взрывчатые и радиоактивные вещества.

В настоящее время одной из проблем при эксплуатации больших хранилищ делящихся материалов со стеллажным принципом размещения упаковок является значительная продолжительность процесса инвентаризации, в результате чего персоналу приходится длительное время находиться в условиях радиационного облучения. На сегодняшний день процесс инвентаризации осуществляется персоналом визуальной проверкой наличия пломб и считыванию штрих кода, нанесенного на внешнюю поверхность контейнера. Так должен быть осмотрен каждый контейнер и сопоставлены реальные данные о его целостности с учётными данными (состояние пломбирования, номер контейнера, местоположение и др.). Одним из решений этой проблемы является автоматизация процесса инвентаризации с целью исключения участия персонала в этом процессе.

Перспективным направлением создания систем мониторинга является разработка бесконтактных систем, в которых вся необходимая информация об объекте считывается дистанционно со специальной «метки», установленной на каждом объекте.

В данной работе рассматривается способ автоматизации процесса инвентаризации ядерных материалов в долговременных хранилищах на основе транспондерных систем. Техническая реализация автоматизированной системы инвентаризации для контейнеров с использованием энергонезависимых транспондеров на основе многоканальных отражательных линий задержки (ОЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

В настоящее время в НИИ измерительных систем реализован опытный образец радиочастотной системы идентификации, контроля и учета объектов с ЯМ в процессе длительного хранения, успешно прошедший государственные испытания. Основным преимуществом данной системы является возможность дистанционного съема информации.

Идеология использования транспондерных систем

Процесс инвентаризации ядерных материалов заключается в периодическом обследовании всех контейнеров, находящихся в хранилище, и получение актуальной на момент проверки информации о состоянии контейнера, в первую очередь о:

- фактическом наличии контейнеров в хранилище;
- нахождении контейнеров на своих местах;
- целостности системы пломбирования, свидетельствующей об отсутствии вскрытия контейнеров.

Полученная при обследовании фактическая информация сопоставляется с учётными данными о контейнерах. По результатам сопоставления фактических и учётных данных делается вывод об отсутствии аномалий в процессе хранения ядерных материалов.

Идея автоматизации процесса инвентаризации заключается в том, чтобы каждый контейнер снабдить пассивным устройством (транспондером), содержащим информацию о номере контейнера, целостности системы пломбирования, данные о местоположении контейнера в хранилище и периодически в автоматическом режиме с помощью специального считывающего устройства без участия персонала опрашивать контейнеры, получая информацию о состоянии каждого контейнера. Полученная информация с помощью компьютерных технологий в диспетчерском пункте сравнивается с базой учётных данных по результатам чего делается вывод об отсутствии или наличии аномалий в хранении.

Принципиальная схема автоматизированной системы инвентаризации представлена на рис. 1.

Важным моментом является то, что на контейнеры устанавливаются пассивные элементы – транспондеры, не содержащие источников питания и не требующие обслуживания.

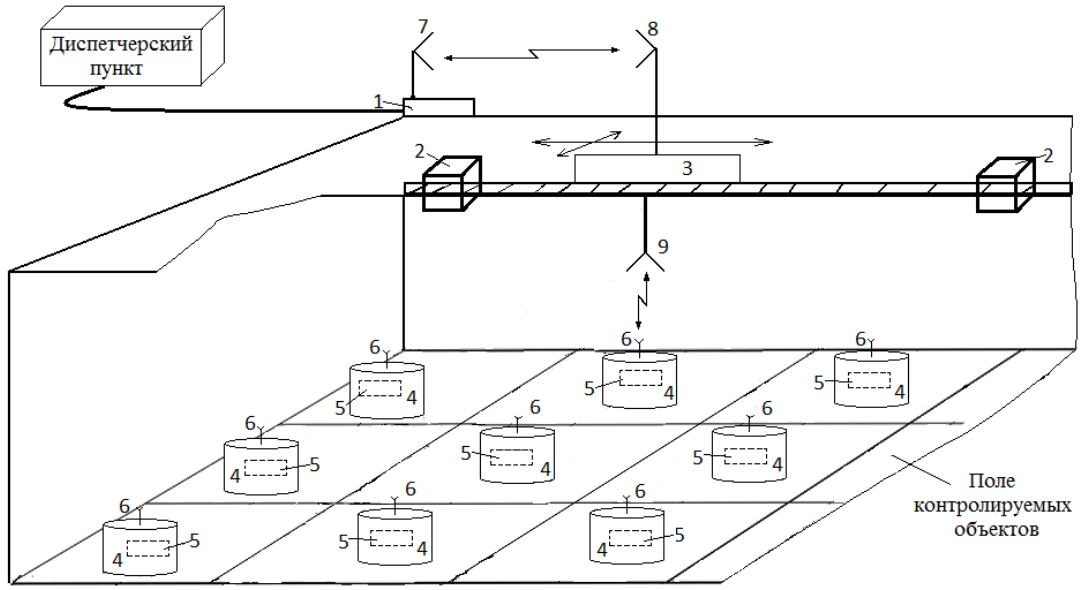


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизированной системы инвентаризации. 1 - ретранслятор, подключённый к диспетчерскому пункту (центру обработки информации), 2 - автоматизированный механизм перемещения считывателя, 3 – считыватель информации с транспондеров, 4 – контейнеры, 5 – транспондеры, 6-9 – антенны.

Принцип работы системы

Система состоит из двух функционально самостоятельных частей: базовой станции (БС) и транспондера (ТП) (Рис. 2). Транспондер устанавливается на контролируемый объект (контейнер) и является радиационностойким элементом, позволяющим проводить идентификацию объекта и работающим без элементов питания [1]. В него входят

энергонезависимые датчики, позволяющие регистрировать факты несанкционированных воздействий с момента установки системы на предприятии изготовителе, при его транспортировке и дальнейшем хранении.

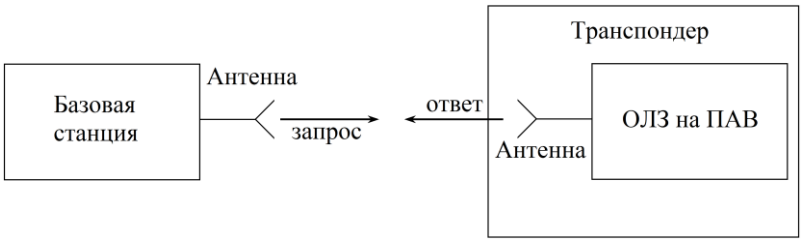


Рис. 2. Структурная схема системы дистанционной идентификации и контроля.

При работе системы приемо-передающий блок базовой станции по радиоканалу производит опрос транспондера посредством периодической последовательности импульсных сигналов. В ответ на каждый из импульсов запроса транспондер переизлучает уникальную кодовую последовательность импульсов, идентифицирующую данный транспондер и состояние его датчиков.

Ключевым элементом транспондера, формирующим паспортный код и отслеживающим состояние объекта, является отражательная линия задержки (ОЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). В связи с тем, что транспондер подвергается длительному ионизирующему излучению, ОЛЗ выполнена на пьезоэлектрической подложке из $LiNbO_3$. Проведенные исследования и испытания показали, что данный материал наиболее устойчив в условиях повышенного радиационного фона [2]. Кроме того, ниобат лития широко распространен, обладает высоким коэффициентом электро-механической связи и низким коэффициентом затухания ПАВ.

Принцип работы транспондера

Транспондер использует энергию инициирующего радиоимпульса для формирования информационного кодированного сигнала с контролируемого объекта. Приемопередающая антенна транспондера принимает короткий инициирующий радиоимпульс, который по коаксиальному кабелю передается на входной/ преобразователь ОЛЗ, преобразующий его в поверхностную акустическую волну, распространяющуюся от него в обе стороны, каждая в своем акустическом канале. ПАВ, достигнув отражательных элементов отражается от них и достигает входного/выходного преобразователя, который преобразует ее в ответный радиоимпульс, содержащий информационную посылку, включающую в себя идентификационный номер охраняемого объекта и информацию о состоянии пороговых или аналоговых датчиков. Пороговые или аналоговые датчики могут размещаться внутри охраняемого объекта, в местах воздействия критических нагрузок или в местах особого контроля изменений физических параметров и находиться как внутри корпуса транспондера, так и вне его. При срабатывании датчика происходит замыкание (или размыкание) соответствующего отражательного элемента, вследствие чего изменяется коэффициент отражения ПАВ до минимального (или максимального) значения, тем самым изменяются амплитуды импульсов, по изменению которых можно сделать выводы о состоянии охраняемого объекта.

На рис. 3 приведена схема построения транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ [3, 4]. При реализации данной конструкции существует возможность согласования входного преобразователя ОЛЗ с приемо-передающей антенной изменением длины коаксиального кабеля.

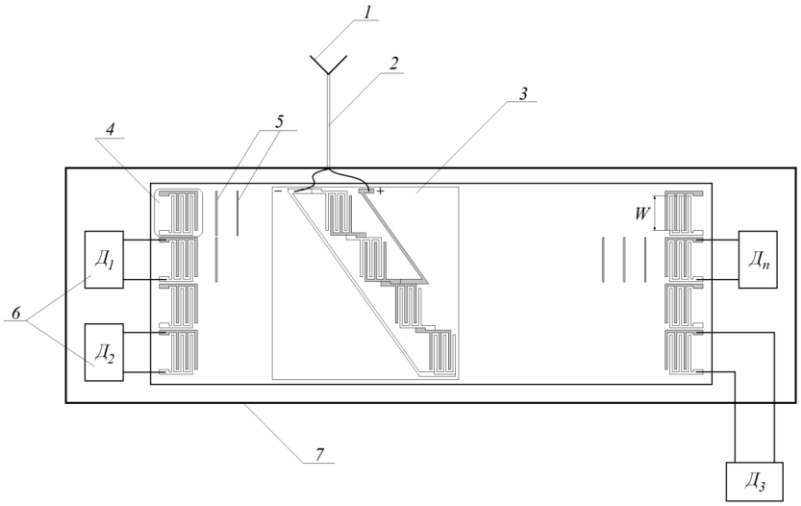


Рис. 3. Схема реализации транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ. 1 – приемопередающая антенна, 2 – коаксиальный кабель, соединяющий приемопередающую антенну с входным/выходным преобразователем многоканальной ОЛЗ, 3 – входной/выходной преобразователь многоканальной ОЛЗ, 4 – отражательные элементы, выполненные в виде ВШП, 5 – отражательные рефлекторы, 6 – пороговые или аналоговые датчики, подключаемые к выводам ВШП, 7 – корпус транспондера, *W* – апертура ВШП.

В транспондере на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ максимальное количество контролируемых параметров (число устанавливаемых датчиков контроля) равно удвоенному числу единичных ВШП, образующих входной/выходной преобразователь. Кроме того, информационную емкость транспондера можно увеличить, располагая перед отражательными элементами, выполненными в виде ВШП, дополнительных отражательных рефлекторов, а кодирование информационного сигнала можно осуществлять как топологическим способом, т. е. включением или исключением отражательного рефлектора из топологии многоканальной ОЛЗ на ПАВ, так и шунтированием отражательных элементов. Если эксплуатация транспондера предполагается в нормальных условиях, для увеличения информационной емкости до m^n можно использовать время-позиционного кодирование.

На рис. 4 представлен кодированный информационный сигнал, сформированный многоканальной ОЛЗ на ПАВ. Импульсы №2, №15 отвечают за превышение предельного порогового значения физического воздействия на охраняемый объект и попытки несанкционированного вскрытия контейнера (амплитуды импульсов №2, №15 соответствуют логическому «0»).

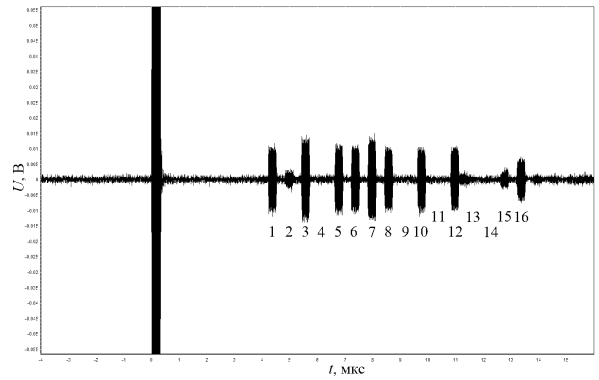


Рис. 4. Информационный сигнал транспондера, сформированный ОЛЗ на ПАВ (исходное состояние).

На рис. 5 представлен информационный сигнал транспондера, зарегистрировавшего факт воздействия предельных величин контролируемых параметров (амплитуды импульсов №2, №15 соответствуют логической «1»).

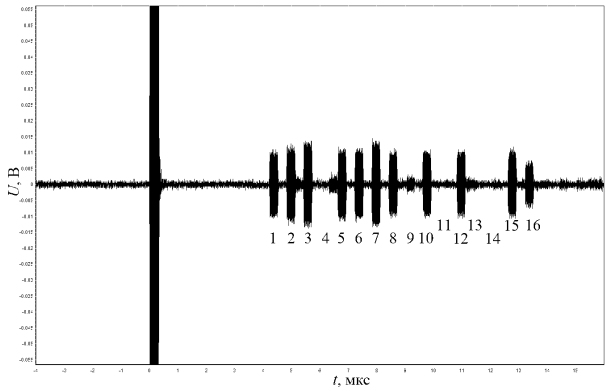


Рис. 5. Информационный сигнал транспондера, сформированный ОЛЗ на ПАВ (после воздействия критических нагрузок).

В результате использования предлагаемых технических решений при создании энергонезависимого транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ можно добиться дальности идентификации, превышающей 15 м.

Техническая реализация системы контроля объектов

Каждый контейнер оснащается транспондером (рис. 6), который устанавливается на крышке двумя болтами, аналогичными используемым. Корпус транспондера изготовлен таким образом, что при попытке несанкционированного вскрытия (выкручивании болта крепления крышки контейнера), происходит срабатывание датчика, находящегося в транспондере, и изменяется закодированная последовательность импульсов информационного сигнала транспондера.

Рис. 6. Транспондер системы контроля объектов в хранилищах.

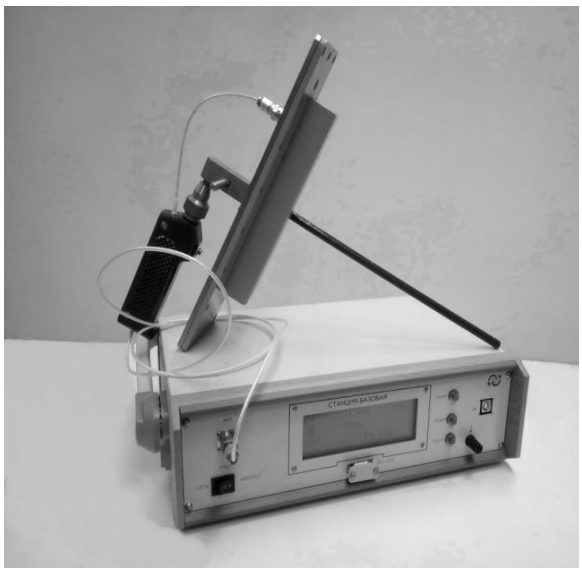


Рис. 7. Базовая станция с антенной.

Базовая станция с антенной (рис. 7) может перемещаться как вручную (обслуживающим персоналом), так и с помощью имеющейся кран-балки хранилища (рис. 1). При прохождении над полем контейнеров базовая станция производит опрос каждого

транспондера и передает полученные данные в диспетчерский пункт. На рис. 6 представлен стеллаж с контейнерами, оснащенными транспондерами системы контроля объектов в хранилищах. При данной организации хранилища контроль осуществляется в автоматическом режиме, либо производится вручную оператором. Опрос осуществляется путем совмещения диаграмм направленности антенны БС с антенной транспондера [5].

При опросе базовой станцией происходит обработка и дешифровка приходящих с транспондера кодированных последовательностей импульсов и информация о состоянии объекта. Результат выдается на систему отображения информации, при этом базовая станция одновременно запоминает полученные данные и передает в компьютер на диспетчерский пункт.

Выводы

Особенностью разработанной системы является универсальность, так как систему можно использовать во всем цикле обращения с контейнерами: от установки на предприятии изготовителе, при транспортировке и в дальнейшей эксплуатации в хранилище.

Основными преимуществами данной системы являются: дистанционный контроль состояния объектов; энергонезависимость транспондера; возможность контроля нескольких параметров состояния объекта при его транспортировке и хранении; прочность к ионизирующему излучению; снижение влияния ионизирующего излучения на обслуживающий персонал.

Библиографический список

1. Дшхунян В.Л., Шаньгин В.Ф. Электронная идентификация. М.: НТ Пресс, 2004. – 695 с.

2. Дорохов С.П., Салов А.С. Результаты экспериментального исследования влияния ионизирующего излучения на отражательные линии задержки на поверхностных акустических волнах // X Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов. 2014. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». С. 445 – 450.

3. Пат. 2522886 РФ, МПК H03H 9/00, G01S 13/00. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах / И.А. Князев, А.С. Салов, С.П. Дорохов // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 20.

4. Пат. 2610415 РФ, МПК H03H 9/30. Многоканальная отражательная линия задержки / С.П. Дорохов, А.С. Салов // Изобретения. Полезные модели. 2017. №4.

5. Пат. 2495489 РФ, МПК G06R 7/00, G08B 25/10. Автоматизированная система дистанционного контроля объектов в стационарных хранилищах / В.Ю. Вережанский, И.А. Князев, О.Н. Костюкевич, В.И. Юферев // Изобретения. Полезные модели. 2013. №28.

Dorokhov S.P., Kozlov V.A., Salov A.S.

A TRANSPONDER SYSTEM TO IDENTIFY AND MONITOR OBJECTS WITH HAZARDOUS SUBSTANCES

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"

The study has illustrated a possibility to run monitoring of objects with hazardous substances based on a transponder system. The study presented engineering development of the transponder system, the key advantage of which is its uniqueness because it can be used during an entire cycle of container handling: from its allocation at a manufacturing plant, during shipment and while subsequent storage in a warehouse.

Key words: transponder system, transponder, multi-channel reflective delay line, surface acoustic wave, interdigital transducer, monitoring gauges (sensors).

УДК 621.317.621.3

В.И. Евсеев[1], А.Б. Куликов[2], Е.А. Лупанова[2],
С.М. Никулин[1,2], В.В. Петров[2], В.П.Хранилов[2]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БОЛЬШЕСИГНАЛЬНЫХ S-ПАРАМЕТРОВ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро[1],
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[2]

Обсуждаются принципы построения измерительных усилителей и техника измерения S-параметров СВЧ транзисторов в режиме большого сигнала методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Волновые параметры рассеяния транзистора в полосковой линии низкого волнового сопротивления определяют с помощью полосковой калибровочной меры короткого замыкания и низкоомной нагрузки. Функцию меры холостого хода выполняют открытые концы 50-омных полосковых линий измерительного усилителя.

Ключевые слова: S-параметры, трансформаторы сопротивлений, полосковая линия, волновое сопротивление, короткое замыкание, низкоомная нагрузка.

В практике разработки выходных каскадов передающих модулей радиолокационных систем и систем связи широко используется метод переменной нагрузки с использованием трансформаторов сопротивлений [1,2]. Зарубежные компании «Маури» (США) и «Фокус» (Канада) предлагают для этих целей коаксиальные тюнеры сопротивлений с электронной перестройкой параметров и контактные устройства для подключения транзисторов в стандартный коаксиальный канал. Стоимость такого оборудования сопоставима со стоимостью векторных анализаторов цепей.

В настоящей работе предлагается альтернативное решение поставленной задачи, ориентированное на измерение S-параметров в коаксиальном канале в режиме большого сигнала и определение параметров СВЧ транзисторов в полосковых линиях передачи в диапазоне частот и мощностей, требующее существенно меньших материальных затрат. Суть предлагаемого решения состоит в оригинальной технике измерения большесигнальных S-параметров измерительных усилителей с изменяемой конфигурацией, которые совмещают в себе функции тюнеров импеданса, контактных устройств и адаптеров питания по постоянному току.

Известно, что входной и выходной импедансы СВЧ транзисторов находятся на периферии диаграммы полных сопротивлений и проводимостей. По этой причине для получения эффекта усиления транзисторы окружают электрическими цепями, трансформирующими импедансы источника входного сигнала и нагрузки, близких или равных 50 Ом, к весьма низким импедансам транзистора, имеющих величины порядка единиц Ом. С этой целью обычно используют отрезки полосковых линий низкого волнового сопротивления и/или их каскадные соединения определенной длины, обеспечивающие приемлемое согласование в ограниченной полосе частот. Однако такое решение[3] не позволяет проводить измерения S-параметров транзисторов в различных диапазонах частот входного сигнала.

Эффект трансформации сопротивления, широко и давно известный в коаксиальном канале, существенно проще получить в экранированной 50-омной полосковой линии передачи с помощью четвертьволнового трансформатора в виде металлической пластины с пленкой диэлектрика, изолирующей ее от полосковых проводников. Фрагмент конструкции усилителя с установленным трансформатором приведен на рис. 1. В качестве диэлектрика применена пленка из фторопласта 4, толщиной 20 мкм. Малая толщина пленки позволяет получать волновое сопротивление трансформатора не более 10 Ом, что обеспечивает трансформацию сопротивлений источника сигнала и нагрузки до величин порядка единиц Ом.

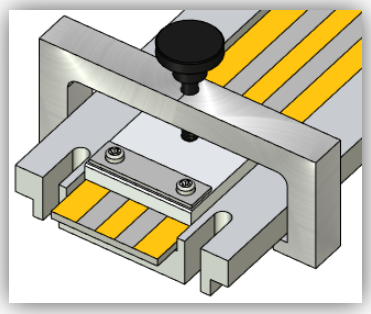


Рис. 1 – Экранированная полосковая линия с четвертьволновым трансформатором

Устанавливая трансформатор на небольшом расстоянии от транзистора, удается скомпенсировать его емкостной импеданс индуктивной составляющей трансформирующей цепи. Для проведения измерений в новом частотном окне достаточно лишь установить другую пластину трансформатора и подобрать его положение по отношению к транзистору.

Питание транзистора по постоянному току в широком диапазоне частот осуществляется через катушки индуктивности, установленные в полосковые линии измерительного усилителя в области контакта с измеряемым прибором, где импеданс усилителя имеет весьма низкие, порядка единиц Ом, сопротивления.

Внешний вид измерительного усилителя показан на рис. 2.

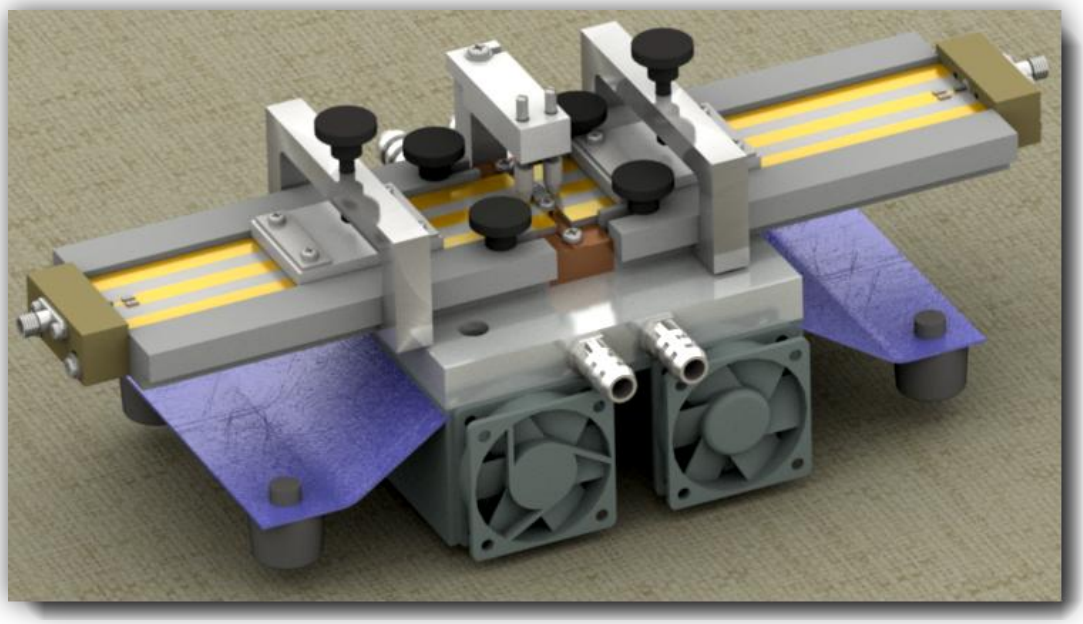


Рис. 2 – Внешний вид измерительного усилителя

Параметры рассеяния измерительных усилителей в режиме большого сигнала предлагается определять методом пространственно удаленной переменной нагрузки [4-6]. Структурная схема, поясняющая принцип измерения большесигнальных S-параметров с помощью анализатора цепей с доступом к измерительным приемникам, показана на рис. 3.

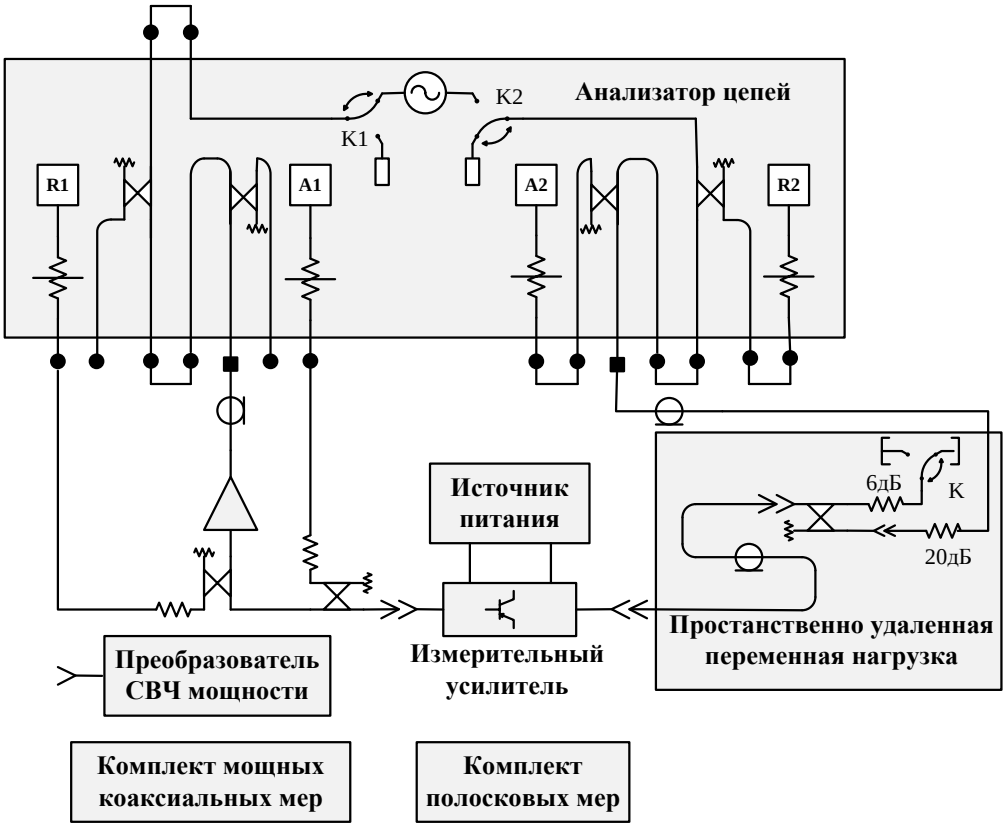


Рис. 3 – Система определения S-параметров измерительного усилителя методом пространственно удаленной переменной нагрузки

Суть метода состоит в измерении в частотном окне входного коэффициента отражения $\Gamma_{1,2}$ и прямого коэффициента передачи $K_{1,2}$ измерительного усилителя с пространственно удаленной переменной нагрузкой:

$$\Gamma_{1,2}(f_n) = S_{11}(f_n) + \frac{S_{21}(f_n)S_{12}(f_n)G_{1,2}(f_n)}{1 - S_{22}(f_n)G_{1,2}(f_n)},$$
$$K_{1,2}(f_n) = \frac{S_{21}(f_n)k_{1,2}(f_n)}{1 - S_{22}(f_n)G_{1,2}(f_n)}, \quad (1)$$

где $G_{1,2}$ - комплексный коэффициент отражения, а $k_{1,2}$ - комплексный коэффициент передачи переменной удаленной нагрузки.

В режиме большого сигнала, когда начинают проявляться нелинейные свойства транзистора, S-параметры измерительного усилителя становятся функциями амплитуды входного сигнала и комплексного коэффициента отражения пространственно удаленной нагрузки, являющейся квазипериодической функцией частоты $G_{1,2} \approx g_{1,2}\exp(-i4\pi fl/v)$, где l–длина коаксиальной линии, v – фазовая скорость распространяющейся в линии электромагнитной волны $g_{1,2}$ - коэффициент отражения от переменной нагрузки. Переменная нагрузка холостого хода и короткого замыкания, подключенная к измерительному усилителю через длинную линию и 6дБ аттенюатор, создает эффект частичного противофазного отражения падающей волны, что позволяет вычислить все четыре элемента S-матрицы на каждой частоте из системы уравнений (1). Полученные комплексные величины $S_{ik}(f)$ являются квазипериодическими функциями частоты f, а их

средние линии – искомыми большесигнальными S-параметрами измерительного усилителя в стандартном коаксиальном канале.

Порядок работы предлагаемой измерительной системы состоит в выполнении следующих операций [5]:

- Однопортовая калибровка анализатора цепей с помощью комплекта коаксиальных мер высокого уровня мощности;
- Калибровка по уровню падающей или поглощенной мощности на входе измерительного усилителя;
- Настройка усилителя на максимум усиления и приемлемый КСВН;
- Измерение коэффициента отражения $G_{1,2}$ и коэффициента передачи $k_{1,2}$ пространственно удаленной переменной нагрузки;
- Измерение коэффициента отражения $\Gamma_{1,2}$ и коэффициента передачи с измерительным усилителем в режиме пространственно $K_{1,2}$ удаленной переменной нагрузкипри заданных уровнях падающей или поглощенной мощности;
- Определение массива большесигнальных S-параметров измерительного усилителя в диапазоне частот и мощностей по результатам измерений из системы уравнений (1) в сочетании с процедурой сглаживания квазипериодических функций частоты;
- Определение S-параметров согласующих цепей, по результатам измерений усилителя с полосковыми мерами заданного волнового сопротивления;
- Определение массива большесигнальных S-параметров транзистора относительно его физических границ.

Все перечисленные операции выполняются в частотном окне, в пределах которого усилитель имеет приемлемые коэффициенты отражения и передачи.

Завершающим этапом определения S-параметров транзистора в полосковой линии с низким волновым сопротивлением является процедура исключения входной и выходной цепей измерительного усилителя из полученных результатов. С этой целью выполняют двух-портовую калибровку анализатора цепей с помощью стандартного набора коаксиальных мер волнового сопротивления или электронного калибратора. Затем подключают к анализатору измерительный усилитель и измеряют его коэффициенты отражения на входе и выходе без транзистора – режим «open», с полосковым короткозамыкателем – режим «short» и с оконечной нагрузкой малого (много меньше 50 Ом) сопротивления – режим «match». Параметры калибровочных мер определяют с помощью специальной оснастки LRT-методом [7,8].

В результате OSM калибровки определяют нестандартныеS-параметры входной и выходной согласующей цепи измерительного усилителя с 50-омнойлинией передачи со стороны коаксиальных разъемов и низкоомной виртуальной полосковой линией со стороны контакта с измеряемым транзистором. Существенно, что волновые сопротивления входной и выходной виртуальных низкоомных полосковых линий передачи, между которыми «установлен» тестируемый транзистор, могут быть как равными, так и различными.

Полосковая мера короткого замыкания представляет собой металлический параллелепипед с отверстием (или отверстиями) для крепления. Контакт с ленточными проводниками полосковых линий входной и выходной согласующей цепи усилителя обеспечивается за счет упругих металлических лепестков, припаянных к мере. Конструкция короткозамкнутой нагрузки показана на рис.4,*а*. Для каждого из типоразмеров транзистора предусмотрена отдельная конструкция короткозамкнутой меры, ориентированная на высоту транзистора и способ его крепления.

В качестве оконечной нагрузки малого сопротивления можно применить серийные СВЧ резисторы типа Р1-17 или специально разработанную конструкцию на чип-резисторах. В последнем случае удается реализовать больший диапазон значений сопротивления.

В цепи питания усилителя применена схема защиты, которая обеспечивает снятие напряжения со стока измеряемого транзистора в случаях:

- превышения допустимого тока стока;
- пропадание или снижения отрицательного напряжения на затворе;
- остановки вентиляторов системы охлаждения.

Время срабатывания защиты по току и напряжению затвора порядка 10 мкс. Значение допустимого тока стока может быть установлено в пределах от 300 мА до 3А, а порог срабатывания защиты по напряжению на затворе – от – 6 В до – 2 В.

Библиографический список

1. Understanding the Relevance of Harmonic Impedance Matching in Amplifier Design. // Steve Dudkiewicz, Marc Schulze Tenberge and Giampiero Esposito, Maury Microwave Corp., Ontario, Calif.; Travis Barbieri, Freescale Semiconductor, Phoenix, Ariz.- April 14, 2015.
2. Takayama, Y. A new load-pull characterization method for microwave power transistors. // In 1976 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium. Cherry Hill (NJ, USA), 1976, p. 218 – 220.
3. Евсеев В.И., Никулин С.М., Петров В.В., Торгованов А.И., Шипунов А.С. Измерительные усилители для определения параметров СВЧ транзисторов и транзисторных пар в диапазоне частот и мощностей. // Материалы XIX координационного научно-технического семинара по технике СВЧ, Нижний Новгород, 2017, с. 155 – 157.
4. Никулин С.М., Торгованов А.И. Измерение S-параметров нелинейных СВЧ цепей методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Датчики и системы, №11, 2014, с. 27-33.
5. Никулин С.М., Торгованов А.И. Проектирование усилителей СВЧ мощности. Эффективность метода удаленной переменной нагрузки. Электроника. Наука, технология, бизнес, №3, 2015, с. 60-65.
6. Никулин С.М., Терентьев А.А. Новый подход к измерению S-параметров методом переменной пространственно удаленной нагрузки. Датчики и системы, №11, 2016, с. 3-7.
7. Евсеев В.И., Лебедева Е.А., Никулин С.М., Петров В.В., Шипунов А.С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ устройств. Датчики и системы, №6, 2016, с. 22-27.
8. Лавричев О.В., Никулин С.М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах. Датчики и системы, №8-9, 2017, С. 39-44.

V.I. Evseev[1], A.B. Kulikov[2], E.A. Lupanova[2],
CM. Nikulin[1,2], V.V. Petrov[2], V.P. Khranilov[2]

USE OF MEASURING AMPLIFIERS IN THE TECHNOLOGY OF DETERMINING THE MOST SIGNIFICANT S-PARAMETERS OF MICROWAVE TRANSISTORS

Arzamas instrument-making design bureau[1],
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev[2]

The principles of constructing measuring amplifiers and the technique for measuring the S-parameters of microwave transistors in the large-signal mode by the method of a spatially remote variable load are discussed. The wave parameters of the transistor scattering in the low-impedance line-of-line are determined using a short-circuit strip-gauge gauge and a low-resistance load. The function of the measure of idling is performed by the open ends of the 50 ohm strip lines of the measuring amplifier.

Key words: S-parameters, resistance transformers, strip line, impedance, short-circuit, low-resistance load.

УДК 621.317.621.3

В.И. Евсеев[1], Е.А. Лупанова[2], И.Н. Малышев[3], С.М. Никулин[1,2], В.В. Петров[2], В.П. Хранилов[2]

ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СВЧ РЕЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ И ОКОНЕЧНЫХ НАГРУЗОК

Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро[1],
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[2],
«НПО «ЭРКОН»[3]

В статье представлены оригинальные методы, техника и технологии контроля параметров СВЧ резисторов большой мощности и оконечных нагрузок в полосковых линиях передачи. Для определения КСВН нагрузок и S-параметров резисторов и нагрузок относительно их физических границ предложено использовать OSM-калибровку с двумя физически реализованными калибровочными полосковыми мерами волнового сопротивления в режиме короткого замыкания и с согласованной нагрузкой. Инструментальное исполнение контактного устройства выполнено по модульному принципу, позволяющему скомпоновать конструкцию под заданный тип резистора или нагрузки.

Ключевые слова: СВЧ резистор, оконечная нагрузка, коаксиально-полосковый переход, КСВН, S-параметры, короткозамкнутая нагрузка, согласованная нагрузка.

Мощные СВЧ резисторы нашли широкое применение в РЛС и аппаратуре связи, навигации и телеуправления. Конструктивно они предназначены для монтажа пайкой в полосковые линии передачи и применяются для работы с теплоотводом в широкополосных узлах высокочастотной аппаратуры в цепях деления и суммирования мощности, а также в качестве оконечных нагрузок [1]. Частотные параметры таких электронных компонентов: коэффициент стоячей волны напряжения – КСВН, волновые параметры рассеяния – S-параметры определяются непосредственно на их физических границах или на некотором расстоянии от них в полосковых линиях передачи. Следовательно, частотные параметры, измеренные и идентифицированные для какой-либо определенной полосковой линии передачи, не могут быть абсолютно воспроизведены в другой линии с иными размерами поперечного сечения и иным материалом изоляционной подложки. Существенное влияние на частотные параметры оказывает не только контакт с полосковым проводником, но и контакт по металлизированному основанию с полосковой линией передачи, поскольку мощные СВЧ резисторы устанавливаются на металлическом фланце для отвода избыточного тела.

Частотные параметры резисторов измеряются с помощью анализаторов цепей, имеющих стандартное подключение в виде коаксиального канала. Для подключения мощных СВЧ резисторов, установленных в полосковые линии передачи, в коаксиальный канал используют специальную оснастку – контактное устройство с коаксиально-полосковыми переходами. Коаксиально-полосковые переходы искажают получаемую измерительную информацию о параметрах резисторов на их физических границах за счет неоднородности электромагнитного поля, возникающей в области контакта коаксиальной и полосовой линий передачи. По этой причине требуют обсуждения конструкция универсальной оснастки, методы и программные средства, позволяющие определять параметры мощных СВЧ резисторов в различных диапазонах частот, с различными полосковыми линиями передачи.

Для определения параметров мощных СВЧ резисторов разработана оригинальная конструкция универсального контактного устройства, позволяющая контролировать параметры, как оконечных нагрузок, так и проходных резисторов всех выпускаемых типоразмеров.

Разработанная оснастка построена по модульному принципу, позволяющему скомпоновать ее под заданный тип резистора.

Внешний вид универсальной оснастки в виде контактного устройства, скомпонованного для измерения оконечных нагрузок и проходных резисторов с максимальной мощностью до 1000 Вт в диапазоне частот до 8 ГГц показано на рис. 1.

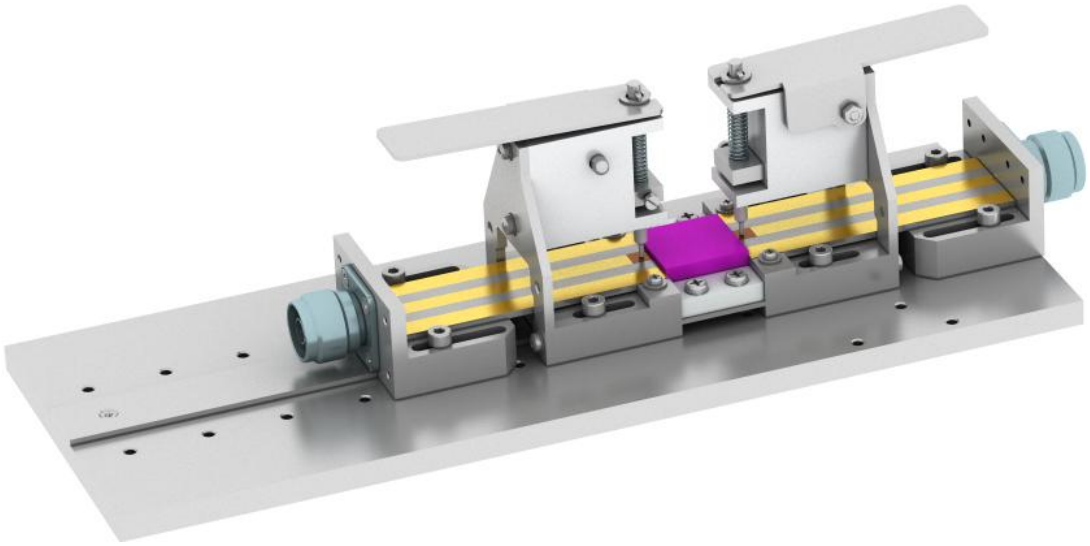
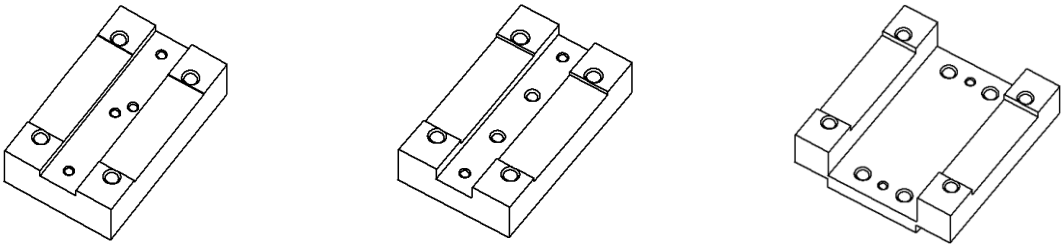


Рис. 1 - Контактное устройство для измерений в полосе частот до 8 ГГц

При измерении параметров оконечных резисторов используется один переход, а в случае проходных – два. Сам измеряемый объект крепится винтами к специальному носителю, также устанавливаемому на основание. Под каждую группу изделий, имеющих одинаковые размеры, спроектировано отдельное основание, обеспечивающее требуемое расположение изделия относительно полосковой линии. Примеры носителей приведены на рис. 2.



а) *б*) *в*)

Рис. 2 – Примеры конструкций носителей резисторов различной мощности: *а* – 10 и 20 Вт; *б* – 100 Вт; *в* – 800 и 100 Вт;

Подключение изделий к ленточным проводникам полосковых линий осуществляется с помощью прижимного устройства с диэлектрическим прижимным элементом.

Измерение параметров резисторов и оконечных нагрузок в универсальной оснастке выполняют с помощью векторных анализаторов цепей. Электрическая схема подключения изделий в оснастку показана на рис. 3.

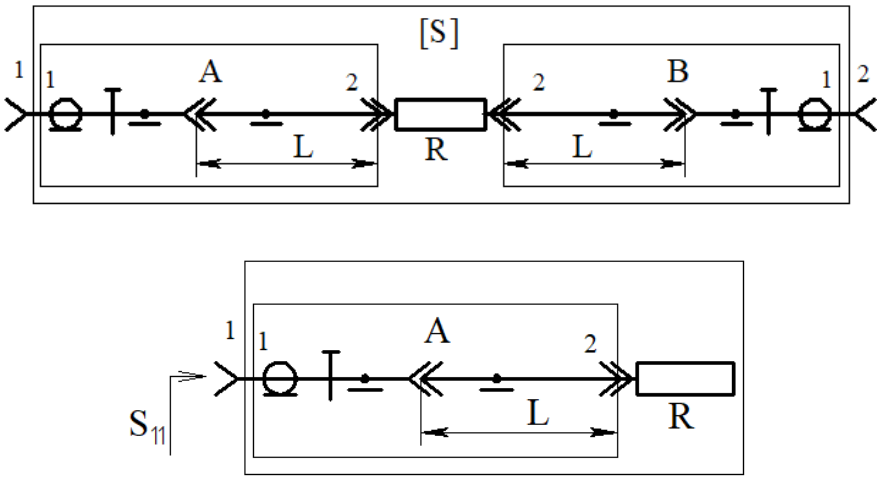


Рис. 3 - Схема электрическая для измерения параметров резистора, установленного в разрыве и на конце полосковой линии передачи

Для исключения влияния на результаты измерений цепей А и В, состоящих из коаксиально-полосковых переходов и отрезков полосковых линий длиной L, на конце или между которыми устанавливают испытуемые изделия, предлагается использовать известный OSM-метод определения параметров контактного устройства, адаптированный к специфике решаемой задачи. Метод не имеет жесткого ограничения, как по нижней, так и по верхней границе частотного диапазона и основан на минимальном широкополосном комплекте физических калибровочных мер: - короткого замыкания «S-short» и согласованной нагрузки «M-match» Функцию меры холостого хода «O-open» выполняют краевые емкости полосковых линий контактного устройства. В качестве согласованной нагрузки используется оконечная нагрузка 50 Ом с известным коэффициентом отражения.

Мера короткого замыкания (Рис.4) представляет собой металлический параллелепипед с отверстием (или отверстиями) для крепления. Контакт с ленточным проводником коаксиально-полоскового перехода обеспечивается за счет упругого металлического лепестка, припаянного к мере. Для каждого из типоразмеров резисторов предусмотрена отдельная конструкция короткозамкнутой меры, ориентированная на высоту резистора и способ его крепления.

а) *б*)

Рис. 4 - Конструкция короткозамкнутой нагрузки для: *а* - нагрузок мощностью 10 и 20 Вт; *б* - проходных резисторов

Параметры полосковых калибровочных мер волнового сопротивления выполняется с помощью векторного анализатора цепей N5222Аи универсального контактного устройства [2]. Внешний вид универсального контактного устройства приведен на рис. 5.

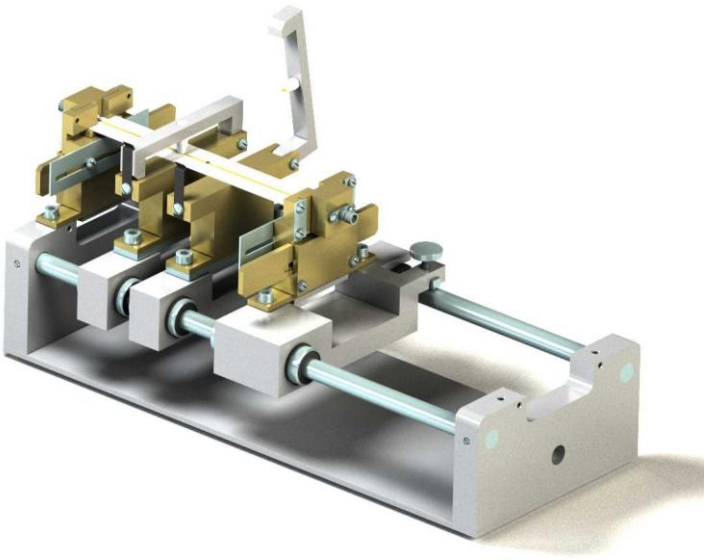


Рис. 5 – Внешний вид универсального контактного устройства

Принципиальное отличие данного контактного устройства от оснастки, разработанной в настоящем проекте, состоит в том, что область разъемного контакта реализована между коаксиальным разъемом и подключаемыми полосковыми линиями передачи разных поперечных размеров и разных материалов подложки. Это позволяет использовать оригинальный LRT-метод [3] измерений S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи с использованием минимального комплекта калибровочных мер, не требующих предварительного определения их электрических параметров

Мощные СВЧ резисторы и оконечные нагрузки характеризуют полным импедансом $Z(f)=R(f)+iX(f)$. Действительная $R(f)$ и мнимая $X(f)$ части полного импеданса являются медленными функциями частоты f электромагнитного поля и ихследует представлять аналитическими функциями вида:

$$R(f)=\sum_{n=0}^{N} r_n f^n,\ X(f)=\sum_{n=0}^{N} x_n f^n \qquad (1)$$

Численные значения коэффициентов r_n и x_n находят методом наименьших квадратов. Импеданс оконечной нагрузки $Z_{\text{н}}(f)$ получают по результатам измерения ее коэффициента отражения, а импеданс резистора $Z_R(f)$ – по результатам измерения S-параметров в полосковой линии передачи[7]:

$$Z_{\text{Н}}(f)=Z_{\text{В}}(f)\frac{1+\Gamma_{\text{Н}}(f)}{1-\Gamma_{\text{Н}}(f)},\quad Z_R(f)=Z_{\text{В}}(f)\frac{2S_{11}(f)}{S_{21}(f)} \qquad (2)$$

Здесь $Z_{\text{В}}(f)$ - волновое сопротивление полосковой линии контактного устройства. Существенно, что вычисление $Z_R(f)$ по формуле (2) автоматически исключает отрезки полосковых линий по обе стороны от контролируемого изделия.

При построении аналитических моделей оконечных нагрузок и СВЧ резисторов, пригодных для использования в системах автоматизированного проектирования, необходимо знать волновое сопротивление полосковой линии, в которой определены параметры изделий.

Волновое сопротивление полосковой линии $Z_{\text{В}}(f)$ как медленной функции частоты электромагнитных колебания определяется с помощью специальной процедуры, основанной на методе стандарта Битти [4], по результатам измерения S-параметров универсального контактного устройства с полосковой линией передачи, имеющей участок в виде симметричной полосковой линии передачи малого волнового сопротивления.

Библиографический список

1. Мощные СВЧ – резисторы Р1-17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http:/www.mniirip.ru/sites/defau/files/products_descr/r1, свободный.
2. Евсеев В.И., Лебедева Е.А., Никулин С.М., Петров В.В., Шипунов А.С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ устройств. Датчики и системы, №6, 2016, С. 22-27.
3. Лавричев О.В., Никулин С.М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах. Датчики и системы, №8-9, 2017, С. 39-44.
4. Михаэль Хибель. Основы векторного анализа цепей. Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, - 500 с.

V.I.Evseev[1], E.A. Lupanova[2], I.N. Malyshev[3], S.M. Nikulin[1,2], V.V. Petrov[2], V.P. Khranilov[2]

TECHNOLOGIES AND INSTRUMENTATION OF MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF MICROWAVE RESISTORS OF GREAT POWER AND TERM LOADS

Arzamas instrument-making design bureau[1], Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev[2], "NGO" ERCON "[3]

The article presents original methods, techniques and technologies for monitoring the parameters of high-power microwave resistors and termination loads in strip transmission lines. To determine the VSWR of loads and S-parameters of resistors and loads relative to their physical boundaries, it is suggested to use OSM calibration with two physically realized band-pass wave impedance measures in the short-circuit mode and with the coordinated load. Instrumental design of the contact device is made in accordance with the modular principle, which allows the construction to be configured for a given type of resistor or load.

Keywords: microwave resistor, termination load, coaxial-strip transition, VSWR, S-parameters, short-circuit load, matched load.

УДК 621.792

В.Л. Зефиров, Л.А. Хасянова, В.А Шипулина.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО КЛЕЯ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Приведены результаты работы по подбору состава электропроводного клея для крепления профилей из электропроводной силиконовой резины к металлическим поверхностям.Исследованы свойства таких клеевых соединений.

Ключевые слова: электропроводный клей, клеевые соединения, предел прочности при отрыве, удельное объёмное электрическое сопротивление.

В настоящее время в конструкциях корпусов современной СВЧ аппаратуры достаточно широко используются уплотнительные профили из силиконовых электропроводных резин. Использование таких уплотнительных элементов позволяет не только герметизировать корпуса приборов, но и препятствовать проникновению электромагнитного излучения за пределы корпуса прибора. Однако для эффективного их применения необходимо решение задачи крепления уплотнительных элементов к металлическому корпусу с обеспечением электрического контакта. Оптимальным вариантом такого крепления является использование электропроводного клея-герметика.

Целью данной работы является подбор рецептуры электропроводного клея-герметика, обеспечивающего клеевым соединениям следующие характеристики:

- диапазон рабочих температур -60+90 ^{o}C;
- предел прочности при отрыве для клеевых соединений деталей из сплава Д16А с силиконовой резиной не менее 0,5 МПа;
- удельное объёмное электрическое сопротивление, не более 1 КОм·см;
- отверждение клея-герметика при комнатных условиях;
- предел прочности при отрыве для клеевых соединений Д16А (с покрытием хим.окс.э.) с силиконовой резиной должен сохраняться не менее 0,4 МПа, после каждого из воздействий – воды с температурой +70 ^{o}C в течение 24 часов; 0,1 % раствор H_2SO_4, а также 0,1% раствора NaOHс температурой +70 ^{o}C в течение 24 часов;
- срок эксплуатации клеевых соединений (хранения) 15 лет.

Анализ информационных источников показал, что в России существует достаточно широкий ассортимент электропроводных полимерных материалов, однако токопроводного клея-герметика с совокупностью свойств полностью отвечающего требованиям ТЗ, а именно, обеспечивающего адгезионную прочность при склеивании резиновых смесей на основе силиксановых каучуков, не описано [1-4].

Для решения поставленной задачи – получения электропроводного клея-герметика была использована полимерная основа (матрица), представляющая собой эпоксисилоксановую модифицированную смолу. В качестве отвердителя разрабатываемого клея-герметика использовался отвердитель аминного типа.

Так как целью данной работы является разработка электропроводного клея-герметика в качестве наполнителя разрабатываемой композиции был использован мелкодисперсный порошок карбонильного никеля (ПНК-1Л5).

По результатам проведенных ранее работ для исследований был выбран следующий состав клея-герметика, массовые части:

- эпоксилоксановая смола 100;
- пластификатор 20;
- никель карбонильный 680;
- спирт диацетоновый 27;
- отвердитель аминного типа 50.

Данная рецептура клея-герметика обеспечила необходимое сочетание электропроводящих свойств(удельное объемное электрическое сопротивление0,35 Ом·см) и хорошей адгезии (предел прочности при отрыве $\sigma_{отр} \approx 22$ кгс/см^2) для клеевых соединений Д16А + электропроводная силиконовая резина (СЭТ-1 ТУ 38.103587-85), что было достигнуто использованием в данной композиции отвердителя аминного типа. Критерием введения в рецептуру необходимого количества наполнителя была её вязкость и механическая прочность. Диацетоновый спирт был применен для улучшения совмещения наполнителя при смешении компонентов и приведения клея-герметика в удобное для нанесения на склеиваемые поверхности состояние. Применение диацетонового спирта позволило ввести максимальное количество наполнителя. Использование пластификатора в подобранной рецептуре клея-герметика позволяет повысить пластичность композиции и увеличить стойкость к резкому перепаду температур за счет релаксации внутренних напряжений.

В ходе проведения отработки технологии приготовления клея-герметика была определена последовательность выполнения технологических операций по совмещению компонентов, а также было установлено, что выбранные компоненты обладают хорошей совместимостью. Расслоений в подобранной рецептуре не наблюдалось. Электропроводный клей-герметик отверждается при температуре 15…35 ^oC в течение 48 часов. Жизнеспособность клея-герметика при точном соотношении компонентов составляет не менее 2 часов.

Электрофизические показатели клея-герметика оценивались путем измерений удельного объемного электрического сопротивления (ρ_v) образцов по ГОСТ 20214-74.

Прочностные характеристики клея-герметика оценивались на образцах путем определения предела прочности при равномерном отрыве ($\sigma_{отр}$) по ГОСТ 14760-69. Склеивание образцов с помощью клея-герметика производилось в специальном приспособлении, обеспечивающим необходимое давление.

Оценка всех перечисленных показателей производилась на двух стадиях в исходном состоянии и после климатических испытаний (имитирующих 15-ти летнее хранение). Целью испытаний являлась оценка качества и надёжности клеевых соединений. Испытания проводились по специальной программе.

Результаты испытаний приведены в таблицах1 и 2.Статистическая обработка проводилась по ГОСТ 14359.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что после имитации длительного хранения удельное объемное электрическое сопротивление клея-герметика увеличилось, но не превышает требуемых значений (не более 1КОм·см).

Из анализа полученных результатов таблицы 2 установлено, что после климатических испытаний клей-герметик проявляет тенденцию к некоторому росту прочности $\sigma_{отр}$, что характерно для большинства эластичных композиций и объясняется образованием структурных субстратов на границе раздела поверхностей.

Подтверждение стойкости электропроводного клея-герметика к воздействию дестабилизирующих факторов (воды с температурой 70 ^oC в течение 24 часов, 0,1 % раствора серной кислоты, а также 0,1 % раствора NaOH с температурой 70 ^oC в течение 24 часов) оценивали по показателю предела прочности при отрыве ($\sigma_{отр}$) для клеевых

соединений Д16А с покрытием хим.окс.э с электропроводной силиконовой резиной. Оценка $\sigma_{отр}$ производилась после каждого вида воздействий. Полученные результаты представлены в таблице 3.Статистическая обработка проводилась по ГОСТ 14359.

Таблица 1

Электрофизические характеристики клея-герметика до и после климатических испытаний.

№ пробы клея-герметика	№ образца	Удельное объемное электрическое сопротивление,ρ_v, Ом·см	
		до климатических испытаний	после климатических испытаний
1	1	0,169	0,253
	2	0,086	0,137
	3	0,126	0,189
	ср	0,127	0,193
2	1	0,709	0,993
	2	0,280	0,420
	3	0,370	0,551
	ср	0,453	0,654
3	1	0,66	0,985
	2	0,58	0,870
	3	0,61	0,854
	ср	0,616	0,903
4	1	0,186	0,279
	2	0,170	0,255
	3	0,266	0,372
	ср	0,207	0,302
ср		0,350	0,513

Таблица 2

Прочность при отрыве ($\sigma_{отр}$) клея-герметика

№ образца	Показатель статистической обработки	$\sigma_{отр}$, кгс/см^2, (Д16А+Д16А)		$\sigma_{отр}$, кгс/см^2, (Д16А+силиконовая резина)	
		Исходные значения	После климатических испытаний.	Исходные значения	После климатических испытаний
1		17	25	23	25
2		18	21	25	28
3		23	33	24	26
4		20	28	20	23
5		20	35	19	25
6		11	27	23	27
	ср	18	28	22	26
	S	4 кгс/см^2	5 кгс/см^2	3 кгс/см^2	2 кгс/см^2
	±Δ	4 кгс/см^2	6 кгс/см^2	3 кгс/см^2	2 кгс/см^2
	V	9%	7,5%	5%	3%

где: **ср –** среднее арифметическое;
S – стандартное отклонение результатов измерений, кгс/см^2;
±Δ – границы доверительного интервала, кгс/см^2;
V – коэффициент вариации, % при P = 0,95.

Таблица 3

Прочность при отрыве ($\sigma_{отр}$) клея-герметика после воздействия дестабилизирующих факторов.

№ образца	Показатель статистической обработки	$\sigma_{отр}$, кгс/см^2, для материалов сплав Д16 (хим.окс.э.) +силиконовая резина		
		после выдержки 24 ч в воде при 70^{o}C	после выдержки 24 ч в 0,1 % растворе H_2SO_4 при 70 ^{o}C	после выдержки 24 ч в 0,1 % растворе NaOH при 70 ^{o}C
1		26	22	27
2		18	22	30
3		18	23	28
4		26	20	26
5		28	20	24
6		25	25	30
	ср	24	22	27
	S	5	2	2
	±Δ	5	2	2
	V	8	4	3

где: **ср –** среднее арифметическое;
S – стандартное отклонение, кгс/см^2;
±Δ – границы доверительного интервала, кгс/см^2;
V – коэффициент вариации, % при P = 0,95.

На основании полученных результатов приведенных в таблице 3 можно сделать вывод, что клеевые соединения клея-герметика выдержали воздействия дестабилизирующих факторов.

Выводы

Разработан и исследован электропроводный клей-герметик для крнпления профилей из электропроводных силиконовых резин к металлическим корпусным деталям СВЧ аппаратуры.

Клеевые соединения, полученные с применением разработанного клея-герметика, обладают пределом прочности при отрыве не менее 2 МПа, стабильной величиной удельного объемного электрического сопротивления не более 1 ом см, до и после воздействия климатических факторов, имитирующих 15-ти летнее хранение, выдерживают воздействие воды с температурой 70 ^{o}C в течение 24 часов, 0,1 % раствора серной кислоты, а также 0,1 % раствора NaOH с температурой 70 ^{o}C в течение 24 часов.

Библиографический список

1. Кардашов, Д.А. Полимерные клеи./ Д.А.Кардашов, А.П. Петрова // М., Химия - 1983.
2. Фехретдинов, Л.Г. Перспективы создания и использования новых клеящих материалов, герметиков, компаундов. / Л.Г. Фехретдинов,[и др.] // М., ВНИМИ, - 1995.
3. Гуль, В.Е., Электропроводящие полимерные композиции. / В.Е. Гуль, Л.З. Шенфиль// М., Химия - 1984.
4. Склеивание в машиностроении, справочник. / Под общей редакцией Г.В. Малышевой // М., ООО «Наука и технологии», - 2005.

V.L. Zephirov, L.A. Khasyanova, V.A. Shipoolina,

ENGINEERING AND RESEARCH OF PROPERTIES OF ELECTROWIRING-GLUE FOR RADIO-ELECTRONIC MICROWAVE 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”

Results of work about selection of composition of electrowireglue-hermetic for fastening of profiles from electrowire silicone rubber on surfaces of metal. Properties of such bonds are investigated

Keywords: pasting, electrowire glue, ultimate strength at breakoff, specific volume electrical resistance.

УДК 621.396.98

М.М. Ивойлова, В.А. Козлов, А.Л. Кунилов

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРОШЕДШИХ ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ РЛС И ИХ ОБРАБОТКИ ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В настоящей статье на основе общей методологии исследована возможность обработки прошедших через ионосферу Земли сигналов с широким спектром – сверхкоротких импульсов, радиоимпульсов с ЛЧМ и широкополосных шумовых сигналов взаимно-корреляционным методом. Получены численные оценки ожидаемых ошибок измерения дальности РЛС.

Ключевые слова: обработка сигналов с широким спектром, ионосферные искажения сигналов, бортовые РЛС

Введение

К настоящему времени вопросы использования сигналов с широким спектром в бортовой радиолокационной аппаратуре космического базирования подробно и системно не исследованы. Наиболее важным среди них является определение оптимальных или близких к ним методов обработки отражённых сигналов, учитывающих дисперсионные искажения на ионосферной трассе.

Согласно теории оптимального приёма первичная обработка в РЛС отражённых сигналов возможна методом согласованной фильтрации или методом взаимно-корреляционной обработки (ВКО), основанном на определении взаимно-корреляционной функции излучаемого и принимаемого сигналов [1]. Наибольший практический интерес представляет исследование возможности применения метода ВКО, т.к. временные функции излучаемого и принимаемого сигналов при нахождении РЛС и цели в ионосфере Земли ввиду дисперсионных искажений существенно различаются.

Целью настоящей работы являлось исследование на основе общей методологии возможности обработки прошедших через ионосферу Земли сигналов с широким спектром – СКИ-, ЛЧМ- и ШПШ-сигналов методом ВКО, а также численные оценки ожидаемых ошибок измерения дальности. Исследования проводились с применением методов математического моделирования.

Математическая модель прохождения сигналов с широким спектром через ионосферу Земли

При распространении сигналов в ионосфере Земли происходит их взаимодействие со свободными электронами, вследствие чего наблюдаются искажения, связанные с дисперсиями фазовой скорости.

Для исследования искажений сигналов с широким спектром, связанных с дисперсией фазовой скорости, использовано волновое уравнение, описывающее распространение плоской волны в холодной плазме в высокочастотном приближении ($\partial/\partial\tau >> c\,\partial/\partial z$) вида [2]

$$\frac{\partial^2 E}{\partial\tau\partial z} = -\frac{\omega_e^2(z)}{2c}E, \qquad (1)$$

где E – напряженность электрического поля; $\omega_e^2 = 4\pi e^2 N_e / m_e$ – квадрат плазменной частоты; N_e – концентрация электронов в ионосфере; e – заряд электрона; m_e – масса электрона; $\tau = t - z/c$ – замена переменной.

Решение уравнения (1) имеет вид [2]

$$E = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{\infty} E_0(\tau - u) J_0\left(2\sqrt{\frac{\Omega u}{\cos\theta}}\right) du, \qquad (2)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; E_0 – падающая волна; θ – угол падения волны по отношению к нормали; $\Omega = \frac{1}{2c} \int_{h_0}^{h} \omega_e^2 dh$ – параметр, характеризующий «оптическую толщину» ионосферы, зависящий от высоты; h – высота.

Определение концентрации электронов *Ne* на заданных высотах осуществляется в соответствии со стандартом [3] при достижении максимального уровня концентрации электронов в ионосфере на средних широтах (наихудшие условия), наблюдающемся в марте в дневные часы, на 60^o северной широты и 150^o восточной долготы, при среднем значении числа Вольфа 150 (относительное число солнечных пятен).

Концентрация электронов в ионосфере *Ne* при заданных условиях меняется в пределах от $7{,}62 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$ до $182 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$, максимум концентрации достигается на высоте h_{MAK} ~ 300 км.

Модели излучаемых и принимаемых сигналов

В качестве сигналов с широким спектром рассматривались:
- СКИ-сигнал в виде моноцикла Гаусса;
- ЛЧМ-сигнал с монотонно нарастающей частотой (ЛЧМН);
- ЛЧМ-сигнал с монотонно спадающей частотой (ЛЧМС);
- ШПШ-широкополосный шумовой сигнал.

Модель СКИ-сигнала в виде моноцикла Гаусса создавалась на основе спектральной $S_{МГ}(\omega)$ и временной $U_{МГ}(t)$ функций, определяемых соотношениями

$$S_{МГ}(\omega) = 2\pi e \omega^2 \rho^4 \exp\left[-\omega^2 \rho^2\right], \quad U_{МГ}(t) = \frac{(t_0 - t)\sqrt{e}}{\rho} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\rho^2}\right], \qquad (4)$$

где ρ – параметр, определяющий длительность импульса; t_0 – сдвиг по времени.

Модели ЛЧМН и ЛЧМС-сигналов создавались на основе спектральной $S_{ЛЧМ}(\omega)$ и временной $U_{ЛЧМ}(t)$ функций ЛЧМ-сигнала, определяемых соотношениями

$$S_{ЛЧМ}(\omega) = \begin{cases} \pi a^2 \left(1 - \exp\left[b \cdot (\omega_н - \omega)/\mu\right]\right)^2 / 2\mu, & \omega_0 - \Delta\omega/2 \le \omega \le \omega_0 - \omega_ф \\ \pi/2\mu, & \omega_0 - \omega_ф < \omega < \omega_0 + \omega_ф \\ \pi a^2 \left(1 - \exp\left[-b \cdot (\tau_u \mu + \omega_н - \omega)/\mu\right]\right)^2 / 2\mu, & \omega_0 + \omega_ф \le \omega \le \omega_0 + \Delta\omega/2 \end{cases},$$

$$U_{ЛЧМ}(t) = A(t) \cdot \cos\left(\omega_1 t \pm \mu t^2/2\right), \qquad (5)$$

где $A(t) = \begin{cases} a(1 - \exp[-bt]), & 0 \le t \le \tau_ф \\ 1, & \tau_ф < t < \tau_u - \tau_ф \\ a(1 - \exp[bt - b\tau_u]), & \tau_u - \tau_ф \le t \le \tau_u \end{cases}$ – огибающая; $a = \frac{1}{1 - \exp\left[-c\tau_ф\right]}$; b – крутизна фронтов; μ – скорость изменения частоты радиоимпульса; $\omega_н$ и ω_0 – несущая и центральная частоты; $\Delta\omega$ – ширина спектра; $\tau_ф$ – длительность фронтов; τ_u – длительность радиоимпульса; $\omega_ф = \Delta\omega\left(1/2 - \tau_ф/\tau\right)$.

Модель ШПШ-сигнала создавалась на основе спектральной $S_{НШ}(\omega)$ и временной $U_{НШ}(t)$ функций нормального «белого» шума, определяемых соотношениями

$$S_{НШ}(\omega)=\begin{cases}\int_0^{\tau_u} A(t)\xi(t)exp(-j\omega\cdot t)dt, & \omega_1\le\omega\le\omega_2\\ 0, & \omega<\omega_1,\ \ \omega>\omega_2\end{cases},\quad U_{НШ}(t)=A(t)\xi(t), \quad (6)$$

где τ_u – длительность сигнала; ω_1 и ω_2 – нижняя и верхняя частоты спектра; $A(t)$ – медленно меняющаяся огибающая; $\xi(t)$ – стационарный Гауссов случайный процесс с ограниченным спектром и нулевым математическим ожиданием.

При моделировании рассматривался случай нахождения РЛС и цели на высотах ~ 300 км, соответствующих максимуму концентрации электронов в ионосфере (рис. 1), дальность до цели R составляла R_1 = 600 м и R_2 = 6000 м. Ширина спектров ЛЧМ и ШПШ излучаемых сигналов составляла Δf ~ 0,6 ГГц при центральной частоте f_0 ~ 1 ГГц, их длительность ~ 4 мкс. Длительность СКИ-сигнала составляла ~ 1 нс.

На рис. 1 приведены осциллограммы излучаемых и принимаемых сигналов при дальностях до цели R_1 = 600 м и R_2 = 6000 м.

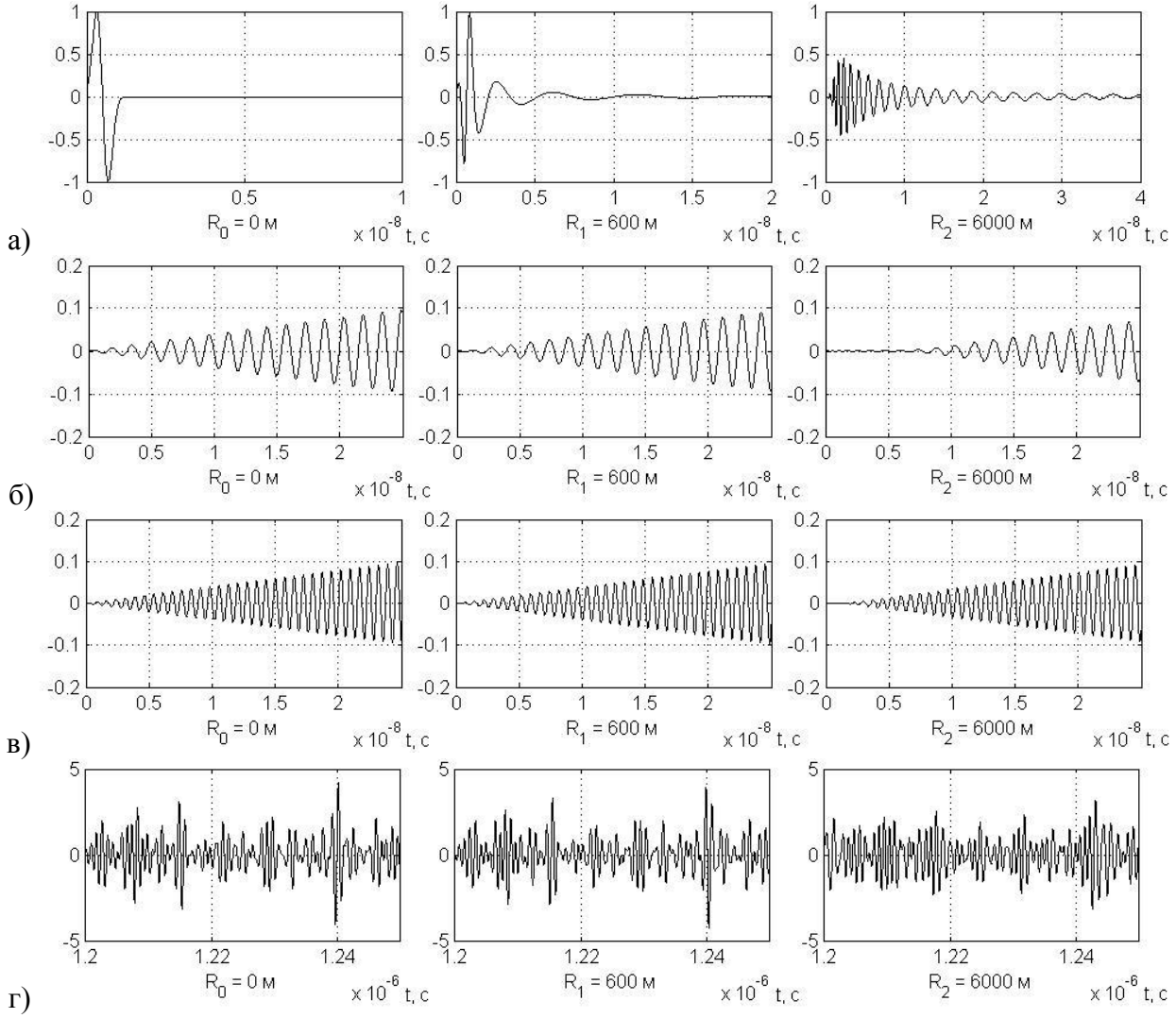


Рис. 1. Осциллограммы излучаемых (R_0 = 0 м) и принимаемых сигналов: а) СКИ-сигнала; б) и в) начальных участков ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов; г) ШПШ-сигнала

Теоретические исследования прохождения сигналов с широким спектром через ионосферу [2,4-6] показали, что дисперсионные искажения приводят к значительным

изменениям временной формы сигналов, вызванным смещением более низкочастотных спектральных составляющих вправо по временной оси. Для СКИ-сигнала характерно преобразование излучаемого моноцикла Гаусса в ЧМ-радиоимпульс, для ЛЧМН-сигнала – первоначальное уменьшение длительности с увеличением амплитуды и последующее растяжение во времени при дальнейшем распространении. Для ЛЧМС-сигнала и ШПШ-сигнала дисперсионные искажения проявляются в виде увеличения их длительности при уменьшении амплитуды. Для всех рассматриваемых видов сигналов наблюдается дополнительное запаздывание при распространении в ионофоре, связанное с дисперсией фазовой скорости сигналов. Форма огибающей энергетических спектров рассматриваемых сигналов после прохождения через ионосферу Земли почти не изменяется.

Модель РЛС с обработкой сигналов методом ВКО

Взаимно-корреляционный метод обработки сигнала основан на процедуре определения взаимно-корреляционной функции $K(\tau_0)$ принимаемого $U(t)$ и задержанного излучаемого (опорного) $U_0(t-\tau_0)$ сигналов, реализуемой многоканальным коррелятором.

Значение корреляционного интеграла для детерминированных сигналов в виде СКИ- и ЛЧМ-сигналов можно определить как

$$K(\tau_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t)U_0(t,\tau_0)dt, \qquad (7)$$

где τ_0 – задержка опорного сигнала в ШЛЗ.

Для ШПШ-сигнала будем рассматривать среднее значение корреляционного интеграла $M\{K(\tau_0)\}$.

Модель РЛС с обработкой сигнала методом ВКО представлена на рис. 2.

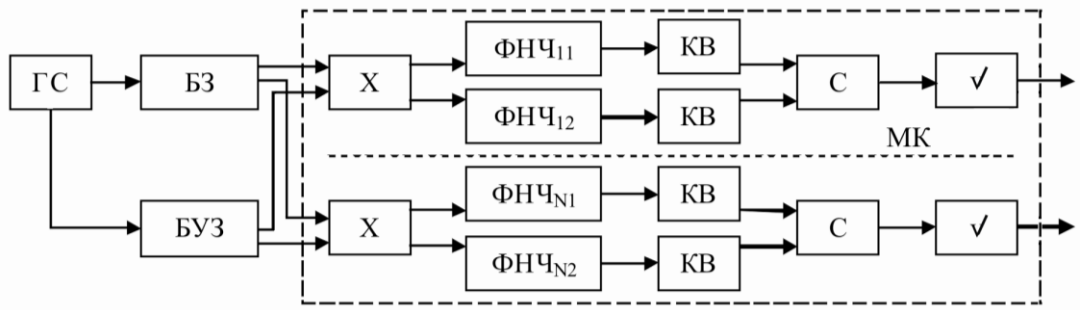


Рис. 2. Схема модели РЛС с обработкой сигнала методом ВКО

На схеме рис. 2 приняты следующие обозначения: ГС – генератор сигнала; БЗ – блок задержки; БУЗ – блок управляемой задержки; Х – квадратурные перемножители; ФНЧ – фильтры низкой частоты; КВ – квадраторы; С – сумматоры; √ – устройства извлечения квадратного корня.

Для исключения зависимости амплитуды выходных сигналов от начальной фазы в модели РЛС каналы МК построены на основе квадратурного принципа.

Результаты моделирования обработки принимаемых сигналов РЛС с ВКО

Исследования приёма сигналов с учётом искажений при прохождении через ионосферу Земли проводились с использованием модели РЛС, приведённой на рис. 2.

На рис. 3а приведены результаты моделирования работы РЛС для излучаемого СКИ-сигнала; на рис. 3б – для излучаемых ЛЧМН- и ЛЧМС- сигналов; на рис. 3в – для излучаемого ШПШ-сигнала.

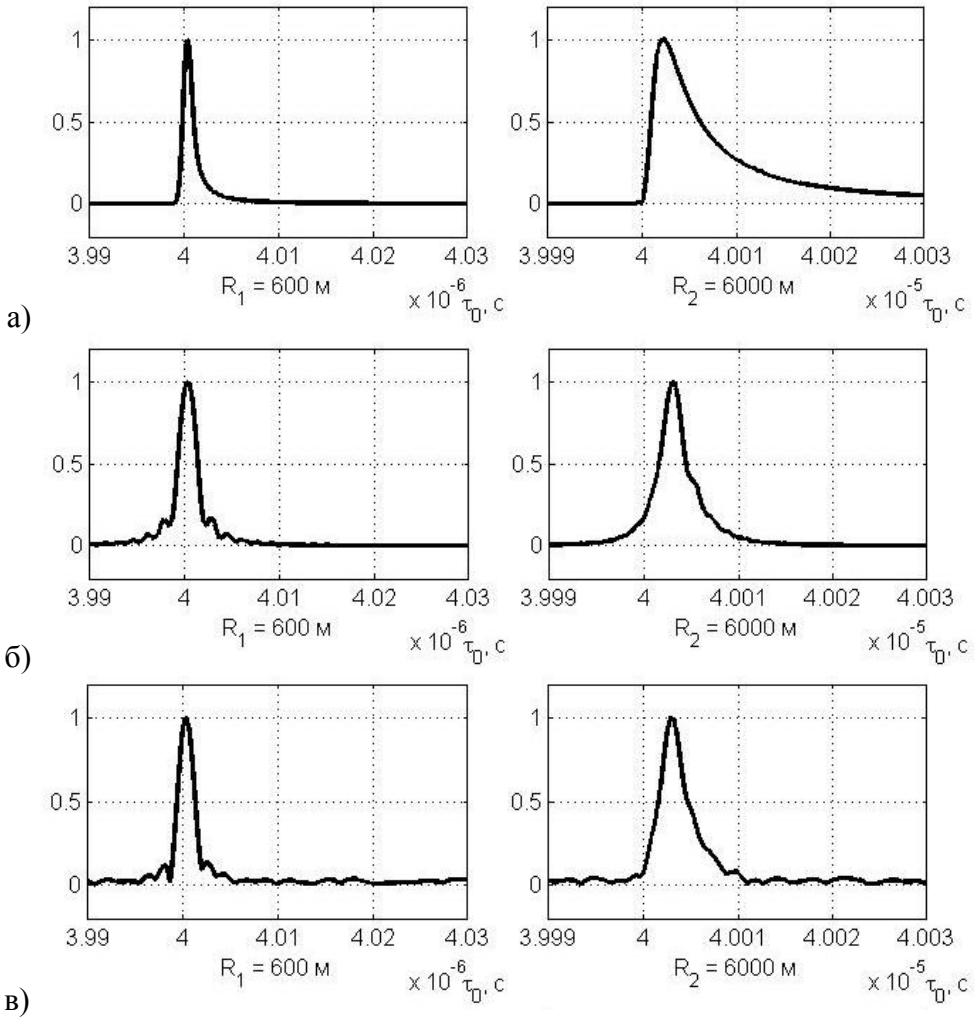


Рис. 3. Результаты моделирования работы РЛС для излучаемых: а) СКИ-сигнала; б) ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов; в) ШПШ-сигнала

На рис. 3 видно, что искажение СКИ-сигнала при прохождении через ионосферу приводит к несимметричному расширению корреляционной функции преимущественно в область больших задержек и смещению её максимума в ту же область. Искажения ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов приводят к идентичным искажениям их корреляционных функций в виде почти симметричного их расширения и несколько большему по сравнению с корреляционной функцией СКИ-сигнала смещению их максимумов в область больших задержек. Искажение ШПШ-сигнала приводит к расширению корреляционной функции и смещению её максимума в область больших задержек на величину, примерно равную величине смещения максимумов корреляционных функций для ЛЧМН и ЛЧМС-сигналов.

Наблюдаемое смещение определяемого расстояния до цели является одинаковым для ЛЧМН, ЛЧМС и ШПШ-сигналов и для R_2 = 6000 м составляет величину ~ 0,45 м в большую сторону; для СКИ-сигнала смещение для R_2 = 6000 м составляет величину ~ 0,3 м. Таким образом, величина смещения зависит от относительной полосы частотного спектра рассматриваемого сигнала.

Заключение

Результаты проведённых исследований показали возможность обработки в бортовых РЛС методом ВКО сигналов с широким спектром с учётом их дисперсионных искажений на ионосферной трассе.

Для всех видов рассмотренных сигналов при обработке методом ВКО наблюдается расширение взаимно-корреляционной функции со смещением её главного максимума в область бóльших задержек, т. е. полученные результаты измерений дальности до цели будут являться завышенными. Численные оценки показали, что для СКИ-сигнала ошибка измерения дальности РЛС меньше, чем для ЛЧМ- и ШПШ-сигналов. Величина необходимой поправки к измеренной дальности пропорциональна дальности до цели.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке бортовых РЛС, определяющих дальность до целей, находящихся в пределах ионосферы.

Библиографический список

1. Радиоприёмные устройства / Под ред. Жуковского А.П. М.: Высшая школа, 1989, 342 с.

2. Белов А.С., Яркина Е.Ю. Особенности распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в ионосфере Земли // Труды XIV научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2010, С. 16-17.

3. ГОСТ 25645.146-89 Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов.

4. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2 Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия, Т. 13, № 4, 2008, С. 270-322.

5. Катин С.В., Козлов В.А., Кунилов А.Л., Ивойлова М.М. Искажения сигналов СШП-шумовых РЛС на ионосферной трассе и их влияние на качество приёма // Антенны, Вып. 1 (221), 2016, С. 68-75.

6. Петренко П.Б., Бонч-Бруевич А.М. Моделирование и оценка ионосферных искажений широкополосных радиосигналов в локации и связи // Вопросы защиты информации, № 3, 2007, С. 24-29.

M.M. Ivoylova, V.A. Kozlov, A.L. Kunilov

DISPERSION DISTORTIONS RESEARCH OF THE BROADBAND SIGNALS DURING THEIR SPREAD IN THE EARTH IONOSPHERE AND PROCESSING FEATURES OF SUCH SIGNALS WITH CROSS-CORRELATION METHOD NOBOARD RADAR

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

In this article on the basis of common methodology, there is researched the possibility of cross-correlation method processing of wide spectrum signals passing through the Earth ionosphere: ultrashort pulses, chirp radio-frequency pulses and broadband noise signals. The radar distance measurement expected error number estimates are obtained.

Keywords: wide spectrum signal processing, signals ionospheric distortion, onboard radar

УДК 621.396.67

И.А. Илларионов, Е.Л. Варенцов, М.И. Дудкин

НОВЫЕ ТОПОЛОГИИ МИНИАТЮРНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН С НЕСТАБИЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОДЛОЖКИ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований миниатюрных микрополосковых антенн, выполненных на подложках из керамического материала. Предложены две топологии антенн, обеспечивающие плавную настройку характеристик в диапазонах L1 и L2 ГЛОНАСС при условии нестабильных значений относительной диэлектрической проницаемости материала подложки. Разработанные конструкции приемных антенн ГЛОНАСС обладают малыми габаритами и высокой технологичностью.

Ключевые слова: микрополосковые резонансные антенны, миниатюризация антенн, двухдиапазонные антенны, методы настройки антенн, коэффициент эллиптичности, коэффициент усиления.

Введение

Микрополосковые антенны широко применяют в аппаратуре систем спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС [1]. Это обусловлено конструктивными преимуществами этого типа антенн - малой высотой микрополосковых печатных излучателей (МПИ) по отношению к длине волны. МПИ имеют широкую диаграмму направленности (ДН) в Е-плоскости и Н-плоскости с максимумом ортогонально плоскости антенны и экрана при возбуждении основной моды TM_{010} [2]. ДН МПИ близка к изотропной в одном полупространстве, что является необходимым для повышения вероятности определения координат объектов по нескольким спутникам глобальных навигационных систем (PDOP).

При возбуждении в патч-антенне, согласно резонаторной модели, двух ортогональных мод существует возможность получения круговой поляризации излучения антенны. МПИ антенны допускают миниатюризацию, одним из способов которой является применение в качестве подложек материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Однако это приводит к уменьшению рабочей полосы частот антенны и ухудшению основных характеристик - коэффициента усиления (КУ) и коэффициента эллиптичности (КЭ). МПИ круговой поляризации допускают уменьшение размеров. Основными методами миниатюризации МПИ являются: 1) применение в качестве подложек материалов с высокой диэлектрической проницаемостью [3]; 2) техника модификации проводников антенны или применение структур в форме меандра [4]; 3) применение закорачивающих стенок и штырей [5]; 4) применение емкостного возбуждения [6].

Основной задачей исследования являлась разработка малогабаритной микрополосковой антенны, имеющей электрически малые размеры [7]. На рисунок 1 схематично представлен МПИ, заключенный внутри воображаемой сферы радиусом a, обладающей минимальными размерами и описывающей антенну. Это так называемая сфера Чу [8]. Электрически малыми антеннами называют антенны, удовлетворяющие критерию $ka < 0{,}5$ [8], где $k = 2\pi / \lambda$. Общими свойствами электрически малых антенн являются [9]: 1) добротность антенн Q пропорциональна $(ka)^{-3}$; 2) относительная полоса частот BW пропорциональна $(ka)^3$ (т.е. $BW \approx 1/Q$); 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 КУ. Все это является основной проблемой, стоящей перед разработчиками малогабаритных антенн. В случае антенн круговой поляризации дополнительной проблемой является снижение частотной полосы антенны по заданному уровню КЭ.

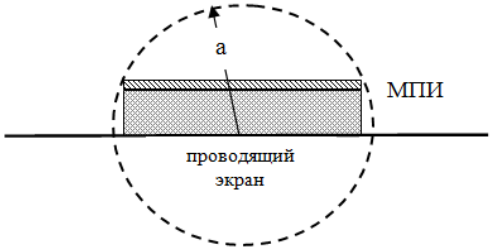


Рис. 1. К определению электрически малой антенны

Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Проектируемая малогабаритная микрополосковая антенна должна обладать следующими характеристиками: 1) максимальное значение коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны в диапазонах L1, L2 ГЛОНАСС не более 2.5, 2) правая круговая поляризация излучения, коэффициент эллиптичности (КЭ) в рабочей полосе антенны не выше 10дБ, КЭ на центральных частотах диапазонов не более 3 дБ, 3) абсолютное значение коэффициента усиления (КУ) в рабочей полосе частот не ниже 3 дБ. Дополнительным требованием к рассматриваемой конструкции антенны являлось размещение под крышкой-обтекателем, изготовленной из материала со значением относительной диэлектрической проницаемости в интервале 3-4. Нестабильность диэлектрической проницаемости материала крышки является дополнительной сложностью при проектировании антенны.

Для того чтобы обеспечить работу антенны в двух диапазонах L1 и L2, отношение центральных частот которых равно 1.602÷1.246 =1.28, была использована двухъярусная топология [7] (рисунок 2). В целях упрощения конструкции в антенне осуществляется питание одним штырем коаксиальной линии. Прямой контакт с линией питания имеет только верхний излучатель МПИ1, отвечающий за излучение в L1 диапазоне.

Рис. 2. Двухъярусная топология

Основной параметр миниатюризации антенны в данном случае – достижение минимально возможных размеров. В представленной работе ориентировались на размеры антенны GPS навигации: 31×31×12.8 мм, приведенной в [10].

В целях минимизации размеров антенны в качестве подложки использовался керамический материал (алюмооксидная керамика). Значение относительной диэлектрической проницаемости керамики нестабильно и варьируется в диапазоне $\varepsilon_r = 9.1...10.2$. Для МПИ резонансного типа классических топологий – прямоугольной, круглой формы - приведенный интервал случайного изменения относительной диэлектрической проницаемости является существенным препятствием при решении задачи синтеза геометрических размеров, так как резонансный размер, например, МПИ прямоугольной формы определяется [2]: $L \approx \frac{c}{2 \cdot f_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}}}$, где $\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2}\left(1+12\frac{h}{W}\right)^{-1/2}$,

W – ширина МПИ, h- толщина подложки, ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки, f_0 – резонансная частота, c – скорость света, L- длина антенны. Таким

образом, при неконтролируемом, случайном изменении относительной диэлектрической проницаемости в МПИ классической топологии будет существенно изменяться резонансная частота, что для узкополосных антенн недопустимо. На рис.3 приведена рассчитанная частотная зависимость коэффициента отражения МПИ квадратной формы, размеры которого синтезировались на значение относительной диэлектрической проницаемости ε=9.1. Из рис.3 видно, что увеличение ε до 10.2 приводит к недопустимому смещению резонансных частот в относительной полосе 4,8% (61 МГц в L2 диапазоне), при этом относительная полоса частот антенны 1,5% (20МГц) по уровню КСВн=2.2.

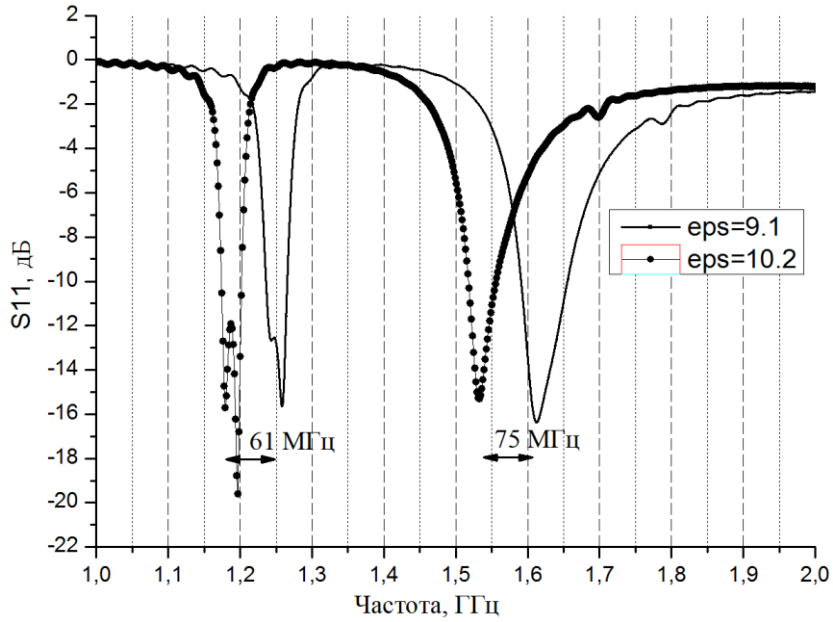


Рис. 3. Частотные зависимости КО антенны №1 при изменении значения относительной диэлектрической проницаемости подложки

Для того чтобы учесть возможные нестабильные значения относительной диэлектрической проницаемости в работе предложено две новые топологии двухъярусных микрополосковых антенн, представленные на рис.4.

Особенностями конструкции первого варианта антенны (рис.4 слева) является наличие пазов на периферии прямоугольных печатных излучателей. Закорачивание данных пазов на антенне позволяет проводить плавную настройку резонансных частот. В процессе настройки на пазы антенны на периферии напаиваются металлические перемычки, что приводит к увеличению резонансных частот антенны. Таким образом, конструкция антенны численно оптимизировалась на относительную диэлектрическую проницаемость антенны $\varepsilon_r = 9.1$ (наименьшее значение), а дальнейшая работа по достижению заданной резонансной частоты выполнялась при настройке.

Особенностями конструкции второго варианта антенны (рис.4 справа) является наличие микрополосков на периферии топологии. В отличие от первого варианта в процессе настройки микрополосковые линии излучателей подрезаются - укорачиваются, что приводит к увеличению значений резонансных частот антенны. Таким образом, конструкция антенны численно оптимизировалась на относительную диэлектрическую проницаемость антенны $\varepsilon_r = 9.1$ (наименьшее значение), а дальнейшая работа по достижению заданной резонансной частоты выполнялась при настройке.

Для получения правой круговой поляризации излучения на верхнем и нижнем МПИ первого варианта выполнена подрезка углов металлизации: сторона подрезанного треугольника верхнего излучателя S_1, нижнего S_2. Подрезка углов приводит к возбуждению двух ортогональных мод с резонансными частотами [2]: $f_1 = f_r\left[1-\frac{S_1^2}{A^2}\right]$, $f_2 = f_r$. Круговая поляризация излучения возникает

на частоте, являющейся средним арифметическим f_1, f_2, необходимым условием при этом является: $\frac{S_1^2}{A^2} = \frac{1}{Q}$, где Q - в первом приближении ненагруженная добротность основной моды МПИ квадратной формы, которую определяем по результатам моделирования в CST MS. Для получения правой круговой поляризации излучения на верхнем и нижнем МПИ второго варианта в топологию металлизации антенны введены дополнительные квадратные проводники, расположенные на диагонали квадрата (см. рис. 4 справа).

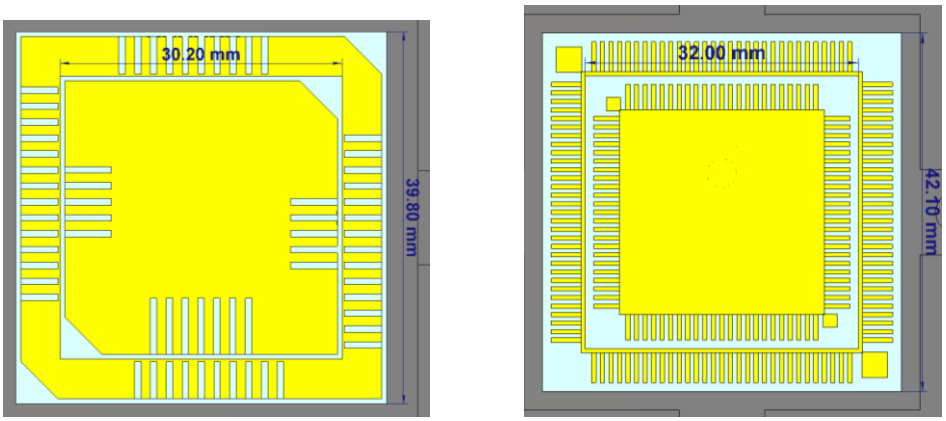


Рис. 4. Разработанные топологии миниатюрных МПИ

На рисунке 5 приведены фотографии изготовленных макетов вариантов антенн ГНСС без радиопрозрачных крышек. Были проведены экспериментальные исследования макетов.

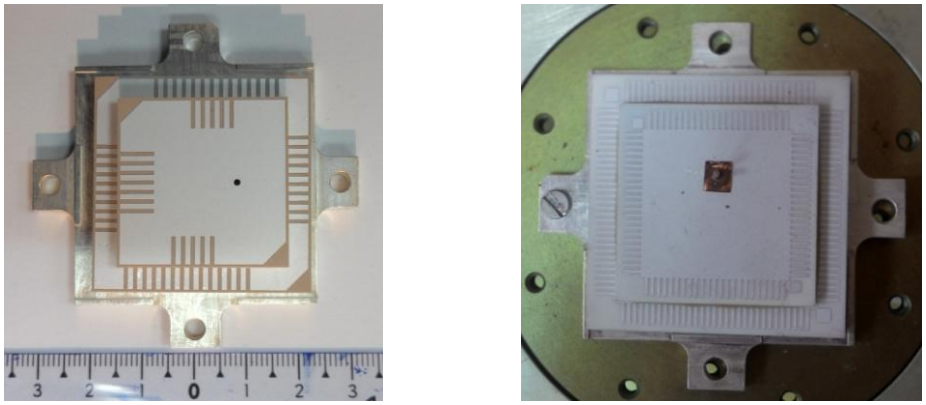


Рис. 5. Исследуемые макеты миниатюрных МПИ

На рисунке 6 (слева) приведена измеренная частотная зависимость КСВн первого варианта антенны настроенной в процессе измерения на резонансные частоты. На рисунке 6 (справа) приведена круговая номограмма Вольтперта-Смита. Как видно из рисунка 6 антенна успешно настроена на диапазоны частот L1 и L2 ГЛОНАСС. Наибольшее значение КСВн в диапазоне L1 составляет 1.55, в диапазоне L2 – 2.1. На номограмме в диапазонах видна перетяжка, что соответствует случаю возбуждения двух ортогональных мод. Перетяжка соответствует минимуму коэффициента эллиптичности антенны, который находится на центральных частотах диапазонов L1 и L2.

Результаты измерения коэффициента усиления и коэффициента эллиптичности приведены на рисунке 6. Все измерения характеристик антенн проводились при размещении антенн на квадратном фланце размерами 30×30 см.

Антенны имеет круговую поляризацию излучения с наименьшим КЭ (для первого варианта) в диапазоне L1 - 0,85 дБ, в диапазоне L2 1.2 дБ.

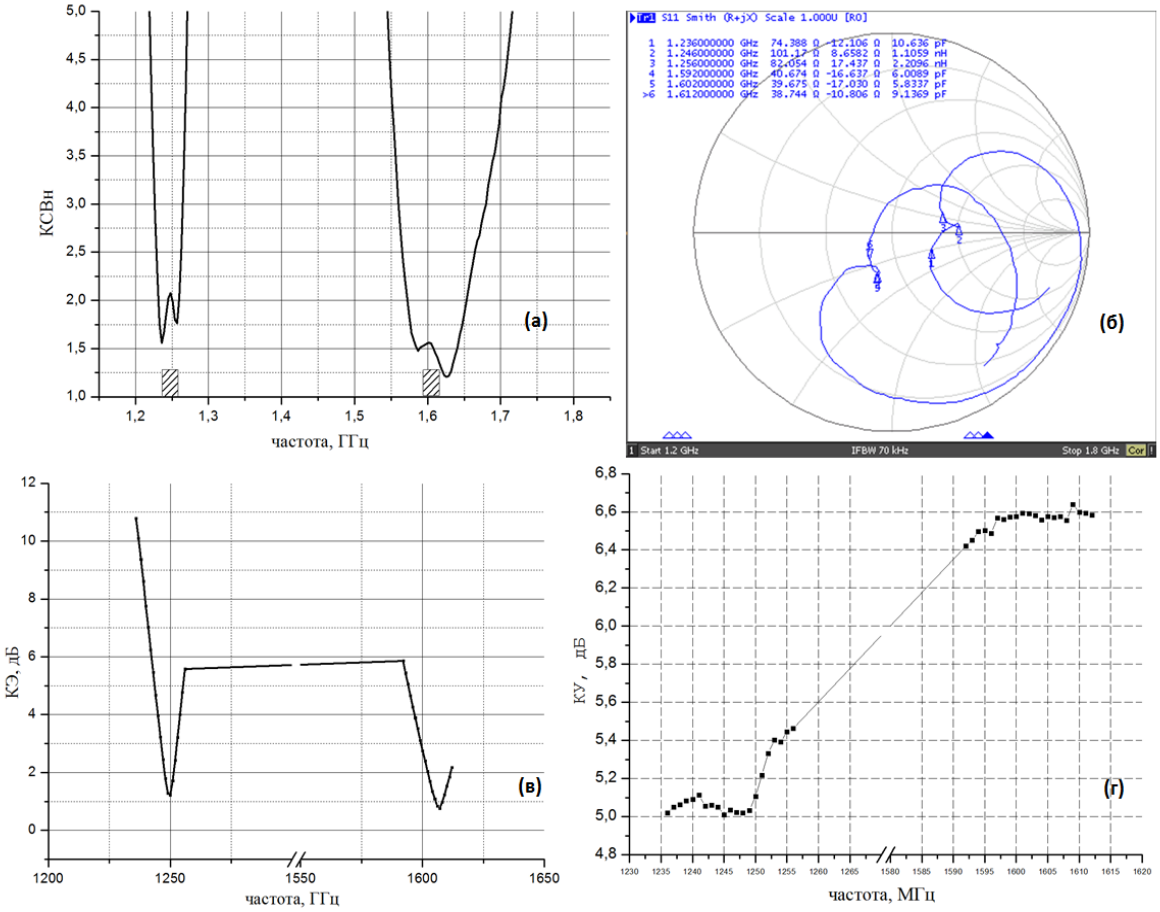


Рис. 6. Измеренные характеристики первого варианта антенны: (а)- частотная зависимость КСВн, (б)- номограмма Вольперта-Смита, (в)- частотная зависисмость КЭ, (г) – частотная зависимость КУ

С целью исследования возможностей настройки антенны - все пазы на периферии первого варианта антенны были запаяны - резонансные частоты антенны увеличились: центральные частоты полос антенны составили 1308 МГц и 1730 МГц. Таким образом, смещение резонансных частот антенны после запайки всех пазов составило 70 МГц в нижнем поддиапазоне, 130 МГц в верхнем поддиапазоне, что полностью компенсирует необходимое смещение частот, вызванное нестабильным значением относительной диэлектрической проницаемости подложки ε=9.1…10.2.

Выводы

В работе приведены результаты проектирования и исследования двух вариантов миниатюрных двухдиапазонных антенн спутниковой навигации. В антеннах использована двухъярусная топология микрополосковых печатных излучателей с подложкой из керамического материала с относительной диэлектрической проницаемостью 9.1…10.2.

В антеннах применяется оригинальная топология металлизации, которая обеспечивает плавную настройку резонансных частот в условиях нестабильного значения относительной диэлектрической проницаемости материала подложки. Исследованы возможности настройки антенн. Разработанные конструкции антенн позволяют применять керамические материалы подложек с нестабильными значениями относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне $\varepsilon_r = 9.1...10.2$. К недостаткам антенн можно отнести узкую частотную полосу по значению КЭ=3, что является следствием одноточечного возбуждения. Однако отмеченный недостаток компенсируется миниатюрными размерами антенн и простотой конструкции.

Библиографический список

1. B. Rama Rao, W. Kunysz, R. Fante, K. McDonald. GPS/GNSS antennas.- Artech House, 2013, 574 p.
2. Balanis, Constantine A. Antenna Theory Analysis and Design.- John Wiley, 1997,
3. Steven (Shichang) Gao, Luo Qi and Zhu Fuguo. Circularly polarized antennas.- 2014, John Wiley & Sons, Ltd, 317 p.
4. W.-S. Chen, C.-K. Wu, and K.-L. Wong. Square-ring microstrip antenna with a cross strip for compact circular polarization operation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation.-1999.-Vol.47(10).-P.1566–1568.
5. H. Wong, K.K. So, K.B. Ng, K.M. Luk, C.-H. Chan, and Quan Xue. Virtually shorted patch antenna for circular polarization / // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.-2010.-Vol.9.-P.1213–1216.
6. Z. Wang, S. Fang, and S. Fu A low cost miniaturized circularly polarized antenna for UHF radio frequency identification reader applications// Microwave and Optical Technology Letters.-2009.-Vol.51(10).- P.2382–2384.
7. И.А. Илларионов, М.И. Дудкин, А.В. Кузнецов, Е.В. Зверева, И. П. Ярославцева Исследование характеристик и методов настройки двухдиапазонных миниатюрных микрополосковых антенн спутниковой навигации с подложкой из керамического материала // Антенны.-2016, Вып.1 (221).- С.24-32.
8. Volakis, John L. Small antennas. Minituaturization techniques and applications / John L. Volakis, Chen Chi-Chin, Fujimoto Kyohei // Mc Graw Hill, 2010, 428 p.
9. Kyohei Fujimoto, Morishita Hisaishi. Modern small antennas / // Cambridge University press, 2013, 473 p.
10. Y. Zhou, Chen C.-C., Volakis J.L.Dual Band Proximity-Fed Stacked Patch antenna for tri-band GPS application // IEEE Trans. on Antennas and propagation.-2007.- Vol. 55 (1).- pp.220-223.

I.A. Illarionov, E.L. Varentsov, M.I. Dudkin

NEW DESIGNS OF MINIATURE MICROSTRIP ANTENNA WITH UNSTABLE VALUE OF SUBSTRATES RELATIVE PERMETTIVITY

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"

The results of numerical calculations and experimental studies of the key characteristics of the miniature microstrip antennas with ceramic substrate are presented. The new two forms- topologies of the patch on the ceramic substrate are proposed. The new forms of the patch antennas ensure sensitive adjustment of the resonant frequencies provided that value of substrates relative permittivity is unstable 9.1…10.2. The proposed designs of receiving antennas GLONASS have small dimensions and high manufacturability.

Key words: microstrip antennas, antennas miniaturization, dual-band antennas, adjustments techniques, axial ratio, gain, radiation pattern.

УДК 621.396.67

М.И. Дудкин, И.А. Илларионов, Е.Л. Варенцов

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ: МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО 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»

В работе описаны подходы к проектированию интегрированных антенных систем сантиметрового диапазона длин волн. Приводятся результаты численных и экспериментальных исследований антенных систем на базе микрополосковых излучателей. Предлагаются инженерные методики создания интегрированных антенных систем широкой области применения.

Ключевые слова: микрополосковые антенны, методы настройки антенн, широкополосные антенны, антенные решетки, 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), C (4-8ГГц), Ku (12-18ГГц). 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.

Основными типами антенн, рассматриваемыми в работе, являются микрополосковые антенны различных топологий [1]. Именно данный тип антенн обеспечивает высокую интеграцию и миниатюризацию всего радиотехнического устройства (РТУ). Одним их основных результатов выполненной работы является создание теоретической и эмпирической базы микрополосковых антенных устройств разработчика.

Новизна работы заключается в разработке и исследовании микрополосковых антенных систем, имеющих оригинальную топологию, обеспечивающую заданные характеристики излучения и требуемый уровень интеграции с приемопередатчиками, позволяющий использование технологии изготовления многослойных печатных плат. Приведенные в работе 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 gape (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 таблице 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 1, 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.

Таблица 1

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 настроечного 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.

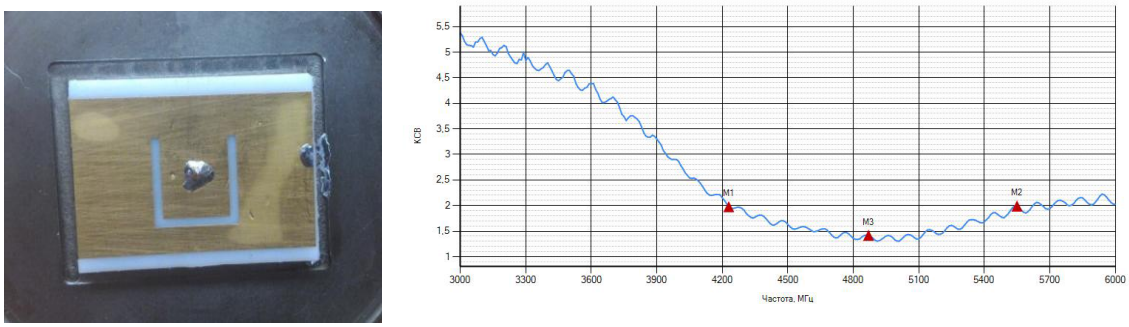


Рис. 1. Антенна S – диапазона (слева), измеренное значение КСВн (справа)

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 (см. рис.2 (слева)), интегрированных с платами приемопередающих модулей (ППМ) и расположенных на цилиндрической поверхности под радиопрозрачным обтекателем.

Пары антенн (T/R) расположены на плоскостях. Плоскости расположения антенн параллельны оси цилиндра и располагаются под углом 60° 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 RO4350B. 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 положке показаны на рисунке 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.

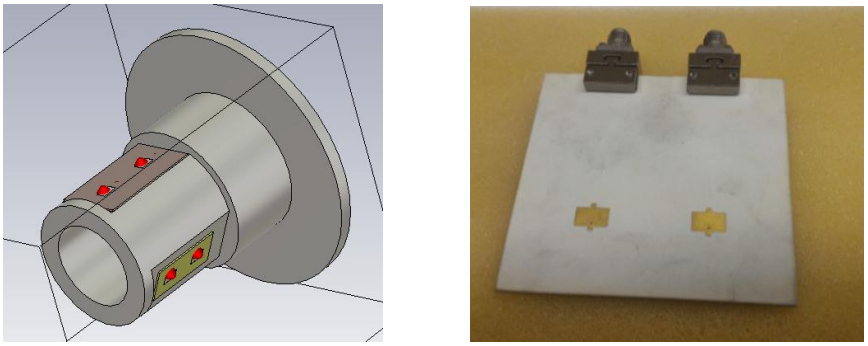


Рис. 2. АС Ku – диапазона (слева), предмакет АС (справа)

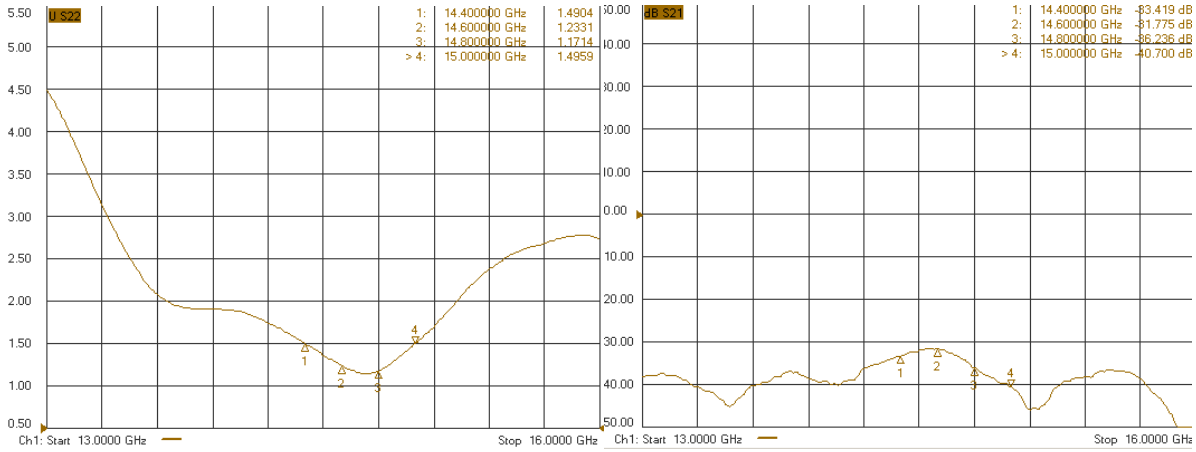


Рис. 3. Частотная зависимость КСВн одного МПИ АС Ku – диапазона (слева), развязка АС (справа)

Антенная решетка С-диапазона. Был разработан вариант микрополоскового печатного излучателя с рабочей частотной полосой 4-4.5 ГГц, применение которого в составе антенной решетки (АР) минимизирует паразитные эффекты рассогласования элементов с линией возбуждения, связанные с взаимодействием элементов по внутреннему и внешнему пространству. К антенной решетке предъявлялись следующие требования: ширина диаграммы направленности по половине мощности не менее 20°; коэффициент усиления не менее 15 дБ; уровень боковых лепестков не хуже минус 18 дБ.

По причине жестких требований к массогабаритным характеристикам АР - излучающий элемент АР представляет собой МПИ прямоугольной формы (см. рис.4) [8]. Для минимизации эффектов взаимодействия элементов АР, которые приводят к изменению резонансных частот элементов, был применен элемент с широкой частотной рабочей полосой. Для этого МПИ прямоугольной формы возбуждался с помощью апертуры - щели, а топология АР выполнена с использованием 3-х слоев диэлектрика [7].

Были исследованы варианты построения микрополосковых АР с использованием модульной системы построения подрешеток. В антенне применена схема равноамплитудного распределения возбуждения с использованием микрополосковых линий с Т – делителями.

АР обладает осевым излучением и имеет устойчивую диаграмму направленности в широкой полосе частот. Был изготовлен макет АР с числом элементов 4×4. Данные измерений макета АР удовлетворительно согласуются с данными численных исследований.

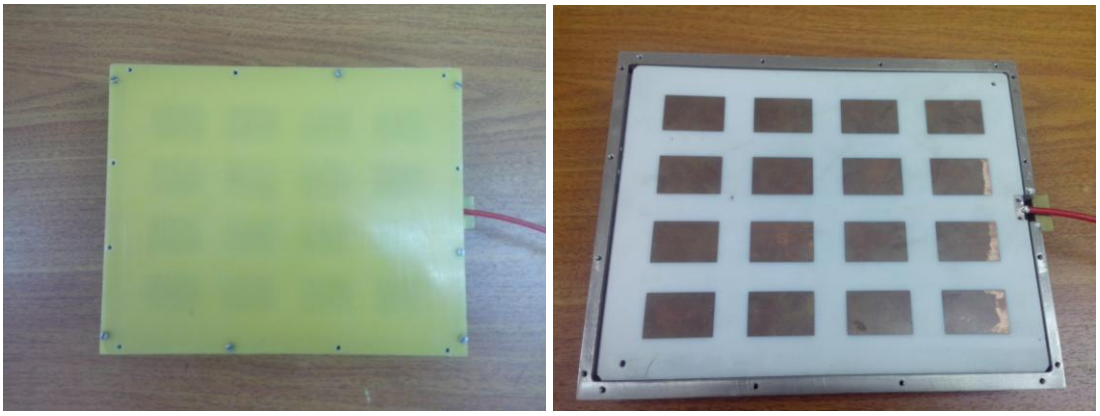


Рис. 4. Внешний вид антенной решетки и решетка со снятой крышкой

На рисунке 5 приведена частотная зависимость КО АР. Как видно из рисунка применение апертурного возбуждения расширило рабочую полосу антенны – 3.6…4.5 ГГц, таким образом, конструкция является стойкой к технологическим допускам изготовления и не требует дополнительной отработки-настройки. На рис. 6 приведены ДН АР в Е- и Н-плоскостях на частоте 4.2 ГГц.

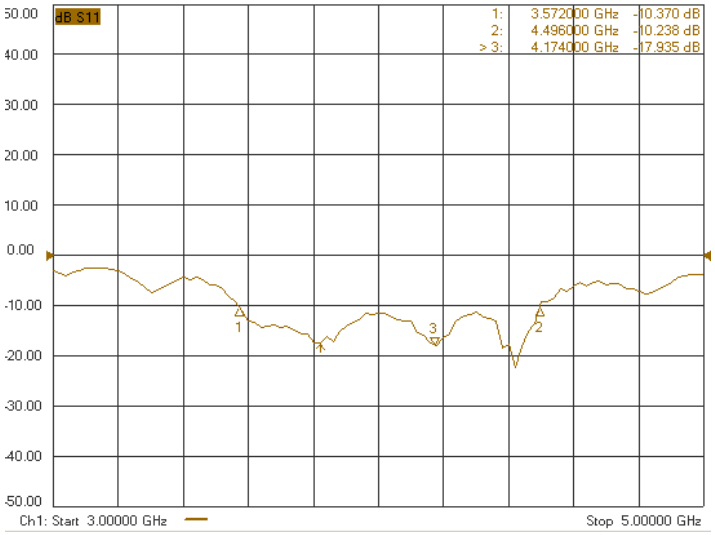


Рис. 5. Частотная зависимость КО АР

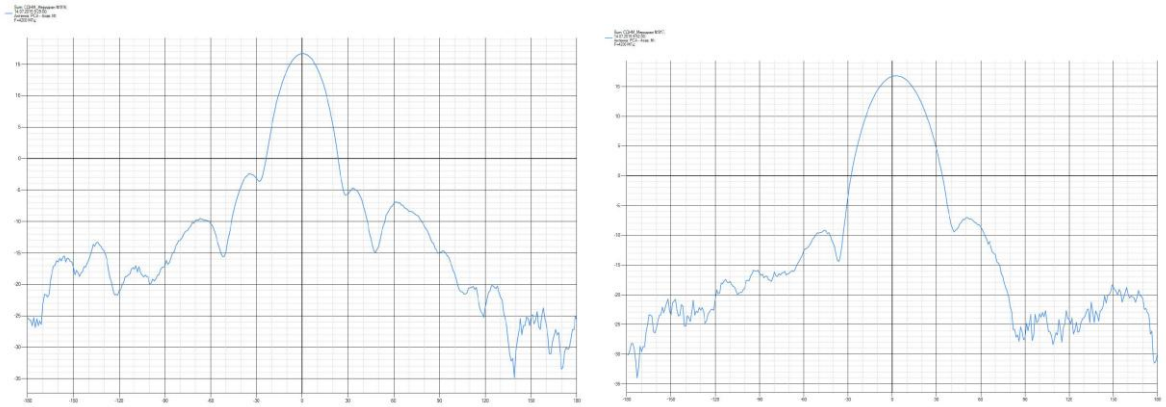


Рис. 6. ДН АР в Е и Н плоскости на частоте 4.2 ГГц.

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. Именно данный 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

INTEGRATED ANTENNAS. THE DESIGN TECHNIQUES AND EXPERIMENTAL METHODES

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"

The approaches of the design of integrated antenna systems of centimeter wavelength range are described. The results of numerical calculations and experimental studies of the key characteristics of the miniature microstrip antennas are presented. The engineering techniques of designing of the integrated antenna systems of a wide range of applications are proposed.

Key words: microstrip antennas, wideband antennas, antennas array, gain, radiation pattern, radars.

УДК 690.192; 623.624.9

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

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

Представлена новая методика измерения электрофизических параметров многослойных радиопоглощающих покрытий. Основу методики составляет электродинамическая модель распространения поля поверхностной медленной электромагнитной волны в многослойном радиопоглощающем покрытии. Проведена верификация модели в системе электродинамического моделирования CST Studio Suite.

Ключевые слова: радиопоглощающее покрытие, характеристическое уравнение, электрофизические параметры, система электродинамического моделирования.

Снижение радиолокационной заметности (РЛЗ) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) является одним из важнейших факторов повышения их живучести и боевой эффективности. Поэтому при модернизации существующих и создании новых образцов ВВСТ в Россиии и за рубежом данному вопросу уделяется значительное внимание [1].

Одним из распространенных и эффективных способов снижения радиолокационной заметности ВВСТ является применение многослойных радиопоглощающих покрытий (РПП) на их наиболее отражающих элементах [1]. При оптимальном выборе РПП и мест их нанесения можно уменьшить величину эффективной площади рассеяния (ЭПР) образцов ВВСТ на порядок и более.

В процессе проектирования и эксплуатации РПП актуальной является задача точного и достоверного измерения их электрофизических параметров (ЭФП) в диапазоне СВЧ.

В [1] нами представлен радиоволновый метод измерения ЭФП *однослойных* РПП, 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 параметров.

Целью представленной работы является разработка методики измерения ЭФП *многослойного* РПП.

Для обоснования методики измерения ЭФП многослойного РПП необходимо разработать электродинамическую модель распространения поля ПМЭМВ в многослойном РПП. Математическая модель должна достоверно описывать зависимость коэффициента ослабления поля ПМЭМВ α_y многослойного РПП, при любом числе слоев.

Основу математической модели составляет характеристическое уравнение, связывающее измеренное значение коэффициента ослабления поля ПМЭМВ α_y с электрофизическими параметрами РПП.

Нахождение характеристического уравнения многослойного РПП может быть выполнено на основе модифицированного метода поперечного резонанса [2]. При этом входным информативным параметром характеристического уравнения является коэффициент ослабления поля ПМЭМВ α_y.

Сущность предлагаемого метода расчета состоит в замене многослойного РПП, эквивалентной схемой. Каждому слою РПП ставится в соответствие четырехполюсник, который представляет собой отрезок линии передачи с длиной равной толщине слоя и соответствующим волновым сопротивлением.

Характеристическое уравнение многослойного РПП составляется при условии равенства волновых сопротивлений «вверх» и «вниз» относительно произвольно выбранного опорного сечения:

$$\vec{Z}(y) = \vec{Z}(y), \qquad (1)$$

где $\vec{Z}(y)$ и $\vec{Z}(y)$ − входные импедансы согласованных линий (волновые сопротивления «вверх» и «вниз») от опорного сечения y_0.

В ходе проведенных исследований установлено, что представленный подход справедлив при любом числе слоев РПП. В качестве примера более подробно рассмотрим математическую модель для трехслойного РПП. Геометрия исследуемой модели приведена на рис. 1.

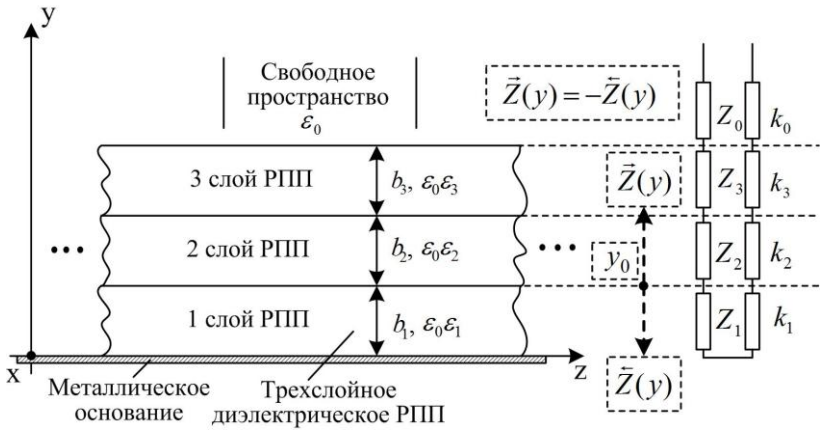


Рис. 1. Электродинамическая модель многослойного РПП

В качестве опорного сечения выберем границу между первым и вторым слоями РПП. Волновое сопротивление «вверх» (включающее слои 2, 3 и свободное пространство) может быть выражено путем последовательного применения формулы трансформации волновых сопротивлений [2].

Итоговое выражение для волнового сопротивления «вверх» относительно опорного сечения y_0 может быть представлено в следующем виде:

$$\vec{Z}_{230} = Z_3 \frac{Z_{30} + jZ_2 \tan(q_2 b_2)}{Z_2 + jZ_{30} \tan(q_2 b_2)}, \qquad (2)$$

где $Z_{30} = Z_3 \dfrac{Z_0 + jZ_3 \tan(q_3 b_3)}{Z_3 + jZ_0 \tan(q_3 b_3)}$ – волновое сопротивление «вверх» от начала 3 слоя; $Z_0 = -j\dfrac{\alpha_y}{\omega\varepsilon_0}$ – погонное волновое сопротивление свободного пространства, α_y - коэффициент ослабления поля ПМЭМВ; $Z_1 = \dfrac{q_1}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1}$ – погонное волновое сопротивление 1 слоя; $Z_2 = \dfrac{q_2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_2}$ – погонное волновое сопротивление 2 слоя; $Z_3 = \dfrac{q_3}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_3}$ – погонное волновое сопротивление 3 слоя; $q_1 = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 - \alpha_y^2}$ – коэффициент фазы 1 слоя; $q_2 = \sqrt{k_2^2 - k_0^2 - \alpha_y^2}$ – коэффициента фазы 2 слоя; $q_3 = \sqrt{k_3^2 - k_0^2 - \alpha_y^2}$ – коэффициент фазы 3 слоя; $k_0 = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного

пространства; $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_1}$ – волновое число первого слоя РПП; $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}$ – волновое число второго слоя РПП; $k_3 = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_3}$ – волновое число третьего слоя РПП; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; ε_0 – диэлектрическая постоянная; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – диэлектрические проницаемости 1, 2 и 3 слоя РПП соответственно; b_1, b_2, b_3 – толщина 1,2 и 3 слоя РПП соответственно.

Волновое сопротивления «вниз» относительно опорного сечения y_0 может быть представлено в следующем виде (слой РПП нагруженный на металлическую подложку):

$$\vec{Z}(y) = jZ_1 \tan(q_1 b_1) \quad (3)$$

Таким образом, итоговое характеристическое уравнение для трехслойного РПП на основе (1) может быть представлено в следующем виде:

$$\vec{Z}_{230} + jZ_1 \tan(q_1 b_1) = 0 \quad (4)$$

С использованием представленной математической модели возможно определение электрофизических параметров многослойных РПП при любом числе слоев.

В качестве примера рассмотрим методику определения диэлектрических проницаемостей и толщин на примере трехслойного РПП. Методика состоит из следующих этапов.

Этап 1. Производится измерение коэффициентов ослабления поля ПМЭМВ для шести близких значений длин волн генератора $\lambda_1, \lambda_2 ... \lambda_6$: $\alpha_{y_\lambda 1}, \alpha_{y_\lambda 2} \ldots \alpha_{y_\lambda 6}$.

Этап 2. Для каждого значения коэффициента ослабления $\alpha_{y_\lambda 1}, \alpha_{y_\lambda 2} \ldots \alpha_{y_\lambda 6}$ поля ПМЭМВ составляется характеристическое уравнение вида (4).

Этап 3. Совместное решение системы из шести характеристических уравнений для $\alpha_{y_\lambda 1}, \alpha_{y_\lambda 2} \ldots \alpha_{y_\lambda 6}$ позволяет определить диэлектрическую проницаемость ε и толщину b каждого слоя трехслойного РПП:

$$\begin{cases} \vec{Z}_{230_\lambda 1} + jZ_{1_\lambda 1} \tan(q_{1_\lambda 1} b_1) = 0 \\ \vec{Z}_{230_\lambda 2} + jZ_{1_\lambda 2} \tan(q_{1_\lambda 2} b_1) = 0 \\ ..... \\ \vec{Z}_{230_\lambda 6} + jZ_{1_\lambda 6} \tan(q_{1_\lambda 6} b_1) = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где $\vec{Z}_{230_\lambda 1}, \vec{Z}_{230_\lambda 2} ... \vec{Z}_{230_\lambda 6}$ – волновые сопротивления «вверх» относительно опорного сечения y_0 (включающее слои 2, 3 и свободное пространство), при длинах волн генератора $\lambda_1, \lambda_2 ... \lambda_6$, соответственно; $\vec{Z}_{1_\lambda 1}, \vec{Z}_{1_\lambda 2} ... \vec{Z}_{1_\lambda 6}$ – волновые сопротивления «вниз» относительно опорного сечения y_0, при длинах волн генератора $\lambda_1, \lambda_2 ... \lambda_6$, соответственно; $q_{1_\lambda 1}, q_{2_\lambda 2} ... q_{3_\lambda 6}$ – коэффициенты фазы 1 слоя РПП при длинах волн генератора $\lambda_1, \lambda_2 ... \lambda_6$

Достоверность и точность разработанной модели трехслойного РПП можно оценить, сравнивая результаты теоретических расчетов коэффициентов ослабления α_y поля ПМЭМВ в зависимости от значений диэлектрических проницаемостей и толщин слоев, с результатами, полученными с использованием систем электродинамического моделирования, таких как, например, CST Studio suit.

В качестве источника возбуждения электромагнитного поля ПМЭМВ была выбрана рупорная антенна, установленная на металлическую подложку со слоем исследуемого покрытия.

Общий вид разработанной электродинамической модели приведен на рис. 2.

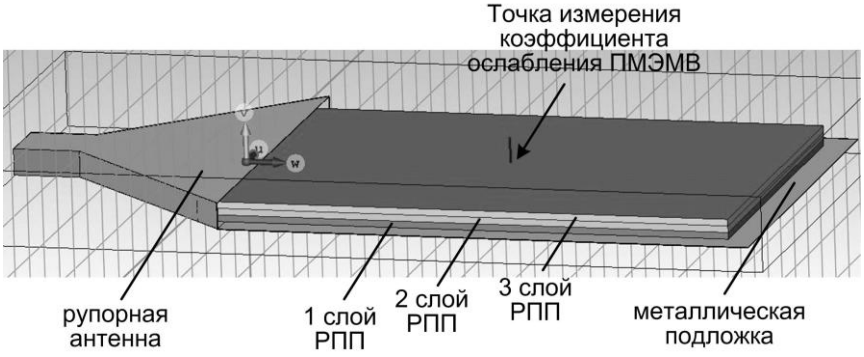


Рис 2. Электродинамическая модель трехслойного РПП в системе CST Studio Suite

Оценка напряженности поля ПМЭМВ проводилась в дальней зоне антенны по линии максимума диаграммы направленности. После завершения расчета для заданных значений покрытия, можно оценить общую трехмерную картину распределения поля ПМЭМВ и значение коэффициента ослабления в конкретной точке измерения.

В ходе исследований моделирование осуществлялось при различных параметрах трехслойного покрытия ($\varepsilon_1 = 5...16, \varepsilon_2 = 4...15, \varepsilon_3 = 3...14, b_1 = 1...11, b_2 = 1...11, b_3 = 1...11$). В качестве примера рассмотрим более подробно два варианта моделирования. В первом варианте толщина каждого слоя РПП была фиксирована ($b_1 = 2{,}5$ мм, $b_2 = 2{,}5$ мм, $b_3 = 2{,}5$ мм), а варьировались значения диэлектрической проницаемости слоев РПП ($\varepsilon_1 = 5...16, \varepsilon_2 = 4...15, \varepsilon_3 = 3...14$). Во втором варианте диэлектрическая проницаемость слоев РПП была фиксированной ($\varepsilon_1 = 5, \varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 3$), а варьировались значения толщины слоев РПП ($b_1 = 1...11, b_2 = 1...11, b_3 = 1...11$). Возбуждение поля ПМЭМВ осуществлялось на частоте $f = 10$ ГГц.

Результаты сравнения показаны на рис. 3 и 4. На каждом рисунке показана теоретическая кривая и полученная в результате моделирования в CST Studio suit. Анализ рис. 3 и 4 показывает, что отличие коэффициентов ослабления α_y, полученных теоретически и с помощью CST Studio suit не более 1%, что можно оценить как вполне хороший результат.

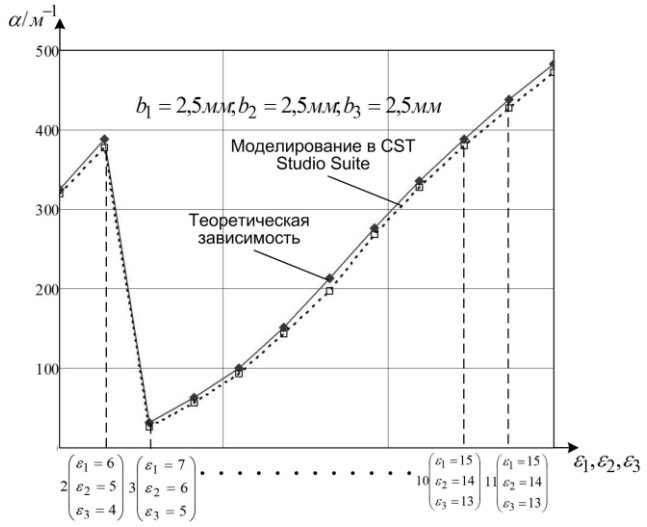


Рис. 3. Теоретические зависимости $\alpha = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ и полученные в ходе моделирования в CST Studio suit

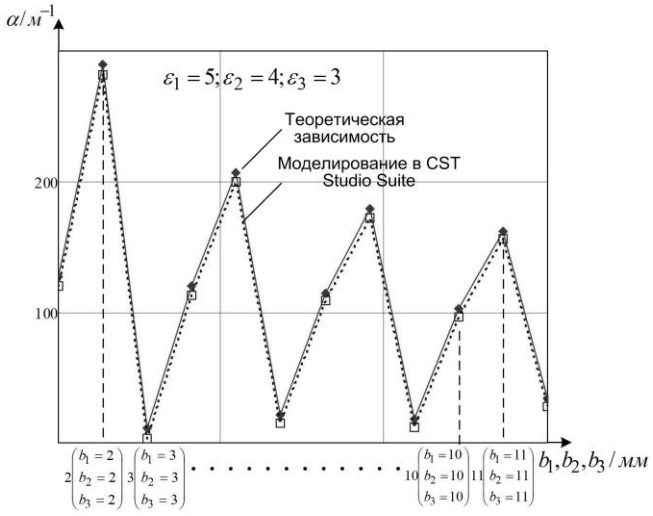


Рис. 4. Теоретические зависимости $\alpha = f(b_1, b_2, b_3)$ и полученные в ходе моделирования в CST Studio suit

Таким образом, представлена обобщенная математическая модель, которая позволяет оценить зависимость основного информативного параметра поля ПМЭМВ – коэффициента нормального ослабления α_y от электрофизических параметров многослойного РПП. Проведенная проверка достоверности и точности модели показала хорошее совпадение теоретических зависимостей и полученных в ходе электродинамического моделирования в системе моделирования CST Studio suit.

На основе модели разработана методика измерения электрофизических параметров многослойных диэлектрических РПП. Методика позволяет определить диэлектрическую проницаемость ε и толщину b каждого слоя многослойного РПП. Кроме того, предложенную методику можно интерпретировать как способ одновременной реконструкции распределения профиля не только диэлектрической проницаемости, но и толщины покрытия. Предложенная методика позволяет повысить достоверность и точность проводимых измерений ЭФП многослойных РПП.

Библиографический список

1. Федюнин,П.А. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин.–М.: Изд-о «Физматлит», 2013. – 190 с.
2. Balanis, C.A. Advanced engineering electromagnetics / C.A. Balanis. USA: John Wiley & Sons, 1989. –1002 p.

A.I. Kaz'min, P. A. Fedyunin

METHOD OF ESTIMATION ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF MULTILAYER RADIO ABSORBING COATINGS

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

A new technique for measuring the electrophysical parameters of multilayer radio absorbing coating is presented. The basis of the technique is the electrodynamic model of the field propagation of a surface electromagnetic wave in a multilayer radio absorbing coating. Verification of the model in the electrodynamic modeling system CST Studio Suite is presented.

Keywords: radio absorbing coating, characteristic equation, electrophysical parameters, electrodynamic simulation system.

УДК 690.192; 623.624.9

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин

ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

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

В статье рассматривается новый подход к практической реализации метода электромагнитных поверхностных волн для контроля электрофизических параметров радиопоглощающих материалов и покрытий. Проведено обоснование использования диэлектрической антенны поверхностных волн в качестве датчика для дефектоскопического контроля радиопоглощающих покрытий авиационных комплексов. Проведено моделирование работы датчика в системе электродинамического моделирования CST Studio Suite.

Ключевые слова: датчик, диэлектрическая антенна поверхностных волн, электрофизические параметры, система электродинамического моделирования.

Одним из основных направлений развития современных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) является создание крылатых ракет, авиационных комплексов (АК), образцов наземной (бронетанковой) военной техники, обладающих малыми значениями эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) [1–4].

Наилучшие результаты по снижению радиолокационной заметности на основе РПМ и радиопоглощающих покрытий (РПП) достигаются при индивидуальном по элементам поверхности образца АК применении от 3–4 до нескольких десятков различных РПМ и РПП с заданными радиофизическими характеристиками и многочисленных конструкционных материалов [1–4].

В ходе эксплуатации образцов АК, особенно в сложных условиях и при предельных механических и температурных нагрузках, неизбежны ситуации, когда в РПП будут возникать различные дефекты в виде отслоений, растрескиваний, сколов, царапин и т. п., что приводит к увеличению общей ЭПР АК и снижению его боевых возможностей [4].

Таким образом, основным условием обеспечения заданного уровня ЭПР АК является поддержание параметров РПП в заданных пределах при его эксплуатации. Это возможно достичь за счет своевременной и достоверной дефектоскопии РПП.

Микроволновые методы и средства неразрушающего контроля и диагностики, имеющие значительные возможности как при самостоятельном исследовании, так и в комплексе с другими физическими методами, находят все более широкое применение. Вместе с тем, существующие СВЧ-способы дефектоскопии не обеспечивают с требуемой вероятностью обнаружение дефектов РПП, в том числе дефектов в виде отслоения покрытия. Большинство известных способов, реализованы по принципу «на отражение» и «на прохождение» электромагнитных волн через материал, не обеспечивают заданную вероятность обнаружения дефектов и точную оценку их параметров.

Все приведенное выше определяет актуальность проведения исследований и разработок новых и повышение эффективности известных бесконтактных СВЧ-методов и устройств дефектоскопии широкого класса диэлектрических и магнитодиэлектрических РПП.

В [4] представлены способы дефектоскопии РПП на основе разработанного нами метода поверхностных медленных электромагнитных волн (ПМЭМВ).

Одним из новых подходов в реализации метода ПМЭМВ является использование в качестве датчика радиоволнового неразрушающего контроля плоской диэлектрической антенны поверхностной волны (ДАПВ), которая обладает относительно высокой локальностью измерения.

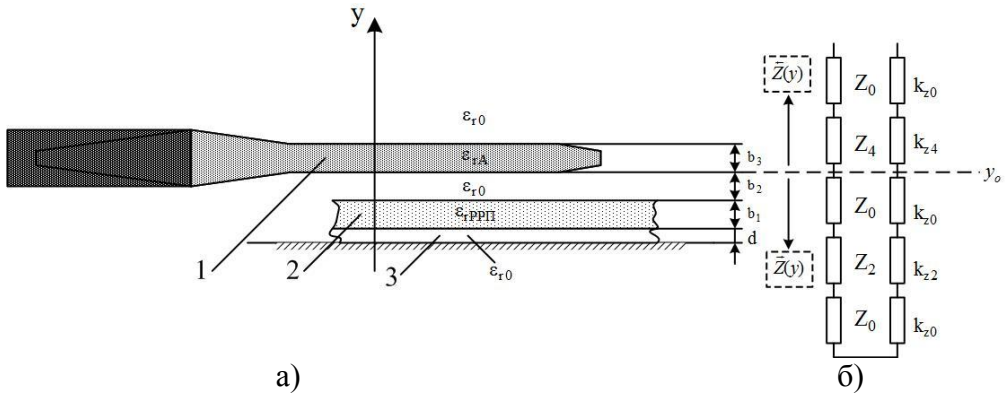
Суть предлагаемого подхода заключается в следующем. ДАПВ имеет фактически постоянные *эталонные* физические характеристики и используется в роли активного зонда, а РПП − с переменными параметрами − в качестве исследуемого объекта. Связь между ДАПВ и РПП

может быть как сильной, так и слабой. При этом происходит полная или частичная передача энергии из ДАПВ в РПП и обратно. Наличие в РПП неоднородностей, дефектов, изменения свойств или геометрии приводит к нарушению условий распространения поверхностных электромагнитных волн и перераспределению энергии между ДАПВ и РПП.

В окрестности открытой линии передачи, которой является ДАПВ, существует экспоненциально затухающее поле поверхностной электромагнитной волны. Если на небольшом расстоянии (доли длины волны) от ДАПВ расположить контролируемое РПП, происходит взаимодействие этого поля с материалом, и в РПП также формируется направляемая поверхностная электромагнитная волна.

В качестве примера реализации предлагаемого подхода рассмотрим способ обнаружения и оценки дефектов типа «отслоение» РПП от металлической подложки [5]. В данном случае, система ДАПВ-РПП на металлическом основании образуют единую систему, в которой распространяется поверхностная электромагнитная волна и ее можно представить как многослойную систему состоящую из воздушного слоя дефекта, слоя РПП, воздушного слоя между ДАПВ и РПП и слоя материала ДАПВ, что представлено на рисунке 1.

Для правомерности предлагаемого подхода по использования ДАПВ в качестве датчика для измерения ЭФП проведено электродинамическое моделирование подобной системы в среде электродинамического моделирования CST.



а) б)

а) – система РПП-ДАПВ; б) – эквивалентная схема системы РПП-ДАПВ
1 – ДАПВ; 2 – слой исследуемого РПП; 3 – область с дефектом типа «отслоение»

Рис. 1. Система РПП с дефектом типа «отслоение»−ДАПВ

В качестве объекта измерения выбрано РПП с характеристиками: толщина b=*2* мм; диэлектрическая проницаемость ε=*5*−*i*0,8 и предназначенное для работы в X-диапазоне.

Проектирование ДАПВ проведено с помощью специализированного программного обеспечения Antenna Magus.

Далее полученная электродинамическая модель ДАПВ была экспортирована в среду электродинамического моделирования CST. Общий вид разработанной электродинамической модели системы ДАПВ-РПП приведен на рисунке 2а.

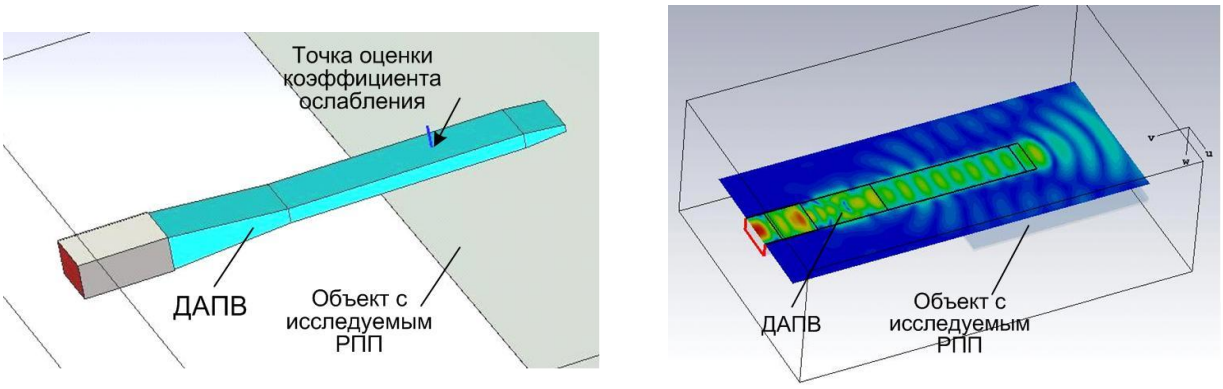
Для оценки потенциальных возможностей предложенного подхода произведено моделирование работы ДАПВ по обнаружению дефектов типа «отслоение» с величинами d=0–1.2 мм. Исследовано два варианта:

1. Диэлектрическая проницаемость ДАПВ больше диэлектрической проницаемости исследуемого РПП $\varepsilon_{rA} > \varepsilon_{rPPП}$.

2. Диэлектрическая проницаемость ДАПВ меньше диэлектрической проницаемости исследуемого РПП $\varepsilon_{rA} < \varepsilon_{rPPП}$.

В качестве примера на рисунке 3а показаны зависимости коэффициента ослабления ДАПВ от величины отслоения РПП от подложки при условии $\varepsilon_{rA} > \varepsilon_{rPPП}$ и параметрах модели: $\varepsilon_{rA} = 5$,

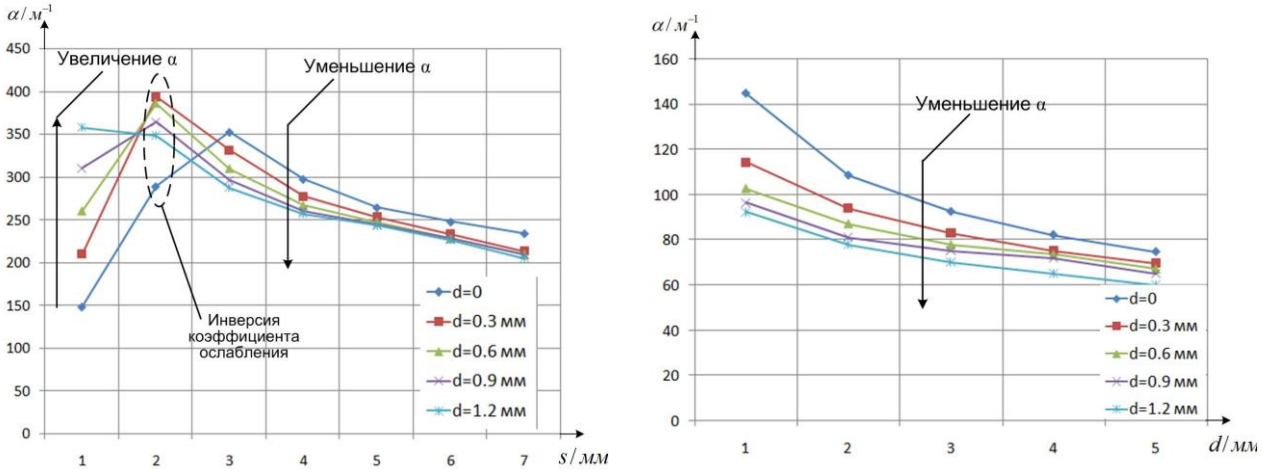
$\varepsilon_{rPPП} = 2.3$, b_1=2 мм; b_3=5 мм, а на рисунке 3б при условии $\varepsilon_{rA} < \varepsilon_{rPPП}$ и параметрах модели: $\varepsilon_{rA} = 2.3$, $\varepsilon_{rPPП} = 5$, b_1=2 мм; b_3=5 мм.



а) б)

а) – геометрия модели; б) – распределение электрического поля в системе ДАПВ-РПП на частоте 10 ГГц

Рис. 2. Электродинамическая модель измерения электрофизических параметров РПП с помощью ДАПВ в среде CST Microwave Studio



а) б)

а) - $\varepsilon_{rA} > \varepsilon_{rPPП}$; б) - $\varepsilon_{rA} < \varepsilon_{rPPП}$

Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления поля ПМЭМВ от величины отслоения РПП от подложки

Анализ зависимостей на рисунке 3а, для условия $\varepsilon_{rA} > \varepsilon_{rPPП}$, показывает, что при небольшом расстоянии ДАПВ от исследуемого РПП с увеличением величины отслоения d коэффициент ослабления увеличивается. При увеличении расстояния ДАПВ от исследуемого РПП при определенном значении, происходит инверсия зависимости коэффициента ослабления от величины отслоения – коэффициент ослабления начинает уменьшаться по экспоненциальному закону. Таким образом, при $\varepsilon_{rA} > \varepsilon_{rPPП}$ необходимо детально учитывать инверсию коэффициента ослабления при проведении измерений.

Анализ зависимостей на рисунке 3б, для условия $\varepsilon_{rA} < \varepsilon_{rPPП}$, показывает, что с увеличением величины отслоения d коэффициент ослабления уменьшается по экспоненциальному закону при любом расстоянии ДАПВ от исследуемого РПП.

Проведенный анализ подобных зависимостей для РПП с ($\varepsilon = 2...12$, b=1...10 мм, d=0...1.1 мм) показал высокую чувствительность диэлектрического волноводного датчика.

Таким образом, результаты численного исследования и анализ чувствительности коэффициента ослабления поля ПМЭМВ в ДАПВ к изменению параметров РПП показывают наличие ярко выраженной зависимости, что позволяет расчетным путем в зависимости от поставленной задачи выбрать оптимальный тип волны и рабочую частоту и параметры ДАПВ.

Предложенный подход обладает высокой чувствительностью и локальностью при контроле относительно тонких изделий или покрытий на металле.

Библиографический список

1 Сухаревский, О.И. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.

2 Актуальные задачи стелс-технологии [Электронный ресурс] / А. Н. Лагарьков [и др.] // Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук: офиц. сайт. Режим доступа: http://www.itae.ru/science/ topics/№4%20(стелс).pdf (дата обращения: 11.07.2017).

3 Лагарьков, А.Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян // Вестн. Рос. акад. наук. – 2003. – Т. 73. – № 9. – С. 779–787.

4 Федюнин, П.А. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин. – М.: Издательство «Физматлит», 2013. – 190 с.

5 Федюнин, П. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации / П.А. Федюнин, А.И. Казьмин, В.А. Манин // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 11. – С.32−39.

A.I. Kaz'min, P. A. Fedyunin

SENSOR CONTROL OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF THE RADIO ABSORBING COATING

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

In this paper a new approach to the practical implementation of the method of electromagnetic waves for monitoring the electrophysical parameters of radio absorbing materials and coatings is presented. The substantiation of the use of the surface wave dielectric antenna as a sensor for the flaw detection of radio-absorbing coatings. Modeling of the sensor in the electrodynamic modeling system CST Studio Suite was carried out.

Keywords: sensor, dielectric antenna of the surface wave, electrophysical parameters, electrodynamic simulation system

УДК 621.396

Д.Е. Курапов, Е.А. Шорохова

ВЛИЯНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ В АНТЕННО-ФИДЕРНОМ ТРАКТЕ И ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ “МЕРТВОЙ ЗОНЫ” ИМПУЛЬСНОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В работе исследовано влияние длины антенного фидера, коэффициентов стоячей волны антенны и приемо-передающего устройства импульсного радиовысотомера на длительность его “мертвой зоны”.

Ключевые слова: антенный фидер, приемо-передающее устройство, “мертвая зона”, импульсный режим работы.

В ряде современных летательных аппаратов используются импульсные радиовысотомеры (РВ), измеряющие высоту до земной поверхности. Высокие требования по массогабаритным характеристикам, предъявляемые к бортовым системам летательных аппаратов, обуславливают перспективность вариантов построения РВ, использующих одну антенну для приемного и передающего трактов [1]. При этом компоновка летательного аппарата зачастую не позволяет разместить приемо-передающее устройство в непосредственной близости от антенны, что определяет минимальную длину антенно-фидерного тракта.

За счет наличия связи между передающим и приемным трактом РВ часть энергии зондирующего импульса передатчика действует на входе приемного устройства, вызывая на его выходе “импульс местной связи”, аналогичный сигналу, отраженному от подстилающей поверхности. Если время распространения зондирующего импульса до поверхности и обратно больше длительности импульса местной связи, то на выходе приемного устройства раздельно индицируются два сигнала. Минимальная высота измерения в этом случае будет определяться окончанием “импульса местной связи”. Временной интервал, в течение которого на выходе приемника невозможно обнаружить принимаемый полезный сигнал из-за действия “импульса местной связи”, будем называть “мертвой зоной” приемника.

“Мертвая зона” приемника, в основном, зависит от следующих факторов:

- величины развязки приемного и передающего трактов (при достаточной величине развязки длительность мертвой зоны определяется временем переходных процессов в линейной системе и практически совпадает с длительностью зондирующего сигнала; в случае перегрузки приемного тракта требуется дополнительное время, необходимое для окончания переходных процессов и восстановления чувствительности приемника);
- крутизны спада зондирующего импульса.
- Циркуляция отраженных от входа антенны и выхода ППУ высокочастотных (ВЧ) колебаний могут оказать значительное влияние на работу РВ. Основными факторами, определяющими циркуляцию паразитных колебаний в антенном фидере, являются:
- коэффициент отражения от ВЧ входа ППУ в режиме приема $\Gamma_{\text{прм}}$;
- коэффициент отражения от ВЧ входа ППУ в режиме передачи $\Gamma_{\text{пер}}$;
- коэффициент отражения от антенны $\Gamma_{\text{а}}$;
- затухание в фидере $\gamma = 10^{\frac{-\beta \cdot l}{20}}$, где β – затухание в фидере, выраженное в дБ/м, l – длина фидера.

Передатчик формирует радиоимпульс длительностью $\tau_{\text{и}}$ и амплитудой ВЧ-колебаний $U_{\text{г}}$. В зависимости от рабочей частоты и длины антенного фидера переотраженные колебания могут складываться в различных фазовых комбинациях. Рассмотрим наихудший случай, когда фаза

выходного импульса передатчика на выходе ППУ (со стороны кабеля) совпадает с фазой отраженного колебания.

Разобьем импульс $\tau_и$ на отрезки $\Delta\tau$, равные по длительности $2t_ф$, как показано на рис. 1, где $t_ф$ – задержка сигнала в фидере в одну сторону.

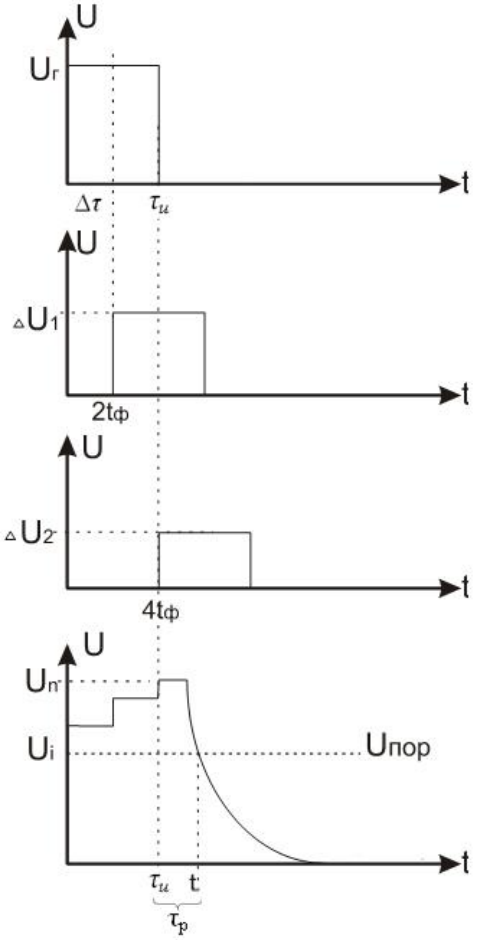


Рис. 1 Многократные переотражения зондирующего импульса

В этом случае в каждом из последующих отрезков $\Delta\tau$, начиная со второго, произойдет увеличение амплитуды напряжения на выходе ППУ на величину, равную:

$$\Delta U = U_г \cdot \gamma^2 \cdot \Gamma_{пер} \cdot \Gamma_а. \quad (1)$$

Нетрудно показать, что амплитуду высокочастотных колебаний U_n в момент окончания импульса передатчика ($n = \tau_и/2t_ф$) можно определить как

$$U_n = U_г \cdot \left[1 + \gamma^2 \cdot \Gamma_{прм} \cdot \Gamma_а + ... + \gamma^{2\cdot(n-1)} \cdot {\Gamma_а}^{(n-1)} \cdot {\Gamma_{пер}}^{(n-1)}\right]. \quad (2)$$

Так как в скобках записана сумма геометрической прогрессии со знаменателем $\rho = \gamma^2 \cdot \Gamma_{пер} \cdot \Gamma_а$ то выражение (2) можно записать в виде

$$U_n = U_г \cdot \frac{\gamma^{2n} \cdot {\Gamma_{пер}}^n \cdot {\Gamma_а}^n - 1}{\gamma^2 \cdot \Gamma_{пер} \cdot \Gamma_а - 1} \quad . \quad (3)$$

После окончания импульса передатчика происходит многократное отражение в фидерном тракте n-ой части импульса. Величина амплитуды импульса на высокочастотном входе ППУ после i-ого отражения будет равна

$$U_i = \gamma^{2i} \cdot {\Gamma_а}^i \cdot {\Gamma_{прм}}^{i-1} \cdot U_n. \quad (4)$$

Переотраженный импульс будет присутствовать на выходе приемника до момента времени, пока амплитуда импульса U_i на высокочастотном входе ППУ будет равна пороговому напряжению чувствительности приемника $U_{пор}$. Число отражений i на выходе приемника найдем как

$$i = \frac{\lg\left(\frac{\Gamma_{\text{прм}} \cdot U_{\text{пор}}}{U_n}\right)}{\lg\left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{прм}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right)}. \quad (5)$$

Увеличение длительности зондирующего импульса (на выходе приемника за счет местной связи) в результате переотражений в антенно-фидерной системе будет равно

$$\tau_{\text{р}} = 2t_{\text{ф}} \cdot i. \quad (6)$$

Допустим, что коэффициенты отражения от ВЧ входа ППУ (антенного коммутатора со стороны фидерного тракта) в режиме приема и передачи приближенно равны, т.е. $\Gamma_{\text{пер}} \approx \Gamma_{\text{прм}} \approx \Gamma_{\text{ппу}}$. Подставляя формулы (3), (5) в формулу (6) получим

$$\tau_{\text{р}} = 2t_{\text{ф}} \cdot \frac{lg\frac{\Gamma_{\text{ппу}} \cdot U_{\text{пор}} \cdot \left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{а}} \cdot \Gamma_{\text{ппу}} - 1\right)}{U_{\text{г}} \cdot \left(\gamma^{2n} \cdot {\Gamma_{\text{ппу}}}^{2n} \cdot {\Gamma_{\text{а}}}^{2n} - 1\right)}}{lg\left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right)} = 2t_{\text{ф}} \cdot \frac{lg\frac{\Gamma_{\text{ппу}} \cdot \left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{а}} \cdot \Gamma_{\text{ппу}} - 1\right)}{\left(\gamma^{2n} \cdot {\Gamma_{\text{ппу}}}^{2n} \cdot {\Gamma_{\text{а}}}^{2n} - 1\right)} - \frac{\text{ЭП}}{20}}{lg\left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right)}, \quad (7)$$

где $\text{ЭП} = 20lg\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{пор}}}$ – энергетический потенциал ППУ, выраженный в дБ.

Для значений n, когда $\gamma^{2n} \cdot {\Gamma_{\text{ппу}}}^{n} \cdot {\Gamma_{\text{а}}}^{n} \ll 1$, выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$U_n = \frac{\text{Uг}}{1 - \gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}}. \quad (8)$$

Тогда выражение (7) перепишем как:

$$\tau_{\text{р}} = 2t_{\text{ф}} \cdot \frac{\lg\left[\Gamma_{\text{ппу}} \cdot \left(1 - \gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{а}} \cdot \Gamma_{\text{ппу}}\right)\right] - \frac{\text{ЭП}}{20}}{lg\left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right)} \quad (9)$$

С учетом того, что $\gamma^2<1$, $\Gamma_{\text{ппу}}<1$, $\Gamma_{\text{а}}<1$, можно принять $1 - \gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}} \ll 1$. В этом случае

$$\tau_{\text{р}} = 2t_{\text{ф}} \cdot \frac{\lg \Gamma_{\text{ппу}} - \frac{\text{ЭП}}{20}}{lg\left(\gamma^2 \cdot \Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right)} = t_{\text{ф}} \cdot \frac{20\lg \Gamma_{\text{ппу}} - \text{ЭП}}{10lg\left(\Gamma_{\text{ппу}} \cdot \Gamma_{\text{а}}\right) - \beta l}. \quad (10)$$

Формула (10) определяет увеличение длительности зондирующего импульса на входе приемника за счет увеличения длительности спада импульса передатчика в фидере.

Увеличение длительности “мертвой зоны” приемника ППУ, определяемой циркуляцией переотражений зондирующего импульса передатчика в антенно-фидерном тракте, с достаточной для практики точностью, принимая КСВн антенны и выхода ППУ равными 2,0, можно вычислить по формуле:

$$\tau_{\text{р}}(\text{м}) = 8{,}3 \cdot l(\text{м}) \cdot \frac{9{,}6 + \text{П}(\text{дБВт})}{16 + l(\text{м})} \quad (11)$$

Требуемый энергетический потенциал ППУ можно рассчитать по формуле:

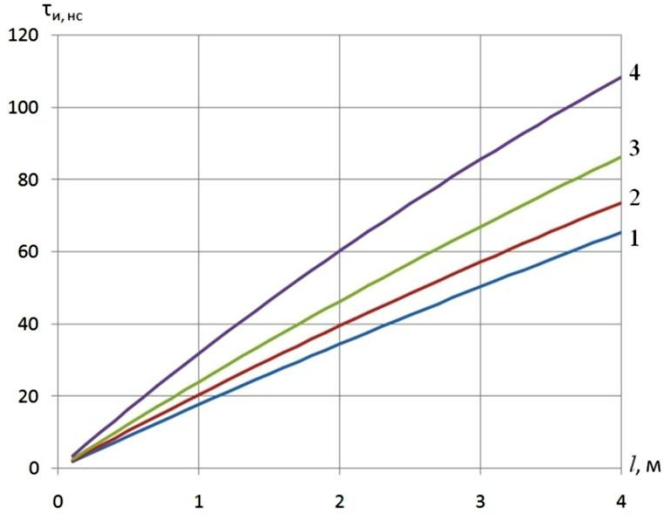
$$\text{П} = \frac{\text{Рмах}}{\text{Р}_{\text{г}}} = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot \sigma}{32 \cdot \pi^2 \cdot (n+1) \cdot {H_0}^2}\left[1 - \left(\frac{H_0}{H_0 + 150 \cdot \tau_{\text{и}}}\right)^{n+2}\right], \quad (12)$$

где $P_{\text{мах}}$ – максимальная усредненная мощность отраженного сигнала на входе антенны ППУ, $P_{\text{г}}$ – импульсная мощность зондирующего сигнала, λ – длина волны в свободном пространстве, G – коэффициент усиления антенны, H_0 – высота полета, $\tau_{\text{и}}$ – длительность зондирующего импульса, мкс, σ – эффективная площадь рассеяния поверхности, n – параметр аппроксимации, определяемый показателями аппроксимации диаграммы обратного рассеяния и диаграммы направленности антенны.

Максимальная усредненная мощность для различных поверхностей определяется следующим соотношением [2]:

$$\text{Р}_{\text{мах}} = \frac{\text{Рг} \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot \sigma}{32 \cdot \pi^2 \cdot (n+1) \cdot {H_0}^2}\left[1 - \left(\frac{H_0}{H_0 + 150 \cdot \tau_{\text{и}}}\right)^{n+2}\right]. \quad (13)$$

На рис. 2 приведена зависимость увеличения длительности зондирующего импульса от длины фидера для случая зимнего леса, покрытого сухим глубоким снегом, при длительности импульса $\tau_{\text{и}}$=10 нс, G=2, λ=0,3 м при различных значениях КСВн антенны и приемо-передающего устройства.



1 – КСВн$_а$=1,2, КСВн$_{ппу}$=1,2;
2 – КСВн$_а$=1,2, КСВн$_{ппу}$=2,0;
3 – КСВн$_а$=2.0, КСВн$_{ппу}$=1,2;
4 – КСВн$_а$=2,0, КСВн$_{ппу}$=2,0.

Рис. 2 Увеличение длительности зондирующего импульса в зависимости от длины фидера

Из формулы (10) можно сделать важный для практики вывод – длительность импульса местной связи в большей степени зависит от расстройки антенны (линия 3 на рис.2); длительность импульса местной связи существенно увеличивается при одновременном ухудшении расстройки антенны и ВЧ входа ППУ.

Выводы

При проектировании импульсных радиовысотомеров малых высот особое внимание следует уделить вопросам согласования в антенно-фидерном тракте, так как конечная длина фидера при разнесенных ППУ и антенны может значительно увеличить “мертвую зону” приемника.

С увеличением измеряемой высоты растет предельная длина фидера, что говорит об уменьшении требований к согласованию в антенно-фидерном тракте; с повышением высоты увеличивается требуемый энергетический потенциал, а следовательно, растут требования к развязке между приемным и передающим каналами ППУ, что, в основном, и определяет длительность “мертвой зоны” приемника ППУ.

Библиографический список

1. Вопросы перспективной радиолокации: коллективная монография / под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. С. 51.
2. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Сов. радио. 1973. С.383.

D.E. Kurapov, E.A. Shorohova

THE EFFECT OF ANTEENNA FEEDER AND TRANSCEIVER MATCHING ON THE ALTITUDE HOLE OF THE PULSE RADIO ALTIMETER

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"

The effect of the antenna feeder length, the standing antenna and the transceiver wave coefficients of the pulsed radio altimeter on the altitude hole has been studied.

Keywords: antenna feeder, transceiver, altitude hole, pulsed mode.

УДК 621.396

Д.Е. Курапов, Е.А. Шорохова

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫХОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ РАДИОВЫСОТОМЕРА

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Предложен оптимальный режим работы выходного усилителя мощности радиовысотомера дециметрового диапазона длин волн с точки зрения уменьшения длительности "мертвой зоны" его приемника.

Ключевые слова: импульсный режим работы, мертвая зона, выходной усилитель мощности.

Современные летательные аппараты оснащены комплексом систем автоматики, обеспечивающим достижение наибольшей эффективности применения. В ряде летательных аппаратов используются импульсные радиовысотомеры дециметрового диапазона длин волн, измеряющие высоту до земной поверхности [1]. Импульсный режим работы радиовысотомера позволяет обеспечить высокую точность измерений.

Требования по массогабаритным характеристикам, предъявляемые к приборам радиоэлектронного оснащения современных видов летательных аппаратов, обусловливают перспективность вариантов построения радиовысотомеров, использующих одну общую антенну для приемного и передающего трактов. Использование одной общей антенны требует решения определенных технических задач при измерении малых высот.

Измерение высоты радиолокационным методом однозначно связано со временем прохождения сигнала до подстилающей поверхности и обратно. За счет наличия связи между передающим и приемным трактом радиовысотомера часть энергии зондирующего импульса передатчика действует на входе приемника, вызывая на его выходе импульс “местной связи”, аналогичный сигналу, отраженному от подстилающей поверхности [2]. Для корректной работы радиовысотомера необходимо чтобы длительность импульса “местной связи” была меньше времени распространения зондирующего импульса передатчика до подстилающей поверхности и обратно. Временной интервал, в течение которого на выходе приемника невозможно обнаружить принимаемый полезный сигнал из-за действия импульса “местной связи”, будем называть “мертвой зоной” приемника. Минимальная высота, измеряемая радиовысотомером, прямо пропорциональна длительности "мертвой" зоны его приемника.

Длительность импульса “местной связи” существенно зависит от величины развязки между приемником и передатчиком, определяемой, в основном, антенным коммутатором. При достаточной величине развязки длительность “мертвой зоны” определяется временем переходных процессов в линейной системе. В случае перегрузки каскадов приемника требуется дополнительное время, необходимое для окончания переходных процессов и восстановления чувствительности приемника.

Обычно в радиовысотомерах, построенных на основе маломощных твердотельных передатчиков, формирование радиоимпульсного сигнала производится за счет включения и выключения высокочастотного сигнала при помощи одного или нескольких каскадов амплитудно-импульсных модуляторов.

В последние десятилетия широкое распространение в качестве выходного усилителя мощности получили монолитные интегральные схемы, основанные на полевых транзисторах Шоттки или транзисторах с высокой подвижностью электронов. Такие усилители мощности в большей степени предназначены для работы только в классе А или АВ [3] и потребляют

существенный ток даже в отсутствии высокочастотного сигнала. Работа усилителя мощности в таких режимах приводит к повышенному энергопотреблению и при плохом теплоотводе может вызвать его отказ. Для повышения КПД и снижения тепловой нагрузки используют импульсный режим работы по цепи положительного питания усилителя мощности, что является достаточно сложной задачей при значительных значениях тока.

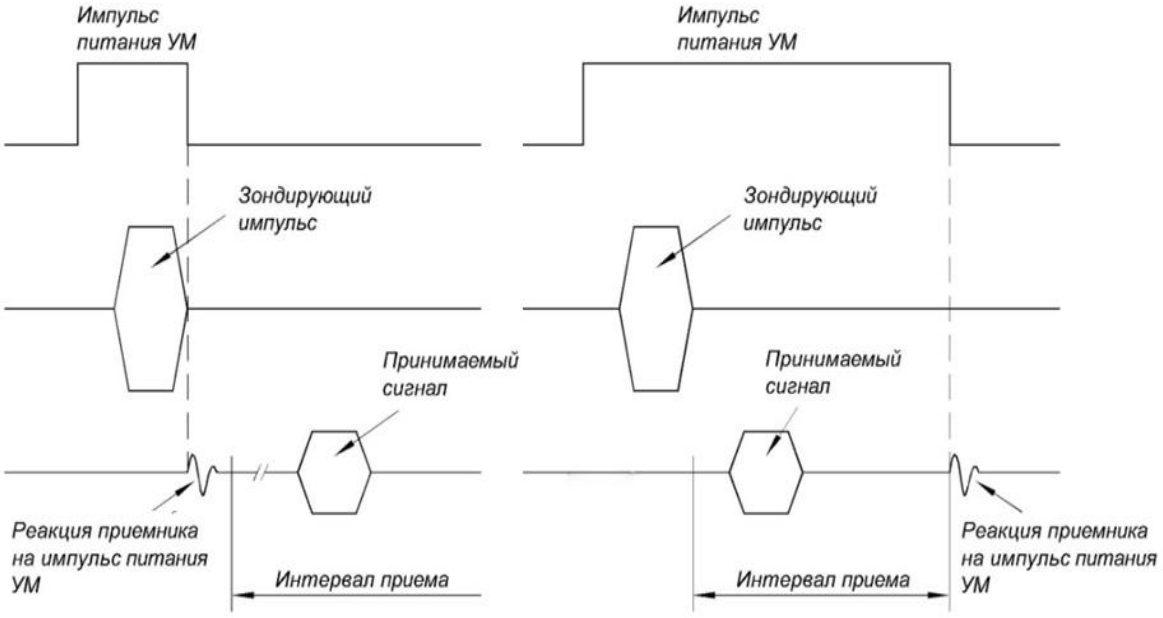
Следует заметить, что по окончании импульса питания усилителя мощности на его высокочастотном выходе будет наблюдаться переходный процесс значительной длительности. Осцилляции по окончании импульса питания вызваны колебательным процессом в питающих и разделительных цепях усилителя мощности при конечных значениях добротностей элементов, образующих данные цепи. При достаточно малой длительности фронтов импульса питания, спектр осцилляций получается достаточно широким, а уровень его составляющих достаточно высок.

Осцилляции на высокочастотном выходе усилителя мощности (УМ) за счет связи между передающим и приемным трактом радиовысотомера вызывают аналогичные осцилляции и в тракте приемника. При определенных обстоятельствах осцилляции в тракте приемника могут привести к выходу в режим насыщения одного или нескольких его каскадов. При этом потребуется дополнительное время для выхода каскадов приемника из режима насыщения. Таким образом, данные осцилляции могут сделать невозможным прием полезного сигнала, тем самым увеличив длительность “мертвой зоны” приемника.

Использование фильтра на выходе усилителя мощности для подавления уровня спектральных составляющих осцилляций представляется нецелесообразным, так как это может привести к еще большему увеличению длительности колебательных процессов.

Исключить влияние осцилляций по окончании импульса питания передатчика на “мертвую зону” приемника возможно за счет выбора момента окончания импульса питания УМ.

Возможные варианты расположения интервала приема полезного сигнала относительно зондирующего импульса и импульса питания усилителя мощности передатчика показаны на рис. 1.



а) б)

Рис. 1 Варианты управления питанием выходного усилителя мощности

Режим, показанный на рис. 1а, обычно используется при измерении высот от нескольких десятков метров и выше, когда требования по “мертвой зоне” приема не являются определяющими.

Показанный на рис. 1б режим может быть применен при измерении малых высот, когда используется зондирующий сигнал с достаточно большой скважностью и перенос момента коммутации импульса питания усилителя мощности за интервал приема практически не повлияет на его энергопотребление. В тоже время, это позволяет исключить из времени “мертвой зоны” приема время реакции приемника на коммутацию напряжения питания УМ.

Следует заметить, что вариант организации работы ППУ, показанный на рис. 1б, приводит к увеличению уровня шумов приемника за счет того, что в момент приема полезного сигнала выходной УМ передатчика находится в активном режиме.

С целью изучения влияния режима работы УМ передатчика на "мертвую зону" приемника был исследован приемопередатчик импульсного широкополосного радиовысотомера дециметрового диапазона длин волн. Импульсный зондирующий сигнал в передатчике формировался при помощи нескольких каскадов амплитудно-импульсных модуляторов, а также за счет импульсного режима работы по цепи питания выходного усилителя мощности. Выходная мощность передатчика составила несколько ватт, глубина его амплитудно-импульсной модуляции – более 130 дБ. Предельная чувствительность приемника составила минус 120 дБВт.

На рис. 2 представлена форма спада зондирующего импульса передатчика при варианте управления питанием выходного усилителя мощности, показанном на рис.1а.

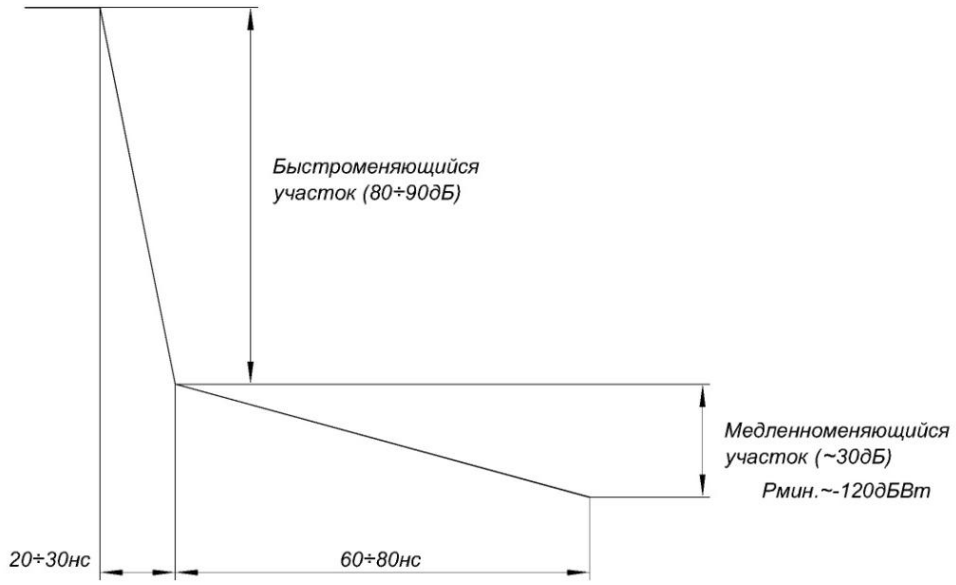


Рис. 2 Форма спада зондирующего импульса передатчика варианте 1а

Быстроменяющийся участок на рис. 2 обусловлен работой каскадов амплитудно-импульсных модуляторов передатчика, которые формируют начальные (80…90) дБ глубины модуляции за достаточно короткий интервал времени (20…30) нс. Медленноменяющийся участок формируется модулятором питания выходного усилителя мощности. Существенно меньшая скорость изменения ослабления на этом временном интервале (60…80) нс определяется меньшим быстродействием управления СВЧ сигналом, реализуемым при модуляции напряжения питания выходного УМ, а также наличием достаточно длительного переходного процесса (до 50 нс) при коммутации напряжения питания выходного УМ.

При режиме работы, показанном на рис. 1а, и длительности зондирующего импульса передатчика 50 нс, “мертвая зона” приемника составила 160 нс.

На рис. 3 представлена форма спада зондирующего импульса передатчика при варианте управления питанием выходного усилителя мощности, показанном на рис.1б.

Рис. 3 Форма спада зондирующего импульса передатчика в варианте 1б

Быстроменяющийся участок на рис. 3 обусловлен только работой каскадов амплитудно-импульсных модуляторов передатчика, формирующих глубину ~120 дБ за достаточно короткий интервал времени (30…40) нс.

При режиме работы, показанном на рис. 1б, и той же длительности зондирующего импульса передатчика, “мертвая зона” приемника составила 100 нс, что почти на 40% меньше чем в режиме работы показанном на рис. 1а.

Однако, изменение уровня шумов на выходе приемника за счет внесения шумов выходного УМ передатчика в режиме работы, показанном на рис. 1б, составило ~1,7 раза (4,5 дБ). Данный параметр не является определяющим при измерении малых высот и величина его изменения является приемлемой.

Как следует из представленных результатов, использование режима управления питанием выходного усилителя мощности, показанного на рис. 1б, позволяет при определенных технических параметрах приемопередатчика на ~40% сократить “мертвую зону” приемника радиовысотомера, что делает возможным измерение малых высот.

Библиографический список

1. Колесников С.В. Стратегическое ракетно-ядерное оружие / МО РФ «Армейский сборник». Москва, 1996. С.28.
2. Катин С.В., Курапов Д.Е., Тибин А.В. Определение параметров антенно-фидерного тракта импульсного командного радиоальтиметра малых высот // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т.15. №2. С.49-52.
3. Сечи Ф, Буджатти М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители // М.:Техносфера, 2015.

D.E. Kurapov, E.A. Shorohova

OPERATING MODE OPTIMISATION OF THE ALTIMETER OUTPUT POWER AMPLIFIER

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"

The operating mode effect of the L-band altimeter output power amplifier to the low altitude measurement has been studied.

Keywords: pulsed mode, “dead region”, output power amplifier.

УДК 004.942

Е.Н. Коршунова, В.В. Петров

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛОСКОВЫХ СВЧ НАГРУЗОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Выполнен анализ параметров мощных полосковых СВЧ нагрузок, работающих в диапазоне частот до 18 ГГц, при подключении их к измерительной аппаратуре с помощью контактного устройства.Исследовано влияние погрешности изготовления полосковых плат и измеряемых нагрузок на погрешность измерения. Произведен электромагнитный анализ места соединения полосковой платы с исследуемой нагрузкой, подобран схемный эквивалент данной модели, который значительно сокращает время анализа и упрощает решаемую задачу.

Ключевые слова: высокочастотные измерения, измерительная аппаратура, контактное устройство, мощные нагрузки, погрешность измерения, разброс параметров, электромагнитный анализ.

В процессе производства и разработки мощных полосковых СВЧ нагрузок необходимо измерять их параметры. Конструкции нагрузок, серийно выпускаемых промышленностью иработающих в диапазоне частот до 4 ГГц, показаны на рис.1 [1]. В настоящее время разрабатываются нагрузки на диапазон частот до 18 ГГц.

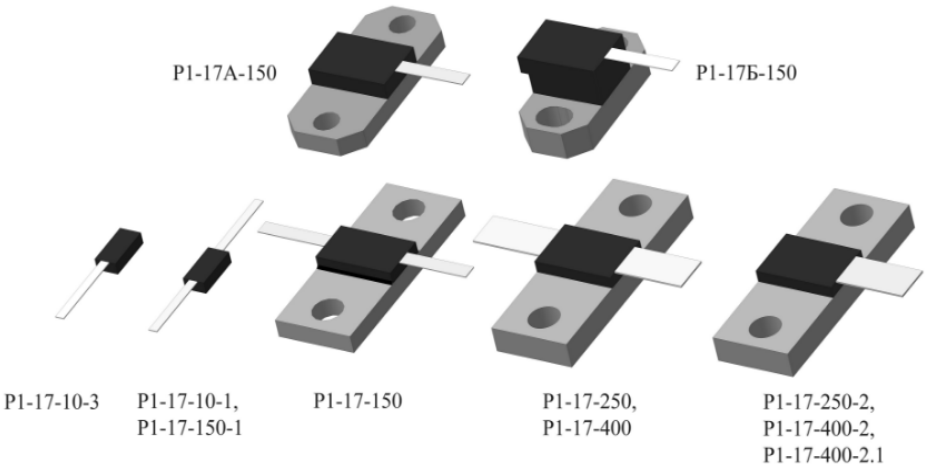
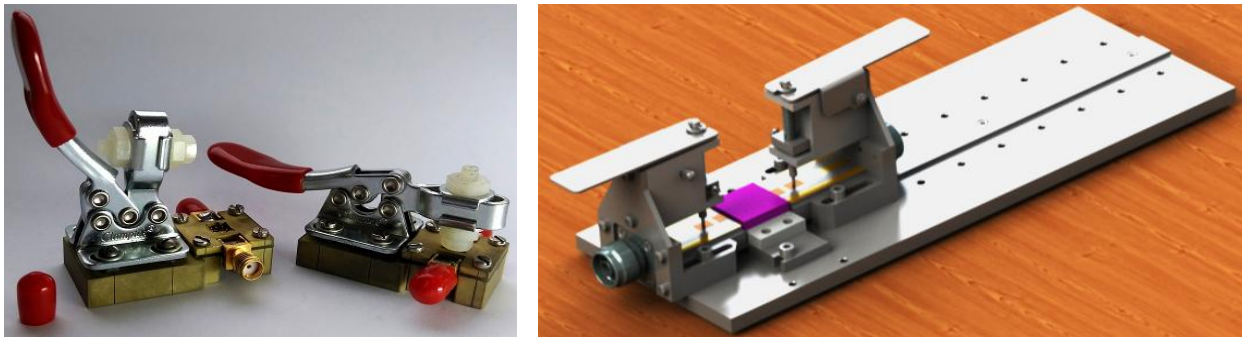


Рис.1. Полосковые нагрузки типа Р1-17

Поскольку выпускаемые промышленностью анализаторы цепей имеют стандартный коаксиальный или волноводный тракт, для подключения полосковых устройств применяют специальные контактные устройства. Примеры этих устройств показаны на рис. 2. Они содержат переходы со стандартного коаксиального тракта на полосковый,отрезки полосковых линий и устройства для неразрушающего подключения измеряемых объектов к этим линиям.

Анализаторы цепей калибруются в стандартном тракте. Поэтому элементы контактного устройства вносят в результаты измерений неучтенные погрешности. Для их исключения применяют различные методы калибровки в полосковом тракте, например, описанные в [3]. Таким образом, удается уменьшить вклад в погрешность измерений коаксиально-полосковых переходов и отрезков полосковой линии. Однако, в месте подключения измеряемой нагрузки к полосковой линии остается источник погрешности, связанный с разбросом размеров элементов конструкции нагрузки и точностью ее установки в контактное устройство. Например, ширина вывода имеет допуск размера 0,1 мм, а допуск на позицию элементов крепления достигает величины 0,8 мм. Поскольку

вызванные этими отклонениями погрешности измерения невозможно исключить, требуется определить их возможную величину и, при необходимости, скорректировать требования к точности изготовления нагрузок.



а) *б*)

Рис.2. Контактные устройства для измерений в полосковом тракте: *а* – разработка НПП ООО «БУТИС» [2]; *б* – разработка кафедры КТПП Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Так как измеряемые нагрузки имеют различную ширину выводов, было разработано несколько вариантов подводящих полосковых плат, с шириной полосков*W*, согласованной с шириной выводов.

Подбор геометрических параметров полосковой линии осуществляется: исходя из соображений, об ограничении на размеры, обеспечивающем существование волны только основного типа (ТЕМ) [4]; обеспечения согласования размеров с коаксиальным разъемом и выводом измеряемой нагрузки; получения волнового сопротивление линии Rв= 50 Ом.

В табл. 1 представлены параметры полосковых плат для нагрузок с различной шириной вывода.

Таблица 1 – Параметры плат

Материал подложки [5]	Ширина вывода нагрузки, мм	Относительная диэлектрическая проницаемость, ε	Тангенс угла диэлектрических потерь, TanD	Толщина диэлектрика, H, мм	Толщина металлизированного слоя, T, мм	Ширина центрального проводника, мм
RO4003C	1	3,38	0,0027	1,524	0,035	2
RO4003C	3	3,38	0,0027	0,813	0,035	3,5
RT/duroid 5880	5	2,2	0,0009	3,175	0,035	8

Электромагнитный анализ параметров устройства

Электромагнитный анализ позволяет провести более точный расчет параметров исследуемой модели, а так же дает возможность оценить все физические факторы, влияющие на результаты решения поставленной задачи. На рис. 3 представлена исследуемая модель, где 1 - корпус КУ, 2 – диэлектрическое основание платы, 3 – центральный проводник полосковой платы, 4 – вывод измеряемой нагрузки, 5 – зазор между полосковой платой и измеряемой нагрузкой, 6 – коаксиальный разъем.

Для моделирования использовался пакет для электромагнитного анализа полей AnsysHFSS2014.

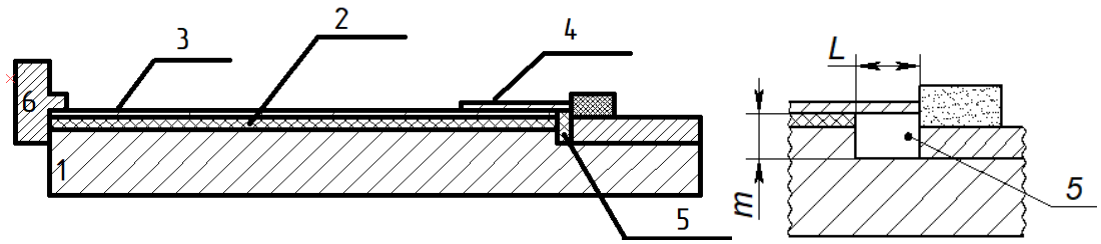
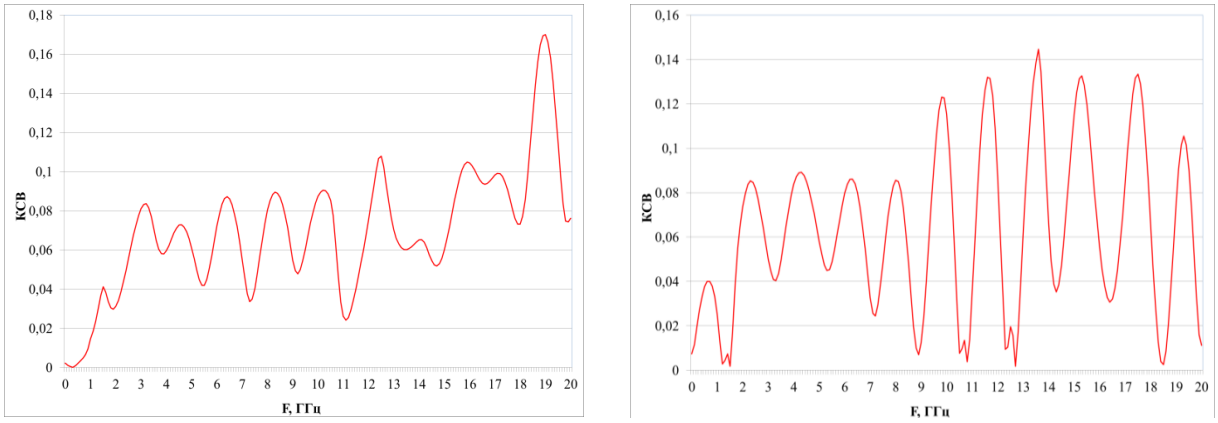


Рис.3.Элементы конструкции, учитываемые при создании электромагнитной модели

В первую очередь было исследовано влияние на величину КСВ ширины зазора *L*между полосковой платой и корпусом измеряемой нагрузки.Из-за погрешностей изготовления корпуса нагрузки шириназазора может изменяться в пределах ±0,4 мм. На рис.4представлены результаты исследования влияния данной погрешности на КСВ, на примере нагрузки с шириной вывода *f*=3мм и глубиной зазора *m*=4 мм. Из рисунков видно, что данная погрешность вносит в величину КСВ разбросприблизительно 0.1 на частотах до 10 ГГц, а на верхней границе диапазона – до 0.16.Учитывая, что по требованиям к нагрузкам их КСВ до частоты 18 ГГц не должен превышать значения 1.35, такой разброс будет вносить недопустимую погрешность в результаты измерения. Таким образом, можно сделать вывод, что при разработке конструкции контактного устройства необходимо минимизировать ширину зазора, апри возможности исключить его за счет изменения способа крепления исследуемой нагрузки.



а) *б*)

Рис. 4.Результаты электромагнитного моделирования: *а* - модуль разности КСВ при ширине зазора *L*=0,9 мм и *L*=0,5 мм; *б* - модуль разности КСВ при ширине зазора *L*=0,1 мм и *L*=0,5 мм

Дальнейшие исследования показали, что влияние погрешности изготовления других размеров, таких как длина центрального проводника полосковой платы, глубина зазора (5), ширина вывода элемента не оказывают значительного влияния на КСВ.Вариация этих размеров в границах допусков приводит к изменению КСВ на величину, не превышающую ±0,003.

Схемотехническая модель

Отрезок вывода нагрузки, расположенный между ее корпусом и подводящей полосковой линией, по сути дела, является последовательной индуктивностью. На основе этого можно попробовать заменить физическую модель на ее эквивалентную схему, приведенную на рис. 5.

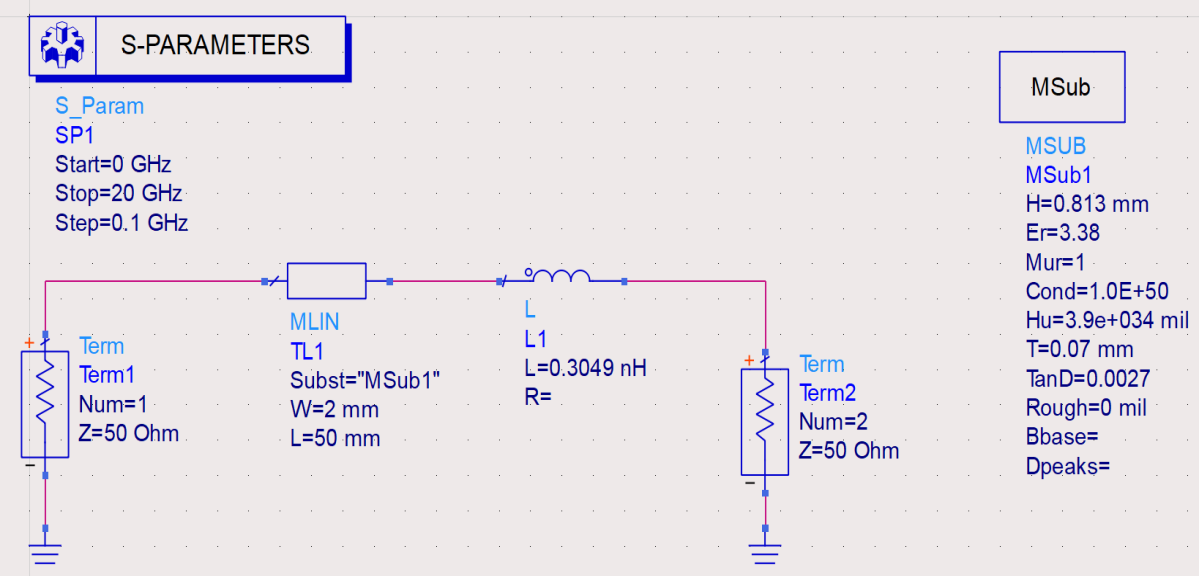


Рис. 5. Эквивалентная схема

Индуктивность прямоугольного проводника складывается из двух составляющих, [6]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{2l}{g}\right) - 1\right],$$

$$L_2 = \frac{l}{\sqrt{bc}}\sqrt{\frac{\mu}{4\pi F\gamma}}\upsilon,$$

где L_1 – индуктивность проводника, прямоугольного сечения, Гн;

l– длина проводника, м;

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

g–коэффициент, зависящий от отношения толщины c и ширины b проводника, м;

L_2 – индуктивность, учитывающая магнитный потоквнутри проводника, Гн;

μ – относительная магнитная проницаемость меди, $\mu = 1$;

γ – удельная электрическая проводимость меди, $\gamma = 59{,}5 \cdot 10^{-6}$ См/м;

F– частота, Гц;

υ – коэффициент, зависящий от отношенияb/c.

Коэффициенты g и υ определяются по графикам, приведенным в [6].

Поскольку влияние индуктивности возрастает с ростом частоты, расчет был проведен для нагрузки с самой высокой рабочей частотой, которая составляет 18 ГГц. Этанагрузка имеет ширину выводас=1 мм, толщинуb=0.1 мм, длину проводника l=0.5 ммии расстоянием от «земли» до корпуса m=2.3 мм. Значения коэффициентовпри указанных размерах составили: g=0.0003; υ=0.22. Рассчитанные величины индуктивностей:L_1=2.04·10-2нГн, L_1=0.2845нГн и суммарная индуктивность L=0.3049 нГн.

Моделирование проводилось в пакете схемотехнического анализа AdvansedDesignSystem 2014.

Результаты постобработки схемы, а так же данные полученные при электромагнитном анализе в виде КСВ представлены на рис.6. Результаты расчета двух программ являются близкими друг к другу. Такая замена (в виде эквивалентной схемы) значительно сокращает время анализа, и упрощает решение поставленной задачи.

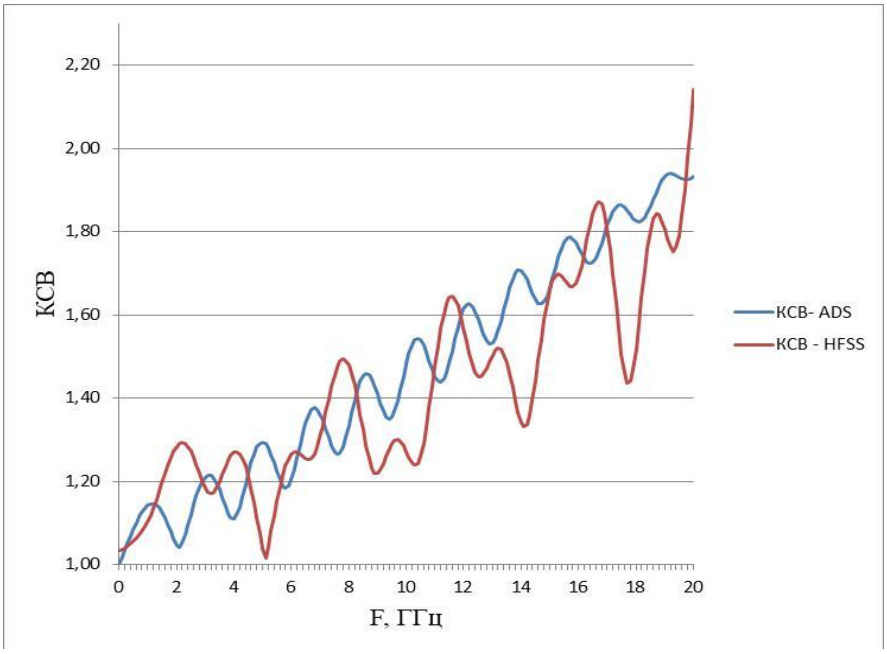


Рис. 6. Результаты анализа с использованием различных программных средств

Заключение

В данной работе исследовано влияние погрешности изготовления полосковых плат и мощных полосковых нагрузок на точность измерения их параметров. Результаты были получены на основе электромагнитного анализа модели измерительного устройства. Показана возможность замены электромагнитного анализа на анализ предложенной схемотехнической модели, что позволяет существенно сократить время вычислений. Также сделан вывод о значительном влиянии зазора между корпусом нагрузки и подводящей платой на результаты измерений, что требуется учесть при конструировании контактного устройства.

Библиографический список

1. ЭРКОН. Р1-17. СВЧ резистор для полосковых линий. [Электронный ресурс] . – Режим доступа http://www.erkon-nn.ru/catalog/12/r117/, свободный.
2. Контактные устройства. Контактные устройства ООО «БУТИС» http://butis-m.ru/ru/news-ru-ru/kontaktnye-ustrojstva/
3. Евсеев В.И., Лебедева Е.А., Никулин С.М., Петров В.В., Шипунов А.С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ устройств. Датчики и системы, №6, 2016, с. 22-27.
4. Фельдштейн А.Л Справочник по элементам волноводной техники. — Москва: Советское радио, 1967. — 651 с.
5. И. Романова. Материалы фирмы RogersCorporation для изготов-ления ВЧ и СВЧ печатных плат //Печатный монтаж. -2010.- №2: Технологии. – С. 35-37.
6. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей. Справочная книга/П. Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин . - Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

E.N. Korshunova, V.V. Petrov

ANALYSIS OF SOURCE ERRORS OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF POWERFUL STRIP MICROWAVE LOADS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The microwave parameters of high-power strip loads operating in the frequency range up to 18 GHz are analyzed, when they are connected to the measuring equipment by means of a contact device. The influence of the error in the manufacture of the strips and the measured loads on the measurement error is investigated. The electromagnetic analysis of the place of connection of the strip-board to the load under investigation is made, the circuit equivalent of this model is chosen, which considerably shortens the analysis time and simplifies the problem being solved.

Key words: high-frequency measurements, measuring equipment, contact device, powerful loads, measurement error, parameter dispersion, electromagnetic analysis.

УДК 621.3.091.22

М.С. Мякишева, К.И. Кисиленко, Е.П. Тимофеев

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Предложен компактный вариант исполнения волноводно-щелевой антенной решетки с планарным исполнением питающего слоя в миллиметровом диапазоне. Произведена оптимизация структуры.

Методология: Моделирование, оптимизация и расчёт основных характеристик устройства производился в САПР CST Microwave Studio.

Результаты: Анализ производится для решетки размерностью 16x16. Показано, что введение выступов в питающем слое на расстоянии четверти длины волны от места деления мощности не только не улучшает основные характеристики устройства, но и увеличивает нежелательные отражения в миллиметровом диапазоне. Произведена оценка влияния изменения формы излучающих щелей на основные характеристики щелевой антенной решетки.

Выводы: Отказ от данных выступов позволяет существенно упростить производство устройства в связи с упрощением одного из слоев. Скругление излучающих щелей позволяет более чем в два раза уменьшить коэффициент отражения в минимуме характеристики на рассматриваемом диапазоне.

Ключевые слова: антенная решетка, щелевая антенна, миллиметровый диапазон, САПР CST Microwave Studio, волноводная система питания, диаграмма направленности.

В последние десятилетия достаточно активно происходит внедрение приборов и устройств, работающих в миллиметровом диапазоне. Связано это с тем, что данный диапазон еще не так подробно освоен, что дает достаточно обширную область для исследований. Актуальным вопросом является разработка антенной техники в миллиметровом диапазоне. Построение беспроводных систем в этом диапазоне частот позволит существенно увеличить пропускную способность сети, а также уменьшить размеры приемопередающих устройств. В данной работе представлена конструкция волноводно-щелевой антенной решетки размерностью 16x16. Конструкция обеспечивает высокий коэффициент усиления антенны с большой эффективностью, так как нет потерь в диэлектрике. Важнейшим критерием при разработке является достижение узконаправленной диаграммы направленности для увеличения дальности передачи. Рассмотрен вариант исполнения такого устройства в диапазоне частот 105-115 ГГц и его основные характеристики.

Щелевая антенна — антенна, выполненная в виде металлического листа (экрана), в проводящей поверхности которой прорезаны отверстия (щели), служащие для излучения (или приёма) волн. Щелевые антенны отличаются сравнительной простотой конструкции; в них отсутствуют выступающие части, что в ряде случаев является их важным преимуществом (например, при установке на летательных аппаратах).

Наибольшую сложность составляет вопрос подведения энергии к щелям антенной решетки. В нижнем слое располагается запитывающий прямоугольный волновод. Выше располагается питающий слой, представляющий из себя разветвленную сеть прямоугольных полостей, они подводят энергию к слою, в котором располагаются соединяющие щели. Преимущество выбранной конструкции заключается в том, что она выполнена без использования диэлектриков. Это позволяет значительно снизить уровень потерь [1]. Посредством одной соединяющей щели происходит распределение питания на четыре излучающие щели. Для согласования слоев со щелями, между ними располагается слой с полостями. Подведение энергии производится не непосредственно на излучающие щели в

связи с усложнением в таком случае питающего слоя и фактически невозможности производства.

Конструкция антенны обладает малыми размерами, имеет простую форму без выступающих частей. Конструкция антенны состоит из прямоугольных волноводов в одних слоях и щелей в других. Для изготовления необходимо сделать несколько металлических пластин с прорезями, определенного вида. Эти пластины требуют высокой точности травления, особенно это касается высокочастотных систем. Чтобы соответствовать этим требованиям применяют Deep reactive-ion etching (DRIE) (реактивное ионное травление (РИТ)) [2]. Это процесс изготовления, который использует метод сухого травления, который дает высокую точность травления, кроме того, она позволяет легко интегрировать чипы других компонентов в систему. Для изготовления антенны используют несколько тонких ламинированных металлических пластин. Кремниевые пластины, вытравленные по технологии DRIE, покрывают металлом с высокой проводимостью и соединяют вместе диффузионным процессом при высокой температуре и высоком давлении.

Возможно улучшение характеристик устройств за счет увеличения числа ячеек. В таком случае возникает необходимость введения дополнительного питающего слоя для соединения совокупности ячеек 8x8. В противном случае волноводные полости будут располагаться слишком близко друг к другу, что сделает конструкцию более сложной, а порой и непригодной в производстве [2,3]. Расстояние между волноводными полостями очень мало, что приводит к дефектам металла в этих местах, сложности производства, а также может приводить к нежелательным эффектам, влияющим на характеристики устройства. В таком случае возникает необходимость введения дополнительного питающего слоя. В верхнем питающем слое располагается волновод, питающий совокупности ячеек 8x8, уровнем ниже волновод распределяет всю поступающую в антенну энергию на ячейки 8x8. Для соединения двух питающих слоев между ними вводится ещё одна пластина толщиной 0.22 мм. Тогда модель антенны размерностью 16x16 будет состоять из семи слоев. Волноводные полости в четвертом слое дополнительно оснащены выступами в местах, где необходимо распределить поступающую мощность в нескольких направлениях. В месте стыка входной порт сужается и напротив него располагается небольшой выступ, что позволяет улучшить КСВн [4] Послойное представление волноводно-щелевой антенной решетки представлено на рис. 1.

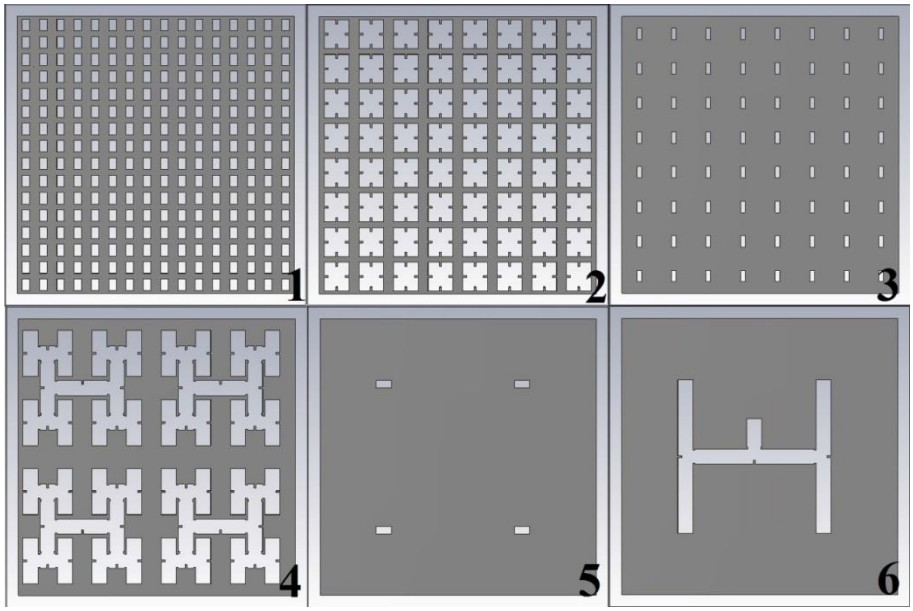


Рис.1. Послойное представление волноводно-щелевой антенной решетки размерностью 16x16

Высота слоев антенны с излучающими и соединяющими щелями 0.22 мм, 0.65 мм для слоя с полостями и 0.65 мм для питающих слоев. Габаритные размеры щелевой антенной решетки представлены на рис. 2 и составляют 36.45 мм x 36.45 мм x3.64 мм.

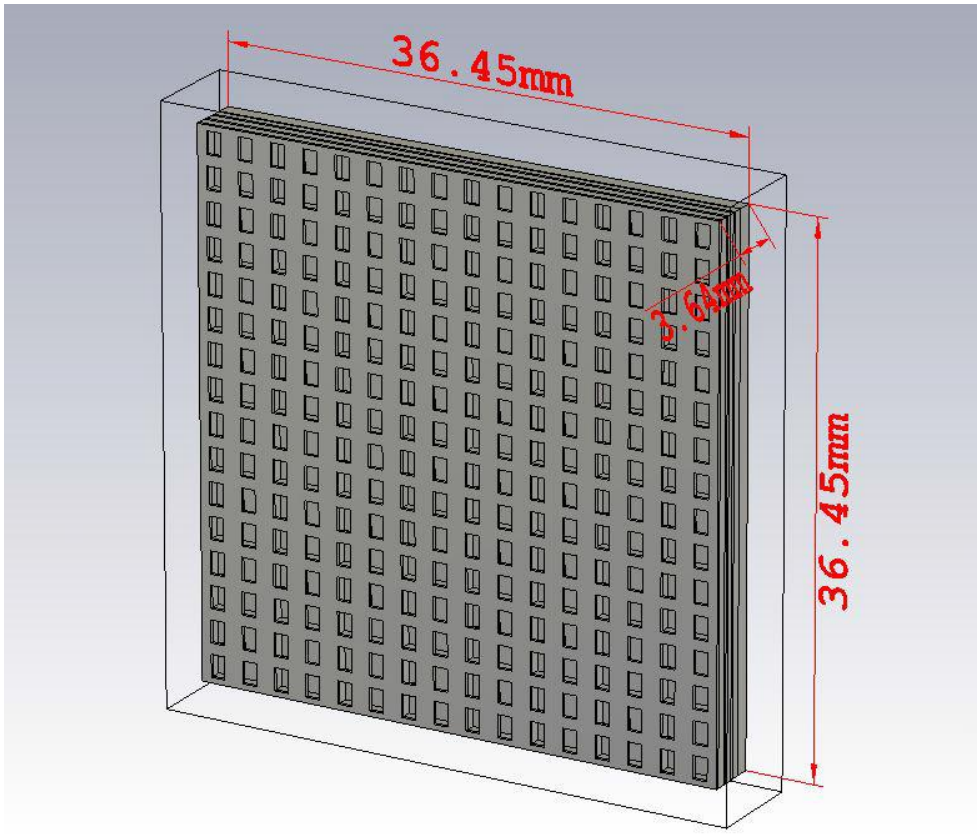


Рис. 2. Внешний вид и размеры волноводно-щелевой антенной решетки

Для антенных решеток, разрабатываемых в миллиметровом диапазоне, важным моментом является обеспечение наиболее простой конструкции питающего слоя при сохранении коэффициента отражения на должном уровне. Во многих источниках [4,5] предлагается делать сужения волноводов на расстоянии четверти волны от разветвления с целью обеспечения лучшего значения КСВн. Произведено сравнение характеристик с введением выступов и без, для выяснения, является ли данное усложнение модели целесообразным на рассматриваемых частотах.

Анализ структуры проводится в САПР CST Microwave Studio. Электродинамический анализ структуры основан на использовании метода конечных элементов. Оптимизация, заключающаяся в более точной подстройке геометрических параметров устройства для достижения требуемых характеристик, основана на локальном методе Classic Powell (классический метод Пауэлла).

Представлены основные параметры устройства щелевой антенной решетки в случае, если вводить выступы на расстоянии четверти длины волны. Как можем видеть из графика (рис. 3), коэффициент отражения достигает минимальное значение - 14.5дБ на частоте 112.7 ГГц. Диаграмма направленности представлена на частоте 112.7 ГГц в Е-плоскости (рис.4). Коэффициент усиления составляет 33.3 дБ. Ширина диаграммы направленности основного лепестка 3.6°. Уровень боковых лепестков на 12.7 дБ меньше уровня основного лепестка. На диапазоне частот 105-115 ГГц коэффициент усиления не ниже 32.2 дБ.

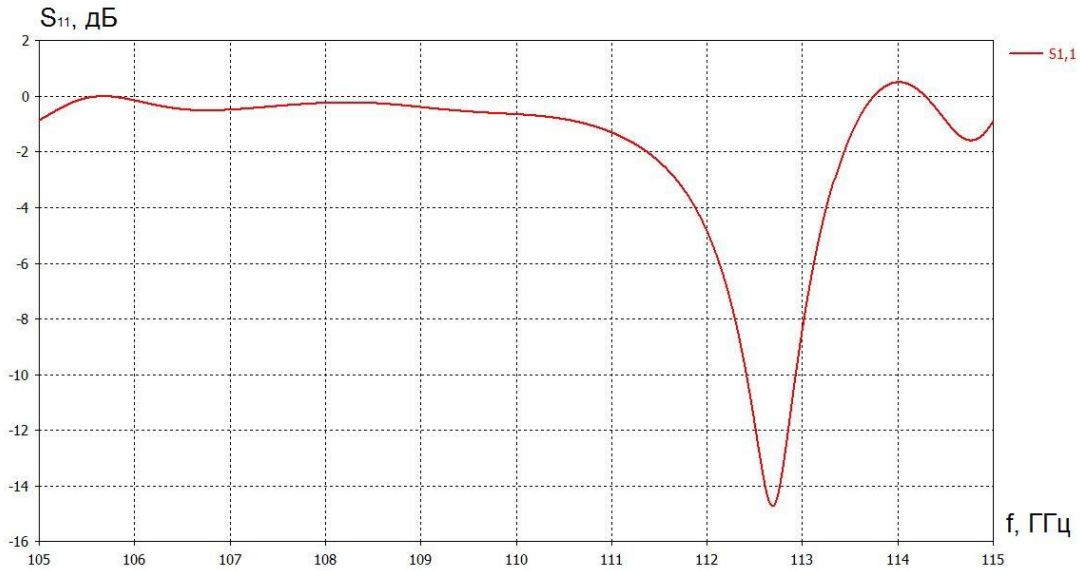


Рис.3. Коэффициент отражения для волноводно-щелевой антенной решетки с введением выступов

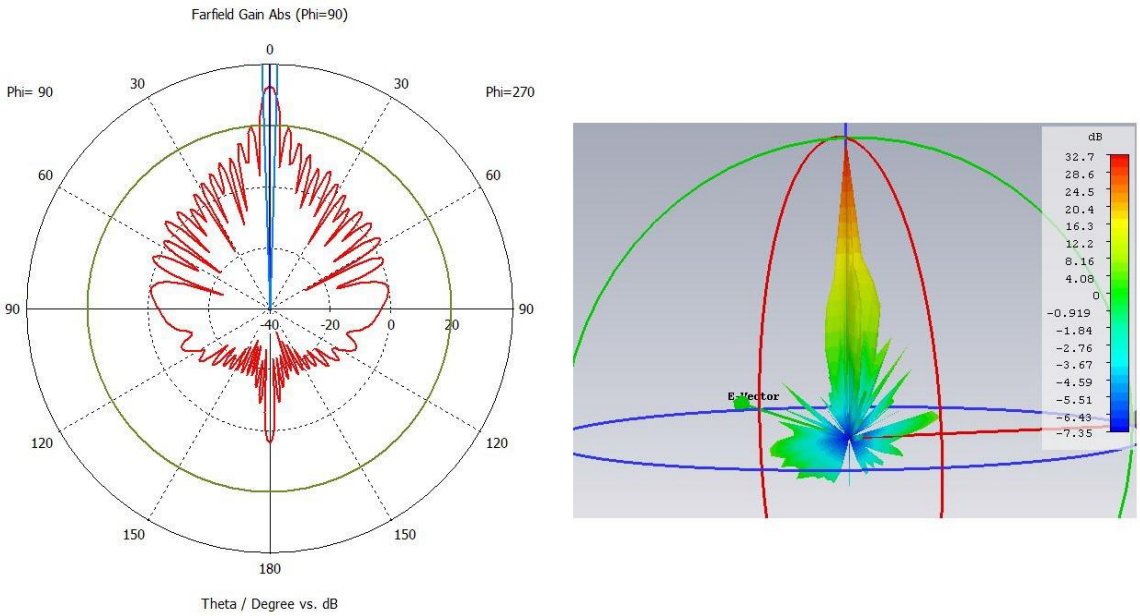


Рис. 4. Диаграмма направленности для волноводно-щелевой антенной решетки в полярных и сферических координатах

На рис. 5 представлены характеристики щелевой антенной решетки, при отказе от введения в модель выступов на расстоянии четверти длины волны от места деления мощности. В результате анализа модели размерностью 16x16 были получены значения коэффициента отражения, представленные на рис. 5. Коэффициент отражения S_{11} имеет минимум - 20.6 дБ на частоте 112.5 ГГц. На частоте 112.5 ГГц коэффициент усиления составляет 33.4 дБ в Е-плоскости. Ширина диаграммы направленности основного лепестка 3.6°. Уровень боковых лепестков на 12.6 дБ меньше уровня основного лепестка. На всем рассматриваемом диапазоне частот коэффициент усиления не ниже 32.5 дБ.

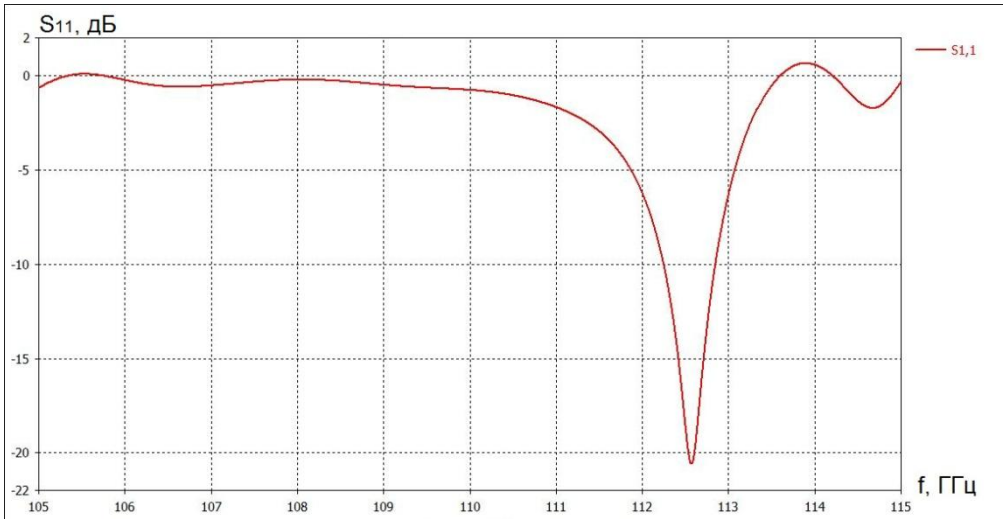


Рис.5. Коэффициент отражения для волноводно-щелевой антенной решетки без введения выступов

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что усложнение питающего слоя выступами на расстоянии четверти длины волны не целесообразно. В миллиметровом диапазоне для многоэлементной антенной решетки данного типа важным является упрощение слоев в связи с малыми размерами и, как следствие, трудностью производства. Кроме того в модели размерностью 16x16 наблюдается выигрыш в параметре S_{11} более чем на 6 дБ в минимуме характеристики в рассматриваемом диапазоне.

Еще один способ улучшения характеристик щелевой антенной решетки - изменение формы излучающих щелей. Добиться уменьшения величины паразитных отражений возможно при помощи скругления краев излучающих прямоугольных щелей. На рис. 6 представлено значение коэффициента отражения для волноводно-щелевой антенной решетки в случае введения щелей со скруглением. Значение минимума коэффициента отражения достигает - 46 дБ на частоте 112.6 ГГц. На рис. 6 выделен наилучший результат коэффициента отражения при радиусе кривизны скругления равном 0.23 мм.

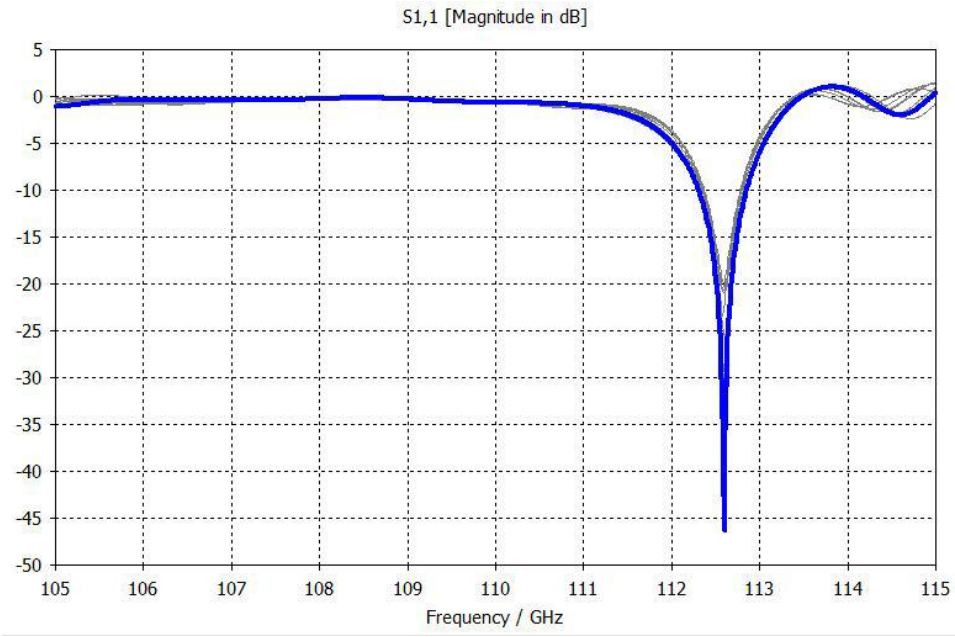


Рис. 6. Коэффициент отражения для волноводно-щелевой антенной решетки в случае щелей со скруглением

Выводы

Таким образом, в данной работе было выбрано схемотехническое исполнение устройства, приведены результаты расчета модели щелевой антенной решетки миллиметрового диапазона, выполненной в многослойном исполнении. Для расчета и оптимизации устройства использован программный пакет CST Microwave Studio. Представлены основные характеристики модели щелевой антенной решетки размерностью 16x16. Введение выступов в питающем слое на расстоянии четверти длины волны от места деления мощности не только не улучшает основные характеристики устройства, но и увеличивает нежелательные отражения в рассматриваемом диапазоне. Наблюдается выигрыш в параметре S_{11} более чем на 6 дБ в минимуме характеристики в рассматриваемом диапазоне. Отказ от данных выступов позволяет существенно упростить производство устройства в связи с упрощением одного из слоев. Произведена оценка влияния изменения формы излучающих щелей на коэффициент отражения щелевой антенной решетки. Скругление излучающих щелей позволяет более чем в два раза уменьшить коэффициент отражения в минимуме характеристики.

Библиографический список

1. Liu J. Design and Fabrication of a High-Gain 60-GHz Cavity-Backed Slot Antenna Array Fed by Inverted Microstrip Gap Waveguide //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Т. 65. – №. 4. – С. 2117-2122.

2. Tekkouk K. Corporate-Feed Slotted Waveguide Array Antenna in the 350-GHz Band by Silicon Process //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Т. 65. – №. 1. – С. 217-225.

3. Hirata A. Alignment Control System Using Beam-Tilting 1-D Waveguide-Slot Array Antennas for 120-GHz-Band Corporate-Feed High-Gain 2-D Arrays //IEICE Transactions on Communications. – 2017. – Т. 100. – №. 1. – С. 158-166.

4. Miura Y. Double-layer full-corporate-feed hollow-waveguide slot array antenna in the 60-GHz band //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Т. 59. – №. 8. – С. 2844-2851.

5. Kim D. 64×64-element and 32×32-element slot array antennas using double-layer hollowwaveguide corporate-feed in the 120 GHz band// IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 3, Mar. 2014. pp. 1507–1512.

M. S. Myakisheva, K. I. Kisilenko, E. P. Timofeev

MODELING AND OPTIMIZATION OF WAVEGUIDE-SLOT ANTENNA ARRAY OF MILLIMETER RANGE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: It was proposed compact embodiment of a waveguide-slot antenna array with a planar execution of the supply layer in the millimeter range. The structure was optimized.

Methods: Modeling, optimization and calculation of the main characteristics of the device was produced in CAD CST Microwave Studio.

Results: The analysis is performed for grid dimension 16x16. It is shown that the introduction of the ridges in the feeding layer at a distance of quarter wavelength from the place of division of power increases unwanted reflections in millimeter range. It was analyzed the influence of changing the shape of radiating cracks on the main characteristics of a slot antenna grid.

Finding: The rejection of these ridges allows you to simplify the manufacture of the device in connection with the simplification of one of the layers. Fillet of radiating cracks allows more than two times reducing the reflection coefficient at the minimum specifications in the considered range.

Key words: antenna array, slot antenna, the millimeter range, CAD CST Microwave Studio, corporate-feed waveguide, the radiation pattern.

УДК 621.3.091.22

К.И. Кисиленко, Е.П. Тимофеев, В.В. Щербаков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Исследован метод расчета геометрической оптики применительно к зеркальным антеннам.

Методология: Расчет параметров антенны проведен без использования САПР методом геометрической оптики.

Результаты: Произведен расчет параметров основного и вспомогательного зеркал антенны Кассегрена. Проведено сравнение результатов с результатами расчета в САПР. Показано хорошее соответствие результатов.

Выводы: Использование приведенного метода расчета позволяет существенно сократить время расчета. При этом, исключена необходимость использования больших вычислительных мощностей, а также дорогостоящих САПР для проведения электродинамического анализа.

Ключевые слова: антенна Кассегрена, миллиметровый диапазон, САПР, коэффициент усиления, геометрическая оптика.

Активное освоение терагерцового диапазона частот открывает возможность создания систем беспроводной связи с высокой скоростью передачи данных.

Особый интерес представляют системы связи на дальнее расстояние. Дальность связи в терагерцовом диапазоне частот ограничена и составляет порядка нескольких километров. Это связано с существенным поглощением терагерцового излучения в атмосфере. Как показывают исследования, для таких систем связи требуются антенны с узкой диаграммой направленности (ДН) и коэффициентом усиления (КУ) не менее 40 дБ.

Такие характеристики могут быть получены при использовании антенны Кассегрена, состоящей из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперболоида вращения, и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом данной антенны является небольшой ее размер, простота в изготовлении, высокие значения коэффициента усиления и малые уровни боковых лепестков. Основные геометрические размеры антенны приведены на рис. 1.

Расчет характеристик антенны Кассегрена в программе электромагнитного моделирования является ресурсоемкой задачей. Поэтому при контролируемой точности и достоверности расчетов с целью экономии вычислительных ресурсов и времени счета используют методы геометрической и физической оптики [1]. Следует отметить, что использование быстродействующих алгоритмов и математических моделей в САПР антенной техники значительно повышает эффективность проектирования. В частности, при решении задач оптимизации конструкции антенн значительно сокращаются сроки проектирования.

Высокий уровень коэффициента усиления является основным требованием, предъявляемым к зеркальным антеннам. Поэтому расчет конструкции антенны проводился при следующих заданных параметрах:

- коэффициент усиления (G_m) 50 дБ;
- рабочая частота 220 ГГц;

Используя известные формулы и соотношения находим:

- диаметр основного зеркала:

$$D_б = \frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{G_m}{\nu_{рез}}}\ , \qquad (1)$$

где $\nu_{\text{рез}}$ – коэффициент использования поверхности (рекомендуемый 0,5…0,7);

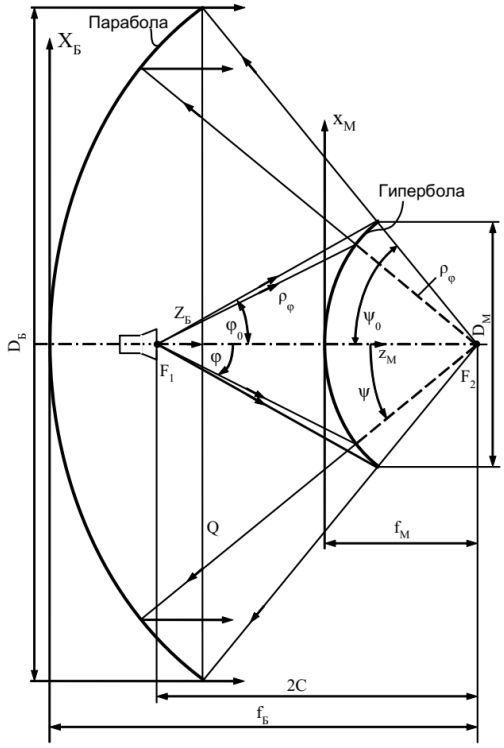


Рис.1. Основные геометрические параметры антенныКассегрена

-фокусное расстояние:

$$f_{\text{б}} = (0{,}35 \dots 0{,}5)D_{\text{б}}; \tag{2}$$

-определяем половину угла раскрыва:

$$\psi_0 = 2arctg\left(\frac{D_{\text{б}}}{4f_{\text{б}}}\right); \tag{3}$$

-диаметр вспомогательного зеркала:

$$D_{\text{м}} = \sqrt{2\alpha\lambda f_{\text{б}}}; \tag{4}$$

- эксцентриситет:

$$e_{\text{к}} = \frac{(4f_{\text{б}}+D_{\text{м}})}{(4f_{\text{б}}-D_{\text{м}})}; \tag{5}$$

-определяем половину угла раскрыва вспомогательного зеркала

$$\phi_0 = 2arctg\left[\left(\frac{e_{\text{к}}-1}{e_{\text{к}}+1}\right)tg\left(\frac{\psi_0}{2}\right)\right]; \tag{6}$$

-находим расстояние между действительным и мнимым фокусами гиперболы

$$4C = \frac{D_{\text{м}}sin(\psi_0+\phi_0)}{sin\psi_0 sin\phi_0}. \tag{7}$$

Рассчитанных параметров достаточно для построения модели антены в САПР (рис.2)расчета и анализа полученных характеристик[2,3].

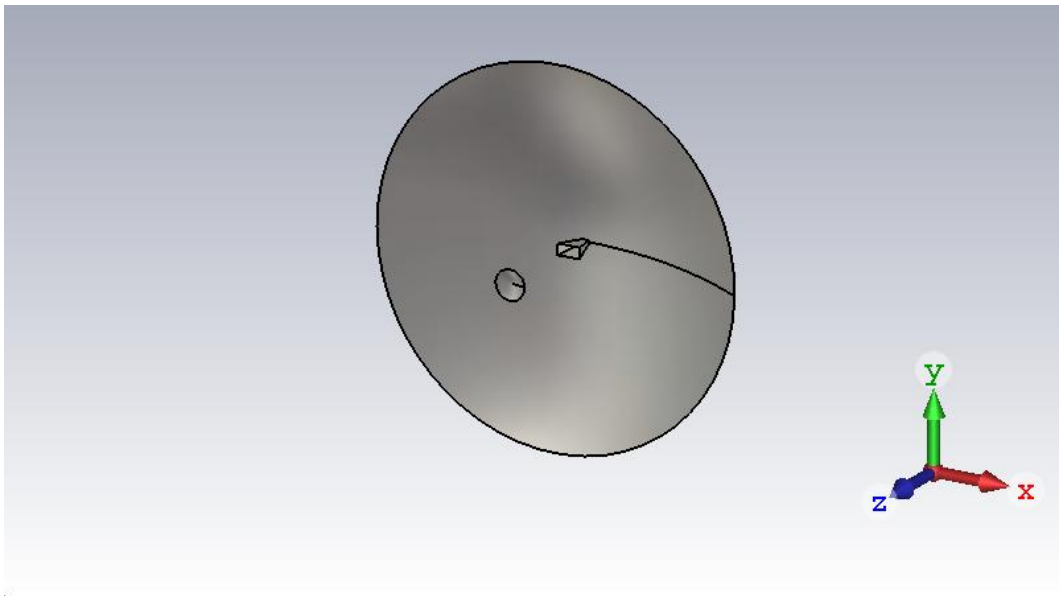


Рис. 2 –Модель антенны Кассегрена в САПР

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. 3 приведены результаты расчета ДН антенны Кассегрена.

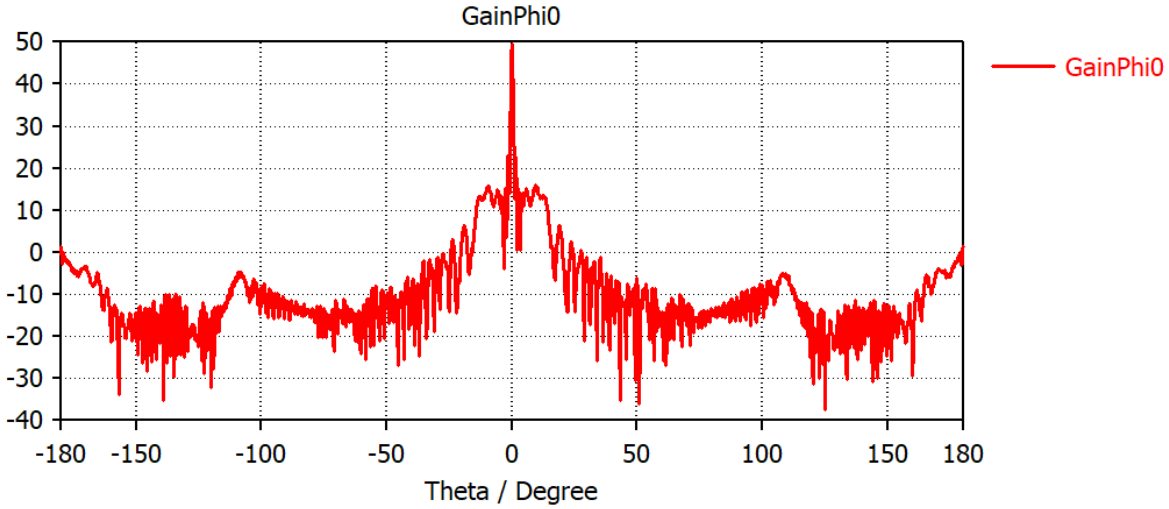


Рис. 3 - Диаграмма направленности антенны Кассегрена в Е-плоскости

Хорошее совпадение результатов позволяет быстро и качественно оценить зависимость коэффициента усиления от частоты для антенны с уже заданными параметрами и провести оптимизацию конструкции в интерактивном режиме, используя формулу:

$$G_m = \nu_{\text{рез}} \left(\frac{D_б \pi}{\lambda}\right)^2.$$

Выводы

Таким образом, в данной работе были рассчитаны основные параметры антенны Кассегрена методом геометрической оптики. Проведено сравнение результатов с результатами, полученными при расчете в САПР. Показано, что данный метод расчета позволяет с достаточной точностью быстро и качественно оценить характеристики зеркальной антенны, избегая при этом необходимости использования дорогостоящих САПР и больших вычислительных ресурсов. Отмечено, что данный метод рассматривается, как первое приближение при выборе, расчете и оптимизации подобного рода структур, поскольку данноеприближение не позволяет оценить влияние конструктивных особенностей всей конструкции в целом (крепеж зеркал, механизмы регулировки и настройки). Полученные результаты в дальнейшем эффективно используются при расчете и анализе характеристик зеркальных антенн уже на электродинамическом уровне.

Библиографический список

1. И.П. Заикин Проектирование антенных устройств радиорелейных линий связи / И.П. Заикин, А.В. Тоцкий, С.К. Абрамов //Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк.авиац. ин-т», 2006. – 90 с.

2. Кисиленко, К.И. Моделирование и расчет антенны Кассегрена на 290 ГГц / К.И. Кисиленко, В.А. Малахов, В.А. Узлов, В.В. Щербаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №4. С. 46-52.

3. Кисиленко, К.И. Расчет и измерение параметров антенны Кассегрена / К.И. Кисиленко, В.А. Малахов, А.С. Раевский, В.В. Щербаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. №3. С. 81-87.

K.I. Kisilenko, V.V. Sherbakov, E.P.Timofeev

USING METHODS OF GEOMETRICAL OPTICS FOR CALCULATION OF MIRROR ANTENNAS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The method of calculation of geometrical optics is applied to mirror antennas.

Design/methodology/approach: Calculation of the antenna parameters was carried out without the use of CAD by the method of geometric optics.

Originality/value: Using the above calculation method can significantly reduce the calculation time. At the same time, the need to use large computing power, as well as expensive CAD for electrodynamic analysis.

Key words: Cassegrain antenna, millimeter range, CAD, gain, geometric optics.

УДК 621.3.095.3

К.И. Кисиленко,Е.П. Тимофеев

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Оптимизация характеристик волноводных структур путем включения диэлектрических и поглощающих материалов.

Методология: Электродинамический анализ характеристик широкополосных устройств и их экспериментальное исследование в диапазоне СВЧ.

Результаты: Введение в конструкцию СШП антенны радиопоглощающего материала (заданных размеров и конфигурации) позволило расширить ее частотный диапазон за счет подавления волн высших типов.

Выводы: Предложенный способ расположения двух диэлектрических слоев на некотором расстоянии от боковой стенки, позволяет обеспечить выравнивание амплитудного распределения поля в Н-секториальном рупоре и увеличить допуск на точность изготовления диэлектрических вкладышей.

Ключевые слова: поглотители, диапазон СВЧ, широкополосность, диэлектрический слой.

Известно, что в диапазоне СВЧ существенной проблемой, ограничивающей частотный диапазон работы широкополосных устройств и антенн, являются возникающие волны высших типов, наущающие процедуры измерения и осуществления приемо-передачи информации.

Показано, что расширение частотного диапазона антенны возможно при эффективном подавлении волн высших типов без заметного влияния на основную волну. Такая задача избирательного поглощения только паразитных типов волн решена на основе анализа структуры основной и высших типов волн, и определения места размещения радиопоглощающего материала (РПМ), его конфигурации и размеров.

Экспериментально подтверждено[1], что при размещении объемного радиопоглощающего материала квадратного сечения с оптимальными размерами в углы экранированной полосковой линии (ЭПЛ), затухание основной Т-волны увеличивается всего лишь на (5..7)%, в то время как для Н-волн высших типов – в (10..20) раз, обеспечивая практически их полное подавление. Этот эффект иллюстрируется на рис. 1.

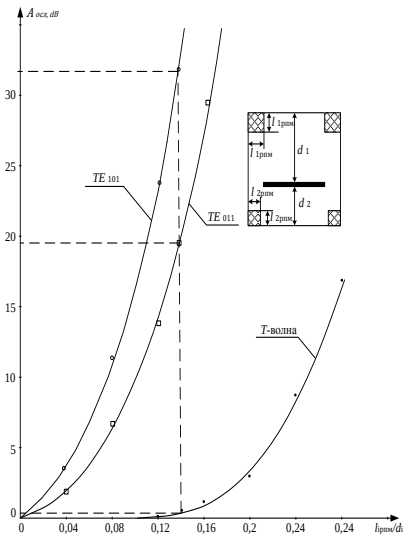


Рис. 1. Зависимость ослабления основной Т-волны и Н- волн высших типов от размеров поперечного сечения РПМ

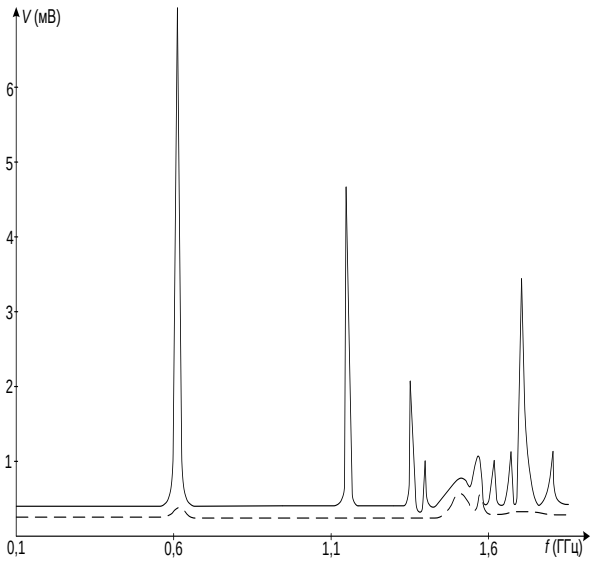


Рис.2.Частотная зависимость выходного напряжения антенны-датчика, калибруемого в ИО ЭМП

На рис. 2 показана зависимость выходного напряжения антенны-датчика от частоты калибруемого в источнике однородного электромагнитного поля (ИО ЭМП), выполненного на базе крупномасштабной ЭПЛ (сплошная линия – ЭПЛ без РПМ, пунктирная – с РПМ в углах ЭПЛ).Из рис. 2 видно, что возникающие резонансы волн высших типов в ИО ЭМП нарушают однородность электромагнитного поля и как следствие, нарушают процедуру измерения и существенно сокращают рабочий диапазон частот ИО ЭМП (сплошная линия). Введение РПМ (рис. 1) позволило подавить резонансы волн высших типов и значительно расширить частотный диапазон работы ИО ЭМП (пунктирная линия).

Рассмотренный подход по расширению частотного диапазон устройств СВЧ, за счет использования РПМ для избирательного подавления волн высших типов, подтвердил эффективность и плодотворность этого решения при проектировании и оптимизации конструкции сверхширокополосных (СШП) рупорных гребневых антенн и позволил их согласовать в полосе частот 0,8-18 ГГц (в полосе $f_в/f_н \geq 22$) при уровне КСВн<2 [2].

На ряду с включениями РПМ широко используются волноводы с частичным диэлектрическим заполнением. Частично заполненные волноводы приобрели большое распространение в технике СВЧ в связи с разработкой и внедрением высококачественных диэлектриков. Использование этих материалов в волноводах позволяет не только изменять их основные характеристики, но и значительно улучшать характеристики существующих и вновь разрабатываемых устройств и техники СВЧ, осуществлять оптимизацию их конструкции. В частности, реализовать возможность выравнивания амплитудного распределения в раскрыве волновода прямоугольного сечения с помощью двухслойных диэлектрических вкладышей.

В [3] показано, что если в Н-секториальный волновод ввести две диэлектрические пластины соответствующей толщины, примыкающие к его стенкам вдоль вектора Е, то в раскрыве, свободном от диэлектрика, распределение поля равномерное, а внутри диэлектрических слоев оно будет спадать до нуля в соответствии с граничными условиями. Толщина диэлектрических платин, расположенных непосредственно у боковых стенок, при которой происходит выравнивание поля:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon - 1}},$$

где λ– длина волны, ε – диэлектрическая проницаемость.

При достаточно большом ε можно получить очень малую толщину диэлектрического вкладыша, что создаст практически равномерное распределение поля по всему раскрыву.

При этом фазовая скорость волны на выходе рупора будет равна скорости света в свободном пространстве, что существенно облегчает согласование рупора с пространством.

На рис.3[4] показана зависимость между толщинами двух диэлектрических слоев, при которых поле на раскрыве равномерно. При уменьшении диэлектрической проницаемости слоев увеличивается их толщина, обеспечивающая равномерность поля. Как следует из рис.3, допуск по толщине слоя увеличивается при уменьшении толщины слоя. Погрешность в толщине диэлектрического слоя влияет на неравномерность амплитудного распределения поля по раскрыву.

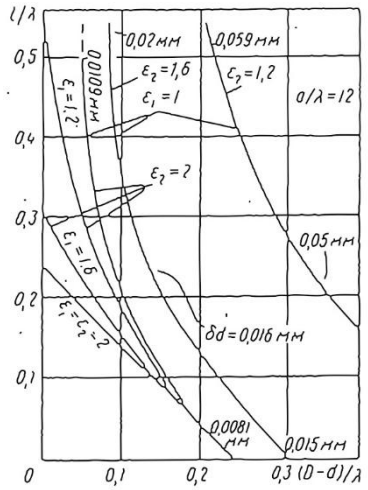


Рис.3. Зависимость между толщинами двух диэлектрических слоев.

На рис.4 представлено распределение поля внутри прямоугольного волновода при различных допусках по толщине диэлектрических слоев. Вработе[4] представлены экспериментальные данные выравнивания амплитудного распределения в Н-секториальном рупоре с раскрывом 7λ с помощью фторопластовых вкладышей. Экспериментальные измерения показали достаточно хорошее выравнивание на расчетной частоте.

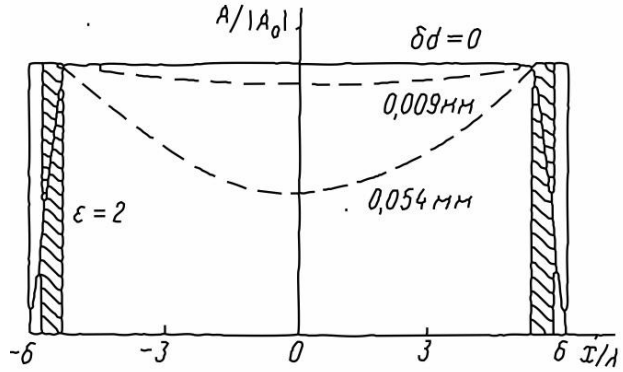


Рис.4. Распределение поля внутри прямоугольного волновода

Выводы

Введение в конструкцию СШП антенны радиопоглощающего материала (заданных размеров и конфигурации) позволило расширить ее частотный диапазон за счет подавления волн высших типов.

Предложенный способ расположения двух диэлектрических слоев на некотором расстоянии от боковой стенки, позволяет обеспечить выравнивание амплитудного распределения поля в Н-секториальном рупоре и увеличить допуск на точность изготовления диэлектрических вкладышей.

Библиографический список

1. К.И. Кисиленко, Е.П. Тимофеев. Расчет и измерение характеристик сверхширокополосной рупорной гребневой антенны. «Физика и технические приложения волновых процессов». XIII Международная научно-техническая конференция. Материалы конференции. – Казань – 2015, - с.72-74.

2. К.И. Кисиленко, Е.П. Тимофеев. Сверхширокополосная рупорная гребневая антенна с частичным диэлектрическим заполнением. - Антенны. 2017. № 7 (239). С. 56-61.

3. Ю.В. Егоров. Частично заполненные прямоугольные волноводы. – М.:Сов. Радио, 1967.

4. В.Д. Коротков, Г.В. Маркин. Диэлектрические вкладыши в прямоугольном волноводе. - Радиотехника. 1990. № 4. С. 69-71.

K.I. Kisilenko, E.P.Timofeev

OPTIMIZATION OF THE CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDE STRUCTURES BY INCLUDING ABSORBING MATERIALS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Optimization of the characteristics of waveguide structures by including dielectric and absorbing materials.

Design/methodology/approach: Electrodynamic analysis of the characteristics of broadband devices and their experimental study in the microwave range.

Originality/value: The introduction into the design of the UWB antenna of the radio absorbing material (given sizes and configurations) made it possible to expand its frequency range by suppressing waves of higher types. The proposed method for arranging two dielectric layers at some distance from the side wall makes it possible to equalize the amplitude distribution of the field in the H-sectorial horn and to increase the tolerance for the accuracy of manufacturing dielectric inserts.

Key words: absorbers, microwave band, broadband, dielectric layer.

УДК 621.372.81.09

В.А. Малахов[1], А.Д. Миронова[1], Е.В. Павлович[2]

СПЕКТР ВОЛН ЭКРАНИРОВАННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА СО СЛОЕМ ПЛАЗМЫ

[1] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
[2] Филиал ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

В статье приведены результаты исследования влияния комплексной диэлектрической проницаемости плазмы на спектр волн круглого экранированного волновода заполненного изотропной плазмой на примере трансформации характеристик основной волны круглого экранированного волновода H_{11} и на спектр волн, включая комплексную волну, круглого двухслойного экранированного волновода, внешний слой которого заполнен изотропной плазмой.

Ключевые слова: дисперсионное уравнение, однородная плазма, комплексные решения, комплексные волны, экранированный волновод

В данной работе исследованы спектры волн круглых экранированных волноводов (однослойного и двухслойного), которые заполнены изотропной плазмой с комплексной диэлектрической проницаемостью (рис.1). Соответствующие краевые задачи формулируются в приближении неограниченной протяженности цилиндра по продольной координате, что обосновывается выполнением условия $L >> \lambda$, где L – длина проводящего цилиндра, λ – длина волны излучения источника.

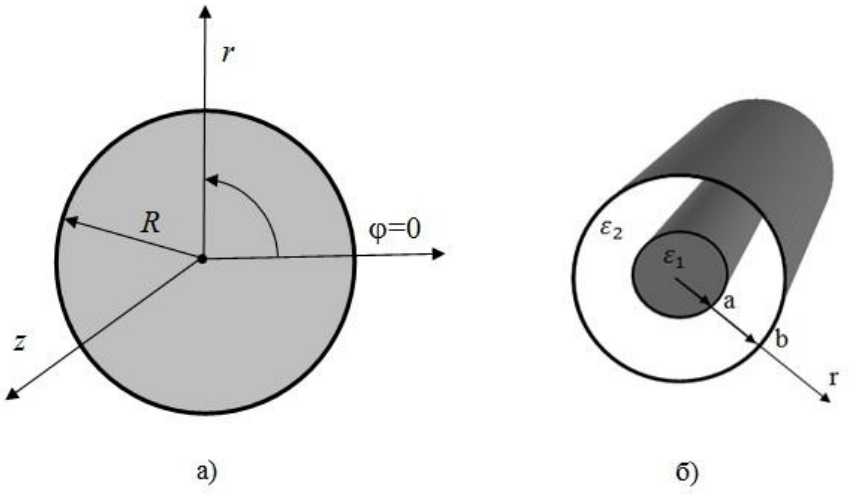


Рис.1. Круглый экранированный волновод: а) однослойный; б) двухслойный.

Решение краевой задачи для круглого однослойного экранированного волновода сводится к определению постоянных распространения собственных волн (Е- или Н-типа), путем решения дисперсионного уравнения для соответствующих волн [1]:

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_a \mu_a - \left(\chi_{nm}/R\right)^2},$$

где χ_{nm} – m-ый корень уравнения $J_n\left(\chi_{nm}\right) = 0$ для волн *E*–типа или $J'_{nm}\left(\chi_{nm}\right) = 0$ для волн *H*–типа

Расчеты проводились для круглого экранированного волновода радиусом *R*=0,05м заполненного изотропной плазмой. Для проведения численных исследований был составлен расчетный алгоритм на основе приведенного выше дисперсионного уравнения, в котором диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей волновод, полагалась комплексной

величиной, зависящей от концентрации N_e электронов плазмы. Для поиска корней дисперсионного уравнения использовался комбинированный метод поиска комплексных корней на основе методов Мюллера и «Вариации фазы» [2], этот же метод использовался для поиска корней дисперсионного уравнения волн круглого двухслойного экранированного волновода.

С целью проверки работоспособности алгоритма были произведены расчеты для круглого экранированного волновода с однородным воздушным заполнением (при N_e=0). На рис. 2 приведены дисперсионные характеристики первых 5 волн *H*- типа. Полученные результаты, совпадают с результатами, приведенными в [1].

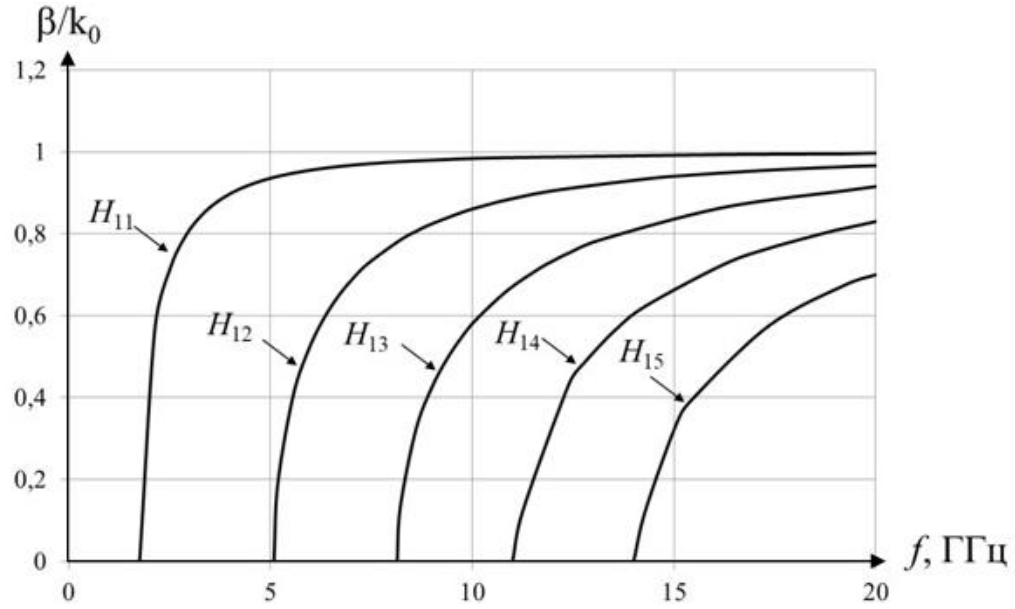


Рис.2. Дисперсионные характеристики первых пяти волн *H*-типа для порядка функции Бесселя *n*=1, N_e=0 м$^{-3}$

Рассмотрим влияние действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости плазмы $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, рассчитанных по формулам $\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, $\varepsilon_2 = \frac{\Gamma\omega_p^2}{\omega^3}$, $\omega_p = \sqrt{e^2 N_e / \varepsilon_0 m_e}$ – плазменная частота, N_e – концентрация электронов, Г – феноменологический коэффициент затухания.

Исследуем трансформацию дисперсионной характеристики и характеристики затухания основной волны круглого экранированного волновода H_{11} при изменении диэлектрической проницаемости плазмы. Очевидно, что в качественном плане влияние комплексной диэлектрической проницаемости плазмы на характеристики других волн будет аналогично влиянию на характеристики волны H_{11}.

На рис 3 приведены дисперсионные характеристики и характеристики затухания волны H_{11} при разной концентрации электронов N_e и значении ε_2=0, т.е. при действительном значении диэлектрической проницаемости плазмы.

Из рис. 3 следует, что с увеличением концентрации электронов критическая частота растет. Видимое изменение критической частоты для круглого экранированного волновода радиусом *R*=0,05м происходит при значении концентрации $N_e > 1 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$.

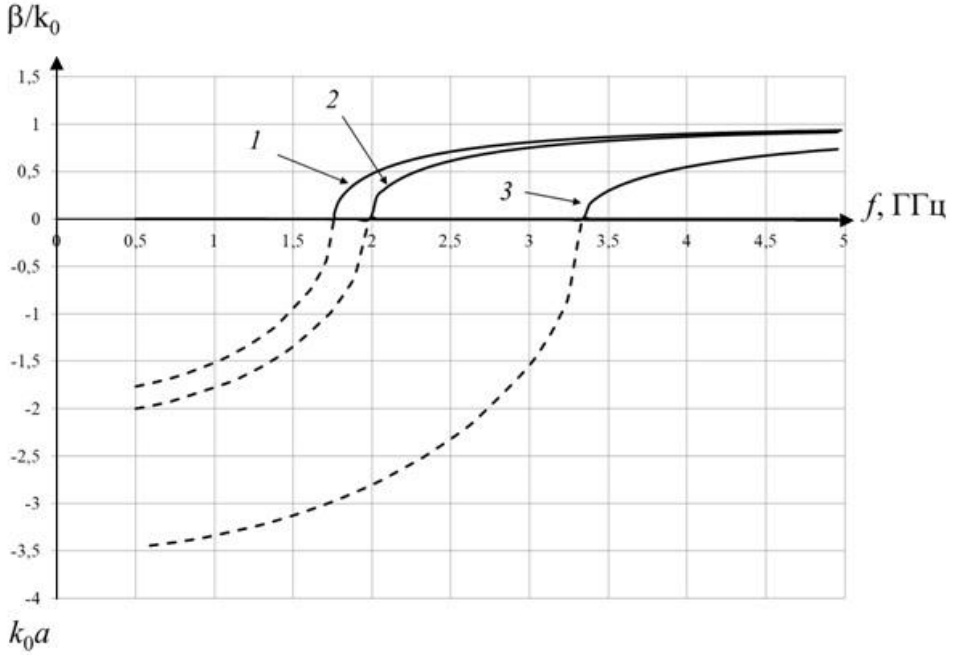


Рис.3. Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волны H_{11} в волноводе радиусом R=0,05м при концентрации электронов: 1 – N_e=0 м$^{-3}$; 2 – N_e=1·10^{16} м$^{-3}$; 3 – N_e=1·10^{17} м$^{-3}$

Исследуем влияние на характеристики волны H_{11} мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости плазмы, полагая величину феноменологического коэффициента затухания Г=1·10^{8} с$^{-1}$, значении концентрации электронов N_e=1·10^{17} м$^{-3}$.

Соответствующие дисперсионные характеристики и характеристики затухания волны H_{11} приведены на рис.4.

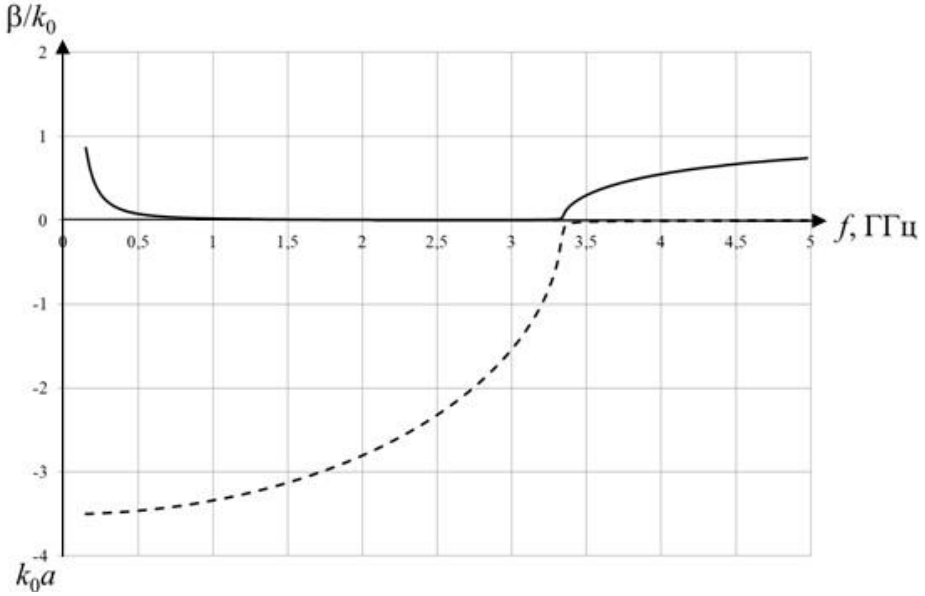


Рис. 4. Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волны H_{11} в волноводе радиусом R=0,05 м при концентрации электронов N_e=1·10^{17} м$^{-3}$ и значении феноменологического коэффициента затухания Г=1·10^{8} с$^{-1}$

Из рис. 4 видно, что при учете мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости плазмы у волны H_{11} отсутствует критическая частота. Во всем диапазоне частот продольное волновое число β является комплексным. При уменьшении частоты

коэффициент замедления сначала близок к нулю, затем начинает увеличиваться и стремится к бесконечности.

Поведение характеристик других волн круглого экранированного волновода аналогично поведению характеристик волны H_{11}.

Рассмотрим круглый экранированный двухслойный волновод (рис. 1а). Дисперсионное уравнение волн круглого двухслойного экранированного волновода сводится и имеет вид [3]:

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1^2}\frac{J_n'(\alpha_1 a)}{J_n(\alpha_1 a)}-\frac{\varepsilon_2}{\alpha_2^2}\frac{R^{e'}(\alpha_2 a)}{R^{e}(\alpha_2 a)}\right]*\left[\frac{\mu_1}{\alpha_1^2}\frac{J_n'(\alpha_1 a)}{J_n(\alpha_1 a)}-\frac{\mu_2}{\alpha_2^2}\frac{R^{m'}(\alpha_2 a)}{R^{m}(\alpha_2 a)}\right]=\frac{n^2}{a^2}\left(\frac{\varepsilon_1\mu_1}{\alpha_1^2}-\frac{\varepsilon_2\mu_2}{\alpha_2^2}\right)\left(\frac{1}{\alpha_1^2}-\frac{1}{\alpha_2^2}\right),$$

где

$$R^{e}(\alpha_2 r)=\frac{J_n(\alpha_2 r)Y_n(\alpha_2 b)-J_n(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a)Y_n(\alpha_2 b)-J_n(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 a)},$$

$$R^{m}(\alpha_2 r)=\frac{J_n(\alpha_2 r)Y_n'(\alpha_2 b)-J_n'(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a)Y_n'(\alpha_2 b)-J_n'(\alpha_2 b)Y_n(\alpha_2 a)}.$$

β – продольное волновое число; $\alpha_{1,2}=\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_0\omega^2-\beta^2}$ – поперечные волновые числа в областях I, II, $J_n(\alpha_2 r)$ и $Y_n(\alpha_2 r)$ – цилиндрические функции 1-го и 2-го рода, a и b – внутренний и внешний радиусы.

Расчеты проводились для круглого экранированного волновода с внешним радиусом b=0,01м и внутренним радиусом a=0,026м, внешний слой которого заполнен изотропной плазмой. Для проведения численных исследований был составлен расчетный алгоритм на основе приведенного выше дисперсионного уравнения, в котором диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей волновод, полагалась комплексной величиной, зависящей от концентрации N_e электронов плазмы. С целью проверки работоспособности алгоритма вначале были произведены расчеты для круглого экранированного волновода с однородным воздушным заполнением (при N_e=0), диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя которого $\varepsilon_1=10$. На рисунке 5 приведены дисперсионные характеристики четырех первых волн круглого двухслойного экранированного волновода.

Полученные результаты совпадают с результатами, приведенными в [3]. На рисунке 5 приведены характеристики соответствующие: $К_1$ – распространяющимся волнам, $К_2$ – реактивно затухающим запредельным волнам, $К_3$ –комплексным волнам [3].

Рассмотрим влияние изменения концентрации электронов на дисперсионные характеристики волн круглого двухслойного экранированного волновода. Концентрацию электронов выберем $N_e=2\cdot10^{15}$ м$^{-3}$. На рисунке 6 приведены дисперсионные характеристики четырех первых волн круглого двухслойного экранированного волновода, внешний слой которого заполнен изотропной плазмой.

Как видно из рисунка 6, при данной концентрации электронов произошел сдвиг вправо по частоте дисперсионных характеристик волн круглого двухслойного экранированного волновода, наблюдается так же увеличение частотной области существования комплексной волны. При дальнейшем увеличении концентрации электронов плазмы продолжается увеличение значения критических частот волн круглого двухслойного экранированного волновода.

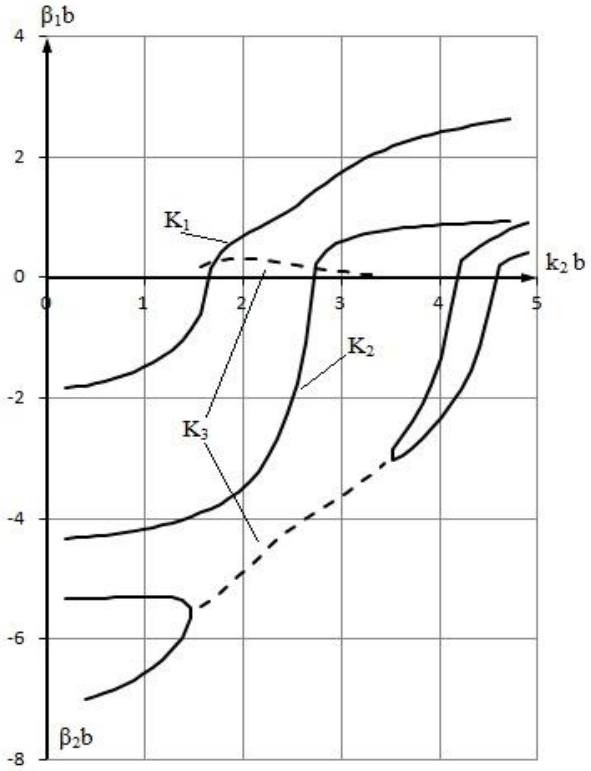


Рис.5. Дисперсионные характеристики четырех первых волн круглого экранированного волновода при $a/b = 0{,}26$, $\varepsilon_1 = 10$, $N_e = 0$ м$^{-3}$

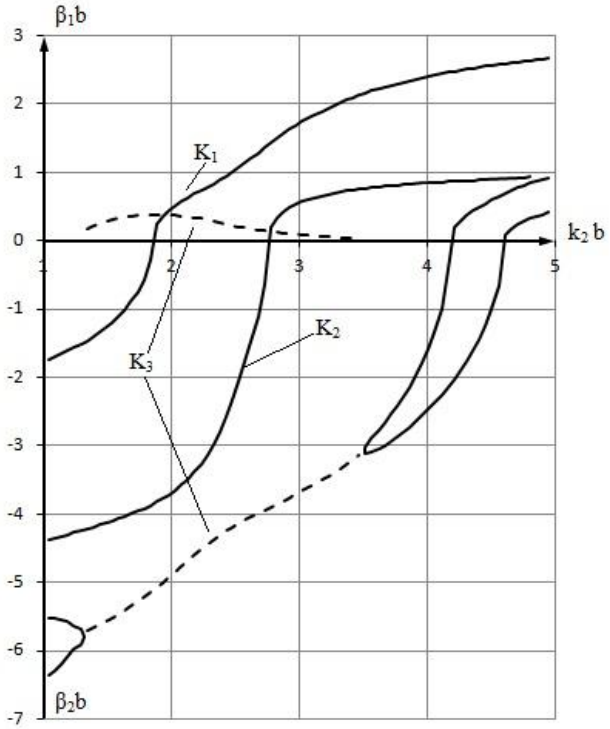


Рис.6. Дисперсионные характеристики четырех первых волн круглого экранированного волновода при $a/b = 0{,}26$, $\varepsilon_1 = 10$, $N_e = 2 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$

Выводы

Таким образом, в данной работе было рассмотрено влияние действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости плазмы $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, при изменении концентрации электронов N_e и феноменологического коэффициента затухания Г.

Обнаружено, что с увеличением концентрации электронов плазмы, критическая частота волн рассмотренных экранированных волноводов растет. Видимое изменение критической частоты для круглого экранированного волновода радиусом R=0,05м происходит при концентрации электронов $N_e > 1 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$. Так же показано, что при учете мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости плазмы у волны H_{11} отсутствует критическая частота. Во всем диапазоне частот продольное волновое число β является комплексным.

Исследуя влияние изменения концентрации электронов в слое плазмы на дисперсионные характеристики круглого двухслойного экранированного волновода, было выявлено, что изменение концентрации до $2 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$ существенно не влияет на картину дисперсионных характеристик волн рассмотренных направляющих структур.

Библиографический список

1. Неганов, В.А. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. – М.: Радиотехника. – 2007. – 743 с.
2. Малахов, В.А. О решении дисперсионных уравнений волн направляющих электродинамических структур на комплексных плоскостях волновых чисел / В.А. Малахов, А.С. Раевский, С.Б. Раевский //Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – Т. 55. – № 6. – С. 1028.
3. Раевский, А.С. Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский – М.: Радиотехника. – 2010. – 223 с.

V.A.Malakhov.[1], A.D.Mironova[1],E.V.Pavlovich[2]

THE WAVE SPECTRUM OF A SHIELDED CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH A LAYER OF PLASMA

[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
[2] Branch FSUE RFNC VNIIEF «NIIIS named after Yu.Ye.Sedakov»

The results of the investigation of the effect of the complex dielectric permittivity of a plasma on the spectrum of waves of a circular shielded waveguide filled with an isotropic plasma are presented. The example of the transformation of the characteristics of the main wave of a round screened waveguide H_{11} and the wave spectrum, including a complex wave, of a circular two-layered shielded waveguide whose outer layer is filled with isotropic plasma.

Keywords: dispersion equation, homogeneous plasma, complex solutions, complex waves, screened waveguide

УДК 621.372.81.09

В.А. Малахов, М.С. Маркин, А.С. Раевский

ЭКРАНИРОВАННЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВСТАВКОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ПРОДОЛЬНЫЕ ОТВЕРСТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: исследование и расчёт модели круглого экранированного волновода, имеющего вставку в виде диэлектрика .

Методология: Моделирование и расчёт основных характеристик устройства производился в САПР Ansys HFSS.

Результаты: расчёт модели показал наличие у структуры фильтрующих свойств.

Выводы: дальнейшее изучение и усложнение модели может позволить создать СВЧ фильтр в виде отрезка круглого волновода

Ключевые слова: круглый экранированный волновод, САПР Ansys HFSS, фотонный кристалл, полосовой фильтр, диэлектрическая вставка.

Фотонные кристаллы представляют собой структуры с пространственной модуляцией диэлектрических свойств материала по одному или нескольким измерениям, причём размеры неоднородностей – порядка длины волны излучения. Периодическая структура фотонного кристалла приводит к тому, что спектр электромагнитных волн приобретает зонный характер. Наличие фотонных запрещённых зон означает, что определённая часть спектра полностью отражается от структуры, то есть волна не может проникнуть в кристалл. Создание дефектов периодичности приводит к появлению спектральных окон прозрачности в запрещённых зонах, что позволяет получить узкополосный фильтр из кристалла.

В работах Д. Усанова рассматривается применение гетерогенных фотонных кристаллов, состоящих из диэлектрических матриц с воздушными включениями и металлических плёнок нанометровой толщины в качестве согласованных нагрузок для прямоугольной волноводной линии передачи в диапазоне 8-12 ГГц.

В данной работе были произведены построение и расчёт трёхмерной модели цилиндрического экранированного волновода с вставкой из диэлектрика, в котором расположены продольные отверстия. Моделирование проводилось в САПР Ansys HFSS. Геометрические параметры модели: радиус волновода – 40 мм, длина – 800 мм, диэлектрическая вставка расположена на расстоянии 320 мм от одного из торцов волновода, длина вставки – 80 мм, диэлектрическая проницаемость – 5. Во вставке выполнено 36 отверстий радиусом 3 мм, расположенных радиально в три уровня. Первый – на расстоянии 10 мм от центра: пять отверстий с шагом 72°, второй – на расстоянии 20 мм от центра с шагом 36° и третий – на расстоянии 30 мм от центра с шагом 18°, а также одно отверстие в центре. Общий вид структуры представлен на рис.1. На внешней поверхности волновода задано условие идеальной проводимости, выполняющее роль экрана. На торцах располагаются волновые порты, первый порт – на торце, ближнем к диэлектрику, второй – на дальнем.

Модель рассчитывалась на частотах от 1 до 10 ГГц с шагом 0.1 ГГц методом конечных элементов. По результатам расчётов строились графики коэффициента отражения S11. Результаты расчётов приведены на рис. 2.

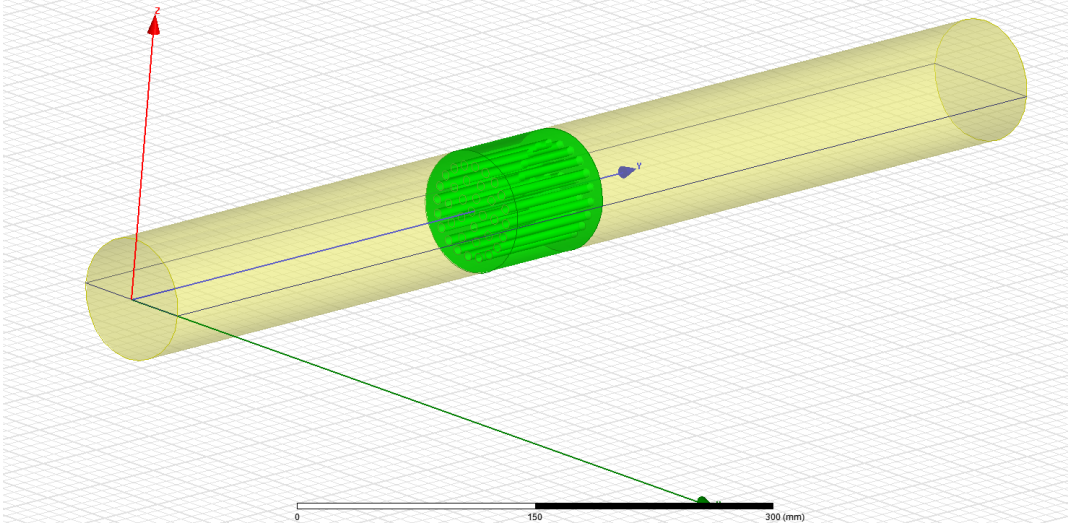


Рис. 1 – общий вид модели в 3D-редакторе САПР Ansys HFSS

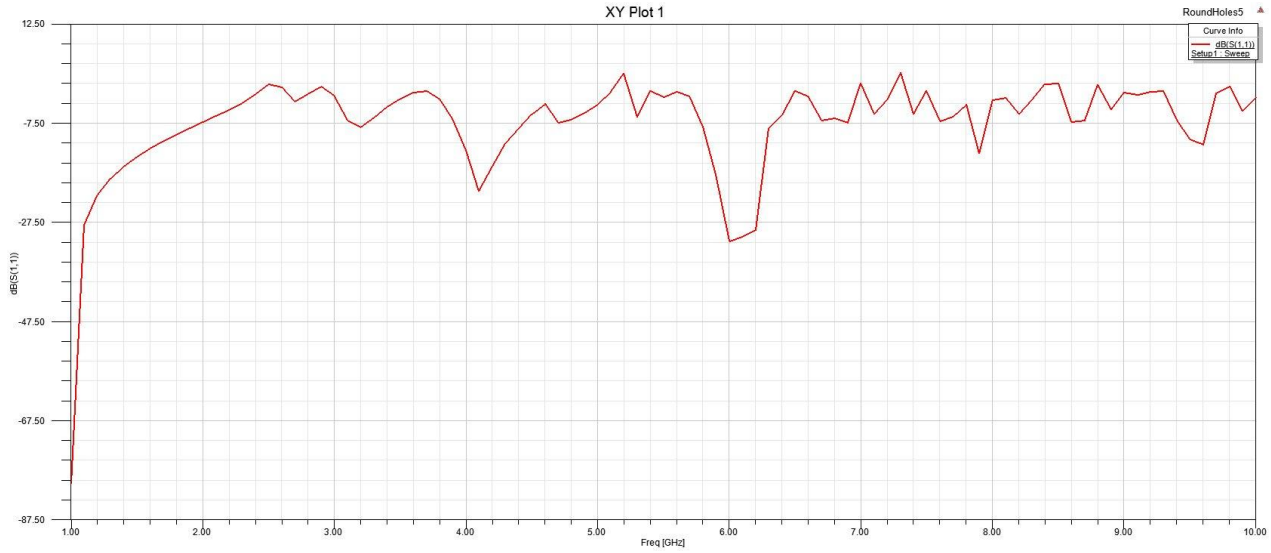


Рис. 2 – построенная характеристика S11 для рассчитываемой структуры

Также была построена характеристика для такой же структуры, но с диэлектрической вставкой без отверстий проницаемостью 5. Чтобы выявить влияние отверстий в диэлектрике дополнительно была рассчитана эффективная (усреднённая) диэлектрическая проницаемость вставки с отверстиями и также смоделирована в САПР. Результаты приведены на рис. 3 и 4 и в сравнении с графиком S11 модели с отверстиями позволяют утверждать о существенном влиянии отверстий на коэффициент отражения модели, а также о фильтрующем эффекте, проявляющимся на частотах порядка 4.1 ГГц и 6..6.2 ГГц.

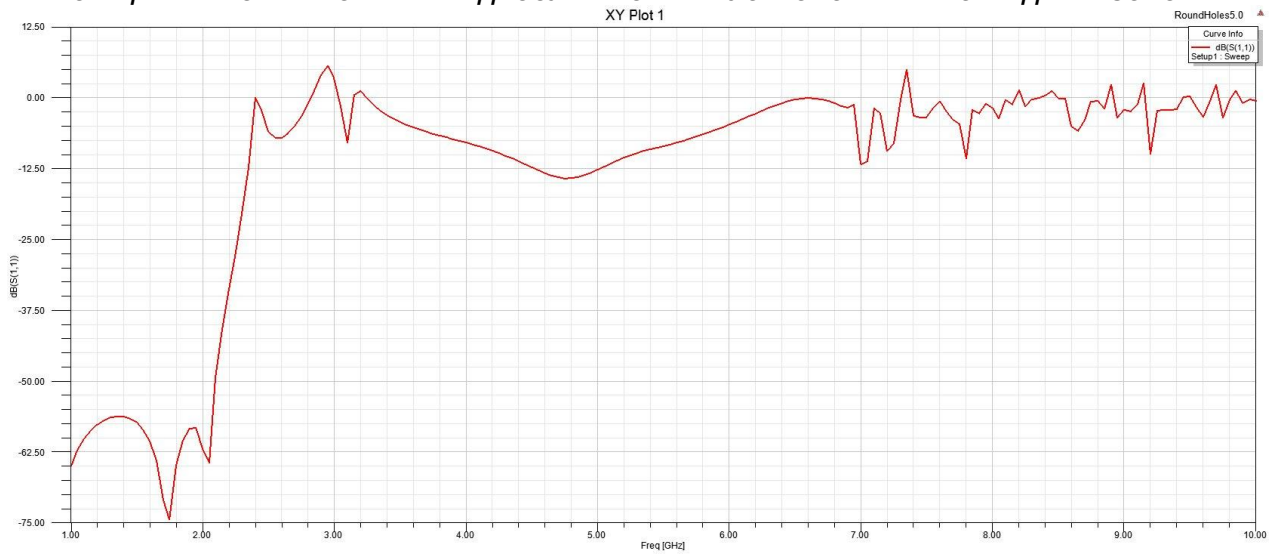


Рис. 3 – S11 модели со сплошной диэлектрической вставкой с проницаемостью 5

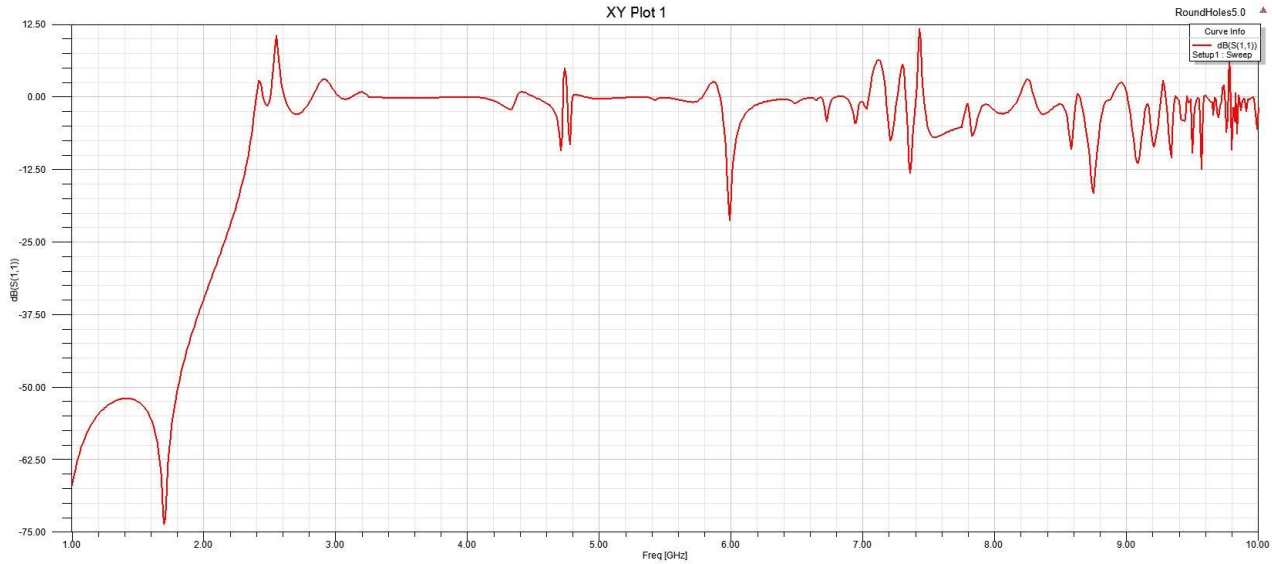


Рис. 4 – S11 модели со сплошной диэлектрической вставкой с проницаемостью 4.36

Из графиков можно также видеть, что необходимо повысить точность исследования моделей, так как алгоритм интерполяции в САПР неидеален и в отсутствии активных элементов в модели появляются превышения передаточных характеристик над нулевым уровнем.

Выводы

В данной работе была исследована модель фотонного кристалла в виде диэлектрической вставки в цилиндрический волновод, имеющей продольные отверстия. Анализ модели средствами САПР Ansys HFSS показал, что наличие отверстий оказывает влияние на пропускание структурой электромагнитного излучения и проявляет свойства полосового фильтра в узкой полосе частот, что предполагает возможное применение подобных структур в цепях СВЧ. Однако в дальнейших исследованиях необходимо повысить точность расчётов для более корректных результатов.

Библиографический список

1. Усанов, Д.А. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, В.О. Горлицкий // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – вып. 2. – С. 65-70.

2. Joannopoulos I. D., Villenneuve Pierre R., Fan S. Photonic crystals: putting a new twist on light // Nature. 1997. Vol. 386, № 13. P. 143–149.

3. Шабанов, В.Ф. Фотонные кристаллы и нанокомпозиты: структурообразование, оптические и диэлектрические свойства / В.Ф. Усанов, В.Я. Зырянов. – М. : СО РАН, - 2009. – 257 с.

V.A. Malakhov, M.S. Markin, A.S. Raevsky

SHIELDED CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH DIELECTRIC INSERT WITH LONGITUDINAL HOLES

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

In this work, we investigated a model of a photonic crystal in the form of a dielectric insert in a cylindrical waveguide having longitudinal holes. Analysis of the model using CAD tools Ansys HFSS showed that the presence of holes affects the transmission of the structure of electromagnetic radiation and shows the properties of a bandpass filter in a narrow frequency band, which suggests the possible use of such structures in microwave circuits.

Keywords: shielded round waveguide, CAD, Ansys HFSS, photonic crystal, bandpass filter, dielectric insert.

УДК 621.396

В.А.Малахов [1], А.А.Никитин [1,2], А.С.Раевский [1]

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА МОЩНОСТИ НЕСОБСТВЕННЫХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНОМ КРУГЛОМ ОТКРЫТОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
[2]Филиал ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седакова", г. Н. Новгород

Рассматривается спектр волн круглого открытого диэлектрического волновода, включая частотные участки соответствующие вытекающим и медленным несобственным волнам. Производится расчет плотности потока мощности для этих волн в 2-х слойном и 4-х слойном открытых диэлектрических волноводах. Выполняется анализ распределения действительной части плотности потока мощности по радиальной координате.

Ключевые слова: комплексные волны; вытекающие волны; медленные несобственные волны, круглый открытый диэлектрический волновод, плотность потока мощности.

Введение

Одной из распространенных направляющих структур СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов волн является круглый открытый диэлектрический волновод. Этот волноводширокоприменяется при построении линий связи и функциональных узлов и особенно удобен для теоретического исследования особенностей открытых направляющих структур. Математическая модель дисперсионных характеристик описывает достаточно точно характеристики круглого открытого диэлектрического волновода из-за возможности точной записи дисперсионных уравнений.

Круглый открытый диэлектрический волновод рассматривался в основном как структура, направляющая поверхностные волны. Поверхностные волны - основной тип волн, на которых осуществляется перенос энергии в круглом открытом диэлектрическом волноводеза счет эффекта полного внутреннего отражения. В последнее время появился интерес к изучению идругих типов волн, свойства которых стимулируют создание различных устройств: антенных облучателей, чувствительных элементов датчиков и др. При этом возникают задачи о расчёте поля излучения. Для расчетанеобходимо учитывать полный спектр волн направляющих структур.

Дисперсионные характеристики круглого многослойногооткрытого диэлектрического волновода

Рассмотрим 4-х слойный КОДВ, рис.1.

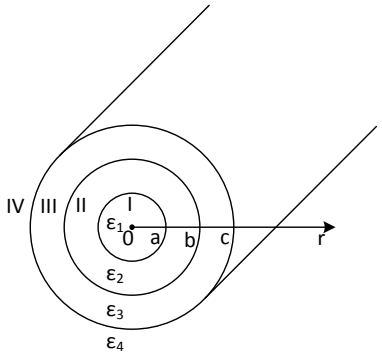


Рис. 1. Круглый открытый диэлектрический волновод

Для рассматриваемой структуры ставится краевая задача на уравнении Гельмгольца:

$$\Delta \Pi_{zk}^{e,m} + \varepsilon\mu w^2 \Pi_{zk}^{e,m} = 0,$$

где $\Pi_{zk}^{e,m}$ – продольные составляющие электрического и магнитного векторов Герца.

Вектора Герца записываются[1,2] в областях в виде

$$\begin{cases} \Pi_{z1}^{e} = A_1 J_n(\alpha_1 r)\cos n\varphi e^{-i\beta z} \\ \Pi_{z1}^{m} = A_2 J_n(\alpha_1 r)\sin n\varphi e^{-i\beta z} \end{cases} \qquad \begin{cases} \Pi_{z4}^{e} = F_1 H_n^{(2)}(\alpha_4 r)\cos n\varphi e^{-i\beta z} \\ \Pi_{z4}^{m} = F_2 H_n^{(2)}(\alpha_4 r)\sin n\varphi e^{-i\beta z} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Pi_{z2,3}^{e} = (B_{1,2} J_n(\alpha_{2,3} r) + C_{1,2} Y_n(\alpha_{2,3} r))\cos n\varphi e^{-i\beta z} \\ \Pi_{z2,3}^{m} = (D_{1,2} J_n(\alpha_{2,3} r) + E_{1,2} Y_n(\alpha_{2,3} r))\sin n\varphi e^{-i\beta z} \end{cases}$$

где $J_n(\alpha_k r)$ - функция Бесселя, $Y_n(\alpha_k r)$ - функция Неймана, $H_n^{(2)}(\alpha_k r)$ - функция Ханкеля второго рода, k-номер области.

Волновые числа в областях связаны соотношениями

$$\alpha_k^2 = \varepsilon_k \mu_k w^2 - \beta^2, \qquad (1)$$

На границах раздела сред (при r = a,b,c)выполняются условия непрерывности тангенциальных составляющих векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$:

$$H_z^{(k)} = H_z^{(k+1)},\ H_\varphi^{(k)} = H_\varphi^{(k+1)},\ E_z^{(k)} = E_z^{(k+1)},\ E_\varphi^{(k)} = E_\varphi^{(k+1)},\ . \qquad (2)$$

Из граничных условий (2) получается система четырёх линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов. Условие нетривиальности её решения (равенство нулю главного определителя) даёт дисперсионное уравнение волн круглого открытого диэлектрического волновода.

Дисперсионное уравнение решается совместно с уравнениями (1), связывающими волновые числа.

На рис. 2приведены дисперсионные характеристики и характеристики затухания гибридных волн 4-х слойного круглого открытого диэлектрического волновода ($\varepsilon_1 = 2.1904$, $\varepsilon_2 = 2.1, \varepsilon_3 = 2.1025, \varepsilon_4 = 1$,$r_1$=4 мкм, r_2=4,5 мкм, r_3=62,5 мкм). По горизонтальной оси отложен параметр- нормированная частота $V = k_0 c\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_4}$, по вертикальной - нормированные действительная и мнимая части продольного волнового числа $\beta=\beta_1+i\beta_2$.

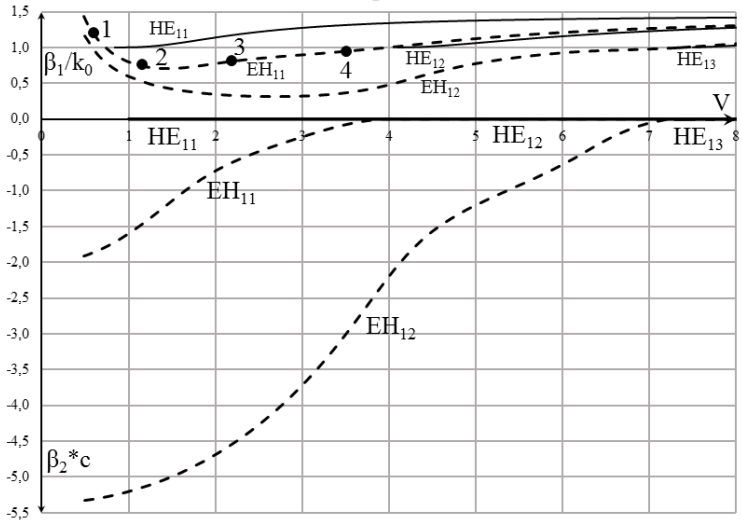


Рис.2.Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волн волновода

На рис.2 дисперсионные зависимости выше критической частоты(*постоянная замедления волны* $\beta_1/k_0 = 1$) соответствуют поверхностным волнам. Поверхностные волны переходят в вытекающие волны[3] (волны излучения) на критических частотах. При уменьшении частоты вытекающие волны обычно переходят в медленные несобственные волны [1,2]. Возможно существование собственных комплексных волн на дисперсионных характеристиках волн EH_{nm}. При условии малых*n*это имеет место при достаточно больших отношениях диэлектрических проницаемостей слоев оболочки и внешней среды, в случае больших *n*- при меньших значениях диэлектрических проницаемостей слоев. Собственные комплексные волны при уменьшении частоты переходят в вытекающие, а затем в медленные несобственные волны[1-3].

У собственных комплексных и поверхностных волн поле убывает при удалении от открытого диэлектрического волновода. У медленных несобственных и вытекающих волн поле нарастает при удалении от открытого диэлектрического волновода.

Распределение плотностей потоков мощности волн излучения в круглом открытом диэлектрическом волноводе

Для нахождения распределения плотности потока мощности волн необходимо определить амплитудные коэффициенты. Поскольку граничные условия при $r=a,b,c$ приводят к системе линейных однородных алгебраических уравнений, достаточно задать один из этих коэффициентов равным единице. Потом понизив порядок системы, вычислить остальные амплитудные коэффициенты. Дальше рассчитываем вектор плотности потока мощности(вектор Умова-Пойнтинга) по известным компонентам электромагнитного поля. При исследовании волн излучения наиболее информативной является радиальная компонента вектора Умова-Пойнтинга.

$$P_{rk} = \left[E_k \times H_k\right]$$

$$\tilde{P}_k = \frac{P_{rk}}{\left|\max(P_{rk})\right|},$$

где $|\max(P_{rk})|$ - максимальное значение модуля радиальной компоненты вектора Умова-Пойнтинга на расчетном интервале, $\tilde{P}$ - нормированная плотность потока мощности излучения по радиальной координате, k-номер области.

На рис.3-6 приведены распределения нормированной на максимальное значение действительной части плотности потока мощности излучения по радиальной координате для 4-хслойногокруглого открытого диэлектрического волновода($\varepsilon_1 = 2.1904$, $\varepsilon_2 = 2.1$, $\varepsilon_3 = 2.1025$, $\varepsilon_4 = 1$,r_1=4 мкм, r_2=4,5 мкм, r_3=62,5 мкм) и 2-х слойного ($\varepsilon_1 = 2.1904$, $\varepsilon_2 = 1$, r_1=62,5 мкм)в разных частотных точках дисперсионной характеристики волны EH_{11}, помеченных на рис. 2 цифрами *1-4*.

На рис. 3 показано распределение нормированной действительной части плотности потока мощности излучения по радиальной координате волны EH_{11}на частоте V=0.55 (точка 1, рис. 2). Волна является медленной несобственной [2,3].

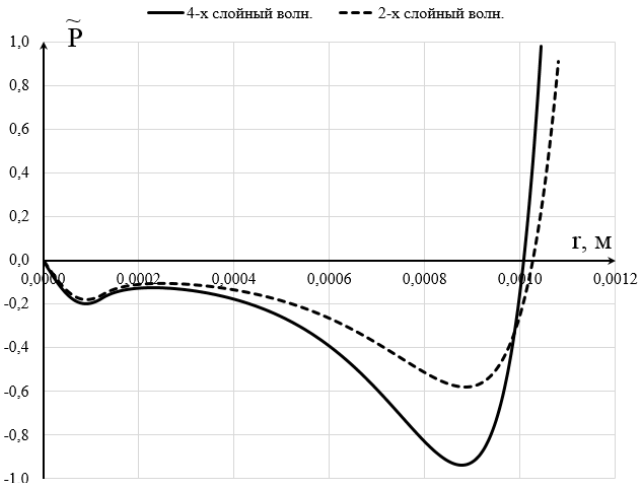


Рис.3.Распределениенормированной плотности потока мощности излучения по радиальной координате для волны EH11 на частоте V=0.55

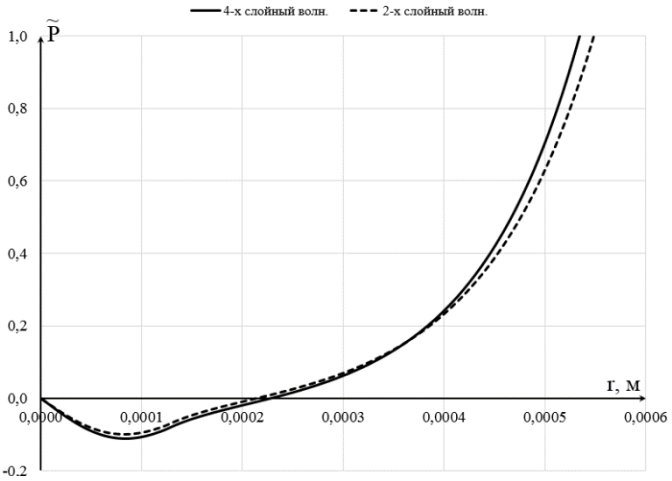


Рис. 4. Распределение нормированной плотности потока мощности излучения по радиальной координате для волны EH11 на частоте V=1.3

На рис. 4 показано распределение нормированной действительной части плотности потока мощности излучения по радиальной координате для волны EH_{11}на частоте V=1.3 (точка 2, рис. 2). Волна является вытекающей [2]. Качественно распределение исследуемой величины такое же, как и у медленной несобственной волны.

На рис. 5,6 приведены распределения нормированной действительной части плотности потока мощности излучения по радиальной координате волны EH_{11}на частотах V=2.1 иV=3.3 (точки3 и 4, соответственно, рис. 2). В данных точках дисперсионной характеристики, волна является вытекающей [4].При удалении от круглого открытого диэлектрического волновода действительная часть плотности потока мощности излучения монотонно увеличивается по радиальной координате, являясь везде положительной величиной.

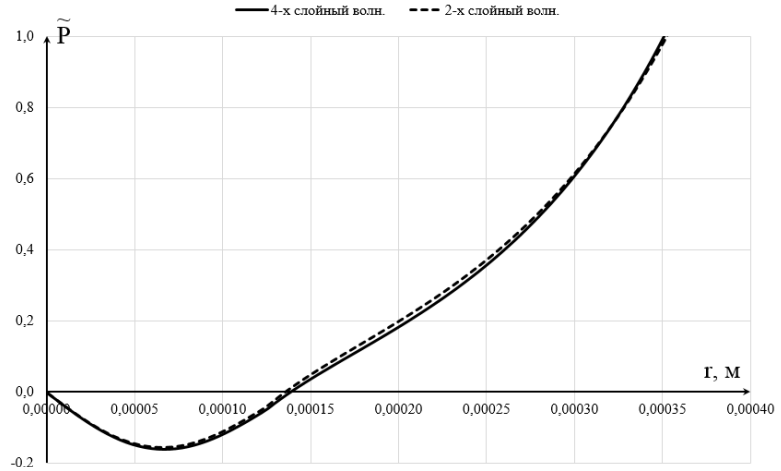


Рис. 5.Распределение нормированной плотности потока мощности излучения по радиальной координате для волны EH11 на частоте V=2.1

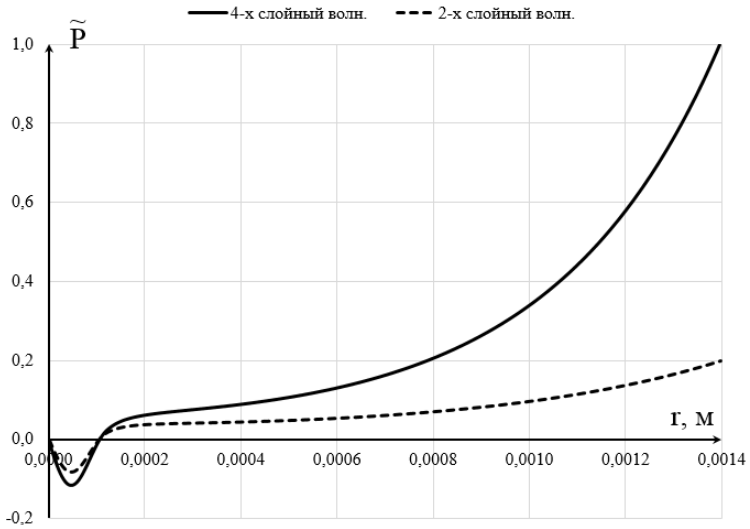


Рис.6. Распределение нормированной плотности потока мощности излучения по радиальной координате для волны EH11 на частоте V=3.5

Из приведенных графиков видно, что по мере уменьшения нормированной частоты от V = 3,5 до V = 0,55 расстояние от круглого открытого диэлектрического волновода на котором мощность становится сравнимой с мощностью в волноводе уменьшается. Так же видно, что по мере увеличение частоты мощность аккумулируется в близи волновода. На графиках видно хорошее совпадение результатов 4-х слойного и 2-х слойного волноводов. Различие плотности потока мощности излучения обусловлено отличием $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ в 2-х слойном и $\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}$ в 4-х слойном круглом открытом диэлектрическом волноводе. Также возможно отличие обусловлено переходами медленной несобственной волны в вытекающую волну (рис. 3) и вытекающей волны в поверхностную волну (рис. 6).

Выводы

В проводившиеся ранее исследования [5]было показано, что продолжения дисперсионных характеристик поверхностных волн круглого открытого диэлектрического волновода на частотах ниже критических в виде вытекающих характерны для симметричных E_{0m}, H_{0m} и гибридных EH_{nm} волн.

Проведённое в настоящей работе исследование распределений нормированной действительной части плотности потока мощности излучения по радиальной координате волн круглого открытого диэлектрического волноводана частотах ниже критических показало, что у волны EH_{11}в зависимости от частотыисследуемая функция имеет различный характер.Наряду с характерным для волн излучения (вытекающих и медленных несобственных) нарастанием при удалении от волновода могут наблюдаться отрицательные (плотность потока мощности направлена к оси волновода) значения, объясняемые, по-видимому, характерным для волн EH_{nm}распределённым разворотом плотности потока мощности.

В связи результатами наиболее эффективно в качестве антенн поперечного излучения (антенн вытекающих волн) использовать отрезки 4-х слойного круглого открытого диэлектрического волновода либо на симметричных вытекающих волнах во всём диапазоне их существования, либо на вытекающей волне EH_{11}на участке, где она имеет нормальную дисперсию.

Библиографический список

1. Раевский А.С., Раевский С.Б. Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами – М.: Радиотехника, 2004.112с.
2. Раевский А.С., Раевский С.Б.Комплексные волны – М.: Радиотехника, – 2010. 224 с.
3. Шевченко В.В. Наглядная классификация волн, направляемых регулярными волноводами // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 12. № 10. С. 1768-1773.
4. Гетманцева Т.Н., Раевский С.Б. О комплексных волнах в круглом диэлектрическом волноводе //Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 9. С. 1332-1337.
5. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металло-диэлектрические волноводы. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.

V.A Malakhov.[1], A.A.Nikitin[1,2], A.S.Raevskii[1]

DISTRIBUTIONS OF THE POWER FLUX OF IMPROPER WAVES DENSITIES IN A MULTILAYER CIRCULAR OPEN DIELECTRIC WAVEGUIDE

[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
[2] Branch FSUE RFNC VNIIEF «NIIIS named after Yu.Ye.Sedakov»

The spectrum of the waves of a circular open dielectric waveguide, including the frequency sections corresponding to leaky waves and slow improper waves, is considered. The power flux density for these waves is calculated in two layer and four layer open dielectric waveguides. An analysis is made of the distribution of the real part of the power flux-density along the radial coordinate.

Key words: complex wave; leaky waves; improper slow waves, circular open dielectric waveguide, the power flux density.

УДК 621.396

В.А. Малахов[1], А.С. Нечаев[2]

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ДИОДНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ 40-60 ГГЦ

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
[2]Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Цель работы: Рассматривается методика автоматизированного проектирования и расчета характеристик широкополосного диодного утроителя частоты 40-60 ГГц Оценивается влияние параметров цепей автосмещения и диодов на характеристики устройства.

Методология: Данная методика расчёта на базе программных продуктов компании ANSYS (HFSS и Designer) объединяет электродинамический анализ волноведущей части и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами.

Результаты: Рассчитанная выходная характеристика утроителя частоты согласуется с экспериментальными данными. Определены возможности совершенствования технических характеристик. Представлен анализ динамического диапазона утроителя.

***Ключевые слова*:** утроитель частоты, автоматизированное проектирование, диодный умножитель, ANSYS HFSS, ANSYS Designer.

Введение

Программные комплексы точного моделирования трёхмерных структур – это новый, активно используемый в настоящее время подход, который становится основным инструментом автоматизированного проектирования, существенно ускоряя разработку новых устройств. Но до сих пор одной из основных проблем, возникающих при проектировании СВЧ-устройств, построенных на нелинейных элементах, является отсутствие эффективных методик автоматизированного расчета на базе САПР, которые бы объединяли в себе электродинамические методы анализа волноведущих структур и расчет характеристик цепей с нелинейными полупроводниковыми элементами.

Несмотря на большое количество различных методов (как аналитических, так и машинных) анализа нелинейных СВЧ-устройств, задача их проектирования достаточно сложна, трудоёмка и обычно решается итерационно. Кроме этого важную роль в таком проектировании играют длительные и дорогостоящие экспериментальные исследования.

В данной работе применена предложенная ранее [1-2] методика проектирования с использованием программных продуктов компании ANSYS (HFSS и Designer) для расчета характеристик ранее экспериментально разработанного и серийно выпускаемого широкополосного волноводного диодного утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц. Предложенная методика проектирования состоит из двух этапов, объединяющих электродинамический анализ волноведущей части утроителя частоты и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами (диодами).

Первый этап состоит в том, что в системе автоматизированного проектирования ANSYS HFSS создается модель утроителя частоты без нелинейных элементов. После этого производится расчет *S*-параметров модели путём решения электродинамической задачи с пространственным распределением полей (расчёт методом конечных элементов).

Второй этап – подключение рассчитанной ранее модели утроителя в качестве многополюсника в САПР ANSYS Designer, подключение диодов, цепей их автосмещения и расчет выходных характеристик (уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала на выходе) утроителя частоты с помощью нелинейного анализа (расчёт методом гармонического баланса).

Схемно-конструктивные особенности утроителя частоты

Схематически утроитель частоты – это широкополосный тракт с парой антипараллельно включенных диодов. Диоды включены через резистивно-емкостные цепи для балансировки утроителя и достижения минимальных потерь преобразования в требуемом диапазоне входных частот путём реализации оптимального автосмещения диодов при максимальном уровне мощности входного сигнала 100 мВт (20 дБм) [3-4].

Конструктивно утроитель частоты выполнен в виде последовательно соединенных входной микрополосковой линии (МПЛ), щелевого резонатора, выходной МПЛ и прямоугольного металлического волновода размерами 3,775 × 2,388 мм (рис.1). Волновод является запредельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала.

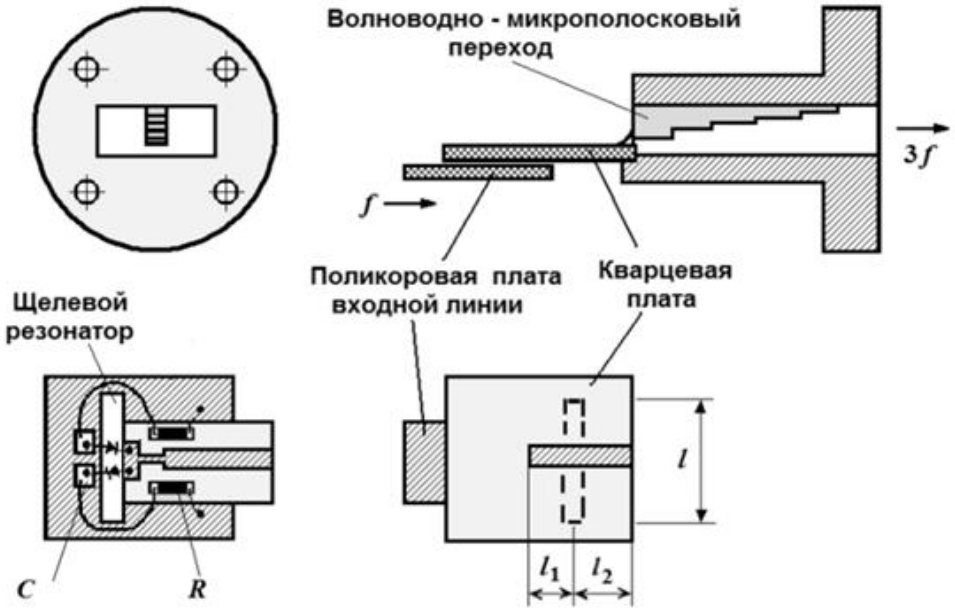


Рис. 1. Конструкция утроителя частоты 40-60 ГГц

Основой всей конструкции являются две платы, скрепленные экранами. На входной поликоровой плате расположена входная микрополосковая линия, а на другой, кварцевой – щелевой резонатор. Умножительные диоды, пересекая резонатор по центру, подключены разнополярно к входной МПЛ и противоположной стороне щелевого резонатора. Входная МПЛ на конце (в точке подключения диодов) имеет низкое волновое сопротивление, образуя шунтирующий конденсатор для замыкания тока третьей гармоники. С обратной стороны платы щелевой резонатор пересекает (перпендикулярно) выходная МПЛ, которая соединена с волноводным трактом с помощью П-образного волноводно-микрополоскового перехода Чебышевского типа.

Входной сигнал поступает через коаксиально-полосковый переход и входную МПЛ, содержащую согласующий фильтр нижних частот, на умножительные диоды, которые осуществляют симметричное ограничение амплитуды и генерируют нечетные гармоники входного сигнала. Расположенный над щелевым резонатором отрезок линии, образованный выводами диодов, возбуждает в нем волну напряжения. Длина резонатора l выбирается равной половине длины волны на третьей гармонике. Выходной сигнал снимается с резонатора с помощью разомкнутого шлейфа длиной l_1, равной приблизительно четверти длины волны третьей гармоники, и через отрезок МПЛ длиной l_2 и волноводно-микрополосковый переход поступает на выход.

Проектирование и расчет характеристик

Первый этап анализа – создание адекватной модели. В САПР ANSYS HFSS была создана 3D модель, соответствующая ранее экспериментально разработанной конструкции утроителя частоты (рис. 2). На входе всей системы установлен сосредоточенный порт 1, в месте расположения диодов, на противоположной стенке входной платы, установлен порт 2, на выходе волновода установлен сосредоточенный порт 3.

После согласования входного и выходного трактов произведен расчёт *S*-параметров модели утроителя.

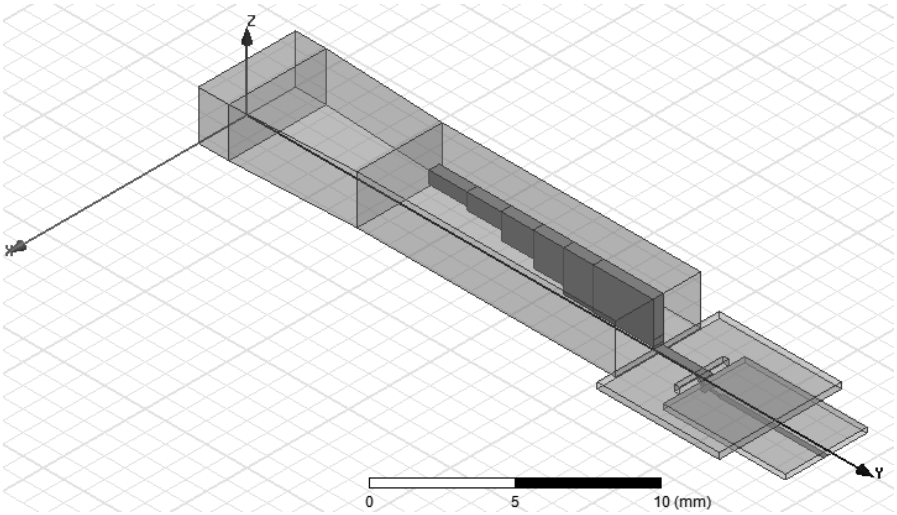


Рис. 2. Модель утроителя частоты в ANSYS HFSS

На втором этапе анализа модель утроителя частоты, созданная и проанализированная в ANSYS HFSS, была подключена к построенной в ANSYS Designer схеме умножителя частоты в виде многополюсника с известной матрицей рассеяния. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer (рис. 3) включает нелинейные элементы – полупроводниковые диоды, резистивно-емкостные цепи для реализации автосмещения диодов и порты входа и выхода.

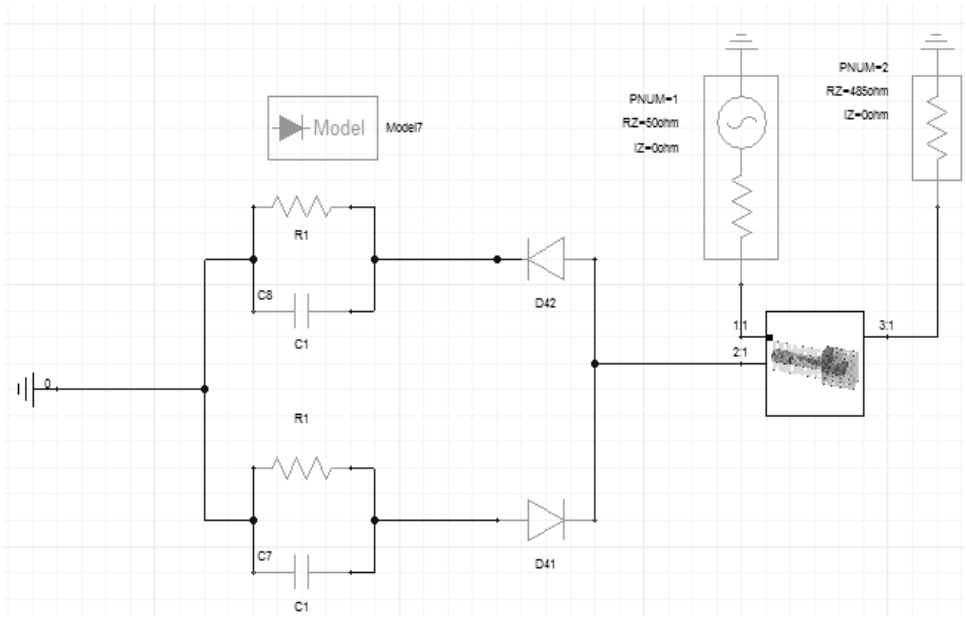


Рис. 3. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer

В свойствах входного порта 1 был задан источник гармонического сигнала и на вход подавался сигнал в диапазоне частот 13-20 ГГц мощностью 100 мВт (20 дБм). Расчет характеристик утроителя частоты заключается в анализе уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала в порте 3 (выходной порт). Рабочие выходные характеристики – уровни мощности третьей гармоники входного сигнала.

Порты 1 и 3 согласованы с импедансами волноводов на анализируемых частотах. Параметры используемых диодов: емкость *p-n* перехода C_0 = 0,1 пФ и сопротивление прямого перехода R_s = 1 Ом. В схеме ANSYS Designer использовалась модель диодов DIODE_Level7 (Enhanced SPICE Diode). Номиналы элементов цепей автосмещения диодов: *C*1 = 10 пФ, *R*1 = 155 Ом.

Результат анализа – зависимость уровня мощности третьей гармоники от частоты сигнала на входе, полученная в результате моделирования, в сравнении с экспериментально измеренными ранее значениями мощности на выходе утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц производства ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова (рис. 4). Уровень мощности третьей гармоники лежит в диапазоне 1-7 дБм. Потери преобразования находятся, в среднем, на уровне 16 дБ.

Кроме рабочей третьей гармоники входного сигнала, в утроителе частоты генерируются и другие нечётные гармоники. Уровень мощности паразитной пятой гармоники подавлен относительно уровня третьей, в среднем, на 20 дБ.

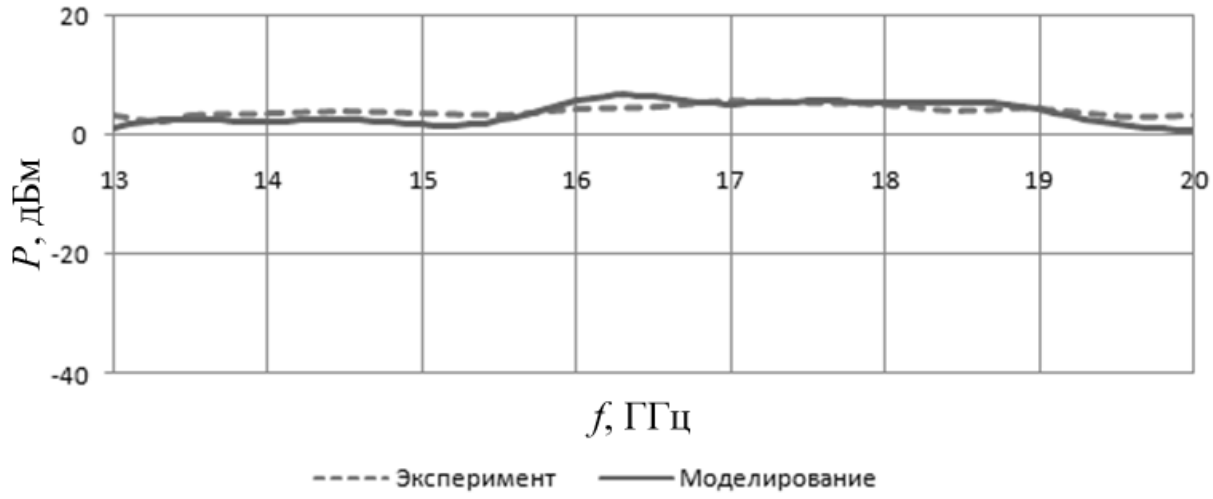


Рис. 4. Уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя

Исследование влияния параметров утроителя частоты на его характеристики

Важный этап в проектировании утроителя частоты – выбор оптимальных номиналов элементов цепей автосмещения диодов (сопротивления *R*1 и емкости *C*1). Расчёт показал, что уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя практически не зависит от изменения емкости С1.

При увеличении сопротивления *R*1 с 50 Ом до 1 кОм уровень мощности третьей гармоники увеличивается до максимального значения 8 дБм, при дальнейшем увеличении практически не изменяясь (рис. 5). Таким образом, путем изменения сопротивления *R*1 возможно увеличение уровня мощности третьей гармоники приблизительно на 1,7 дБ по сравнению с ранее рассчитанным.

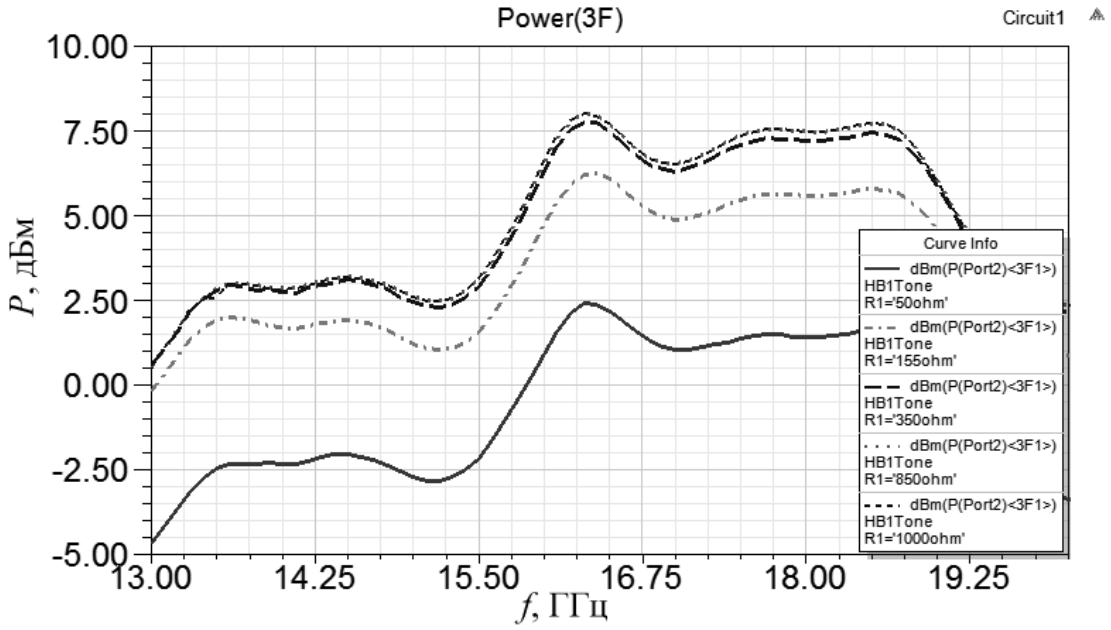


Рис. 5. Зависимость мощности третьей гармоники на выходе от сопротивления *R*1

При идентичных параметрах диодов четные гармоники в утроителе частоты не генерируются. Однако, на практике всегда имеет место разброс параметров диодов (даже подобранных в пары по ВАХ и ВФХ). Анализ результатов показал, что при минимально достижимой на практике неидентичности параметров C_0 (барьерная емкость перехода) и R_s (сопротивление прямого перехода) в 10% вторая и четвертая гармоники подавлены относительно третьей в среднем на 35 дБ. Уровень мощности второй гармоники более критичен к неидентичности диодов по емкости C_0, а четвертой по сопротивлению R_s.

Одной из важных характеристик умножителей частоты является зависимость уровня мощности на выходе утроителя от уровня мощности на входе, т.е. динамический диапазон входных сигналов (рис. 6). В диапазоне входных мощностей от 0 до 7 дБм зависимость $P_{вых}$ от $P_{вх}$ близка к линейной. С увеличением $P_{вх}$ линейная зависимость нарушается.

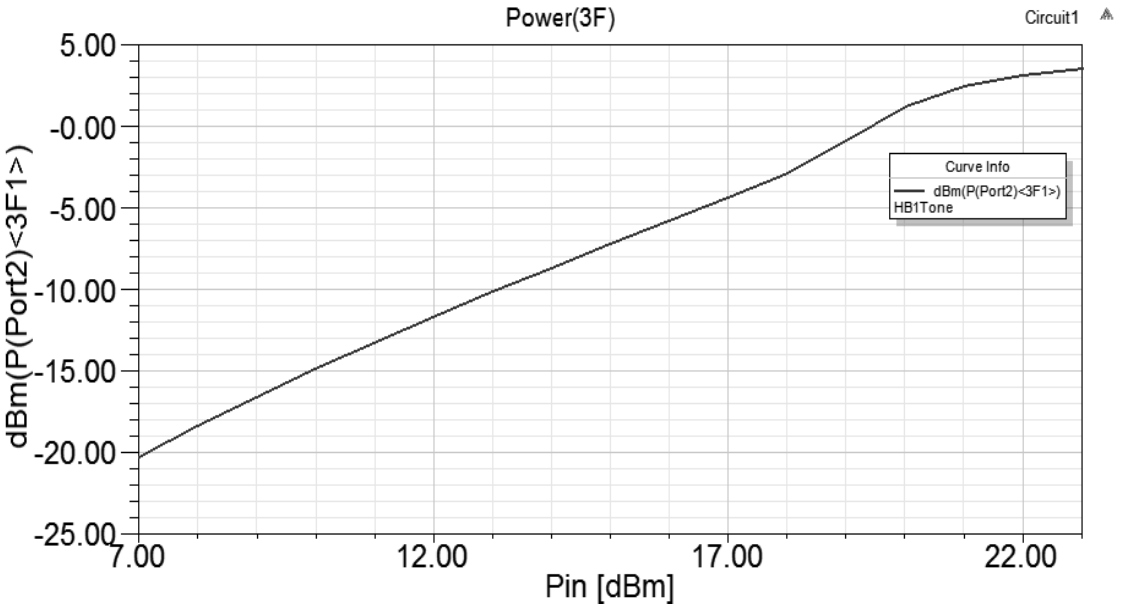


Рис. 6. Динамический диапазон утроителя частоты

Выводы

Для моделирования и анализа выходных характеристик ранее экспериментально разработанного и серийно выпускаемого волноводного диодного утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц была применена методика проектирования и расчета на базе систем автоматизированного проектирования компании ANSYS.

Результаты анализа мощности третьей гармоники входного сигнала на выходе утроителя частоты согласуются со значениями мощности, полученными в результате экспериментального исследования утроителя частоты 40-60 ГГц производства ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова. Это означает, что предложенная методика проектирования и расчета характеристик может быть применена в дальнейших исследованиях нелинейных СВЧ-устройств. Данная методика позволяет проводить оптимизацию различных схемно-конструктивных элементов утроителя, как волноведущих трактов, так и параметров нелинейных элементов (диодов) и позволяет определить потенциальные возможности совершенствования технических характеристик без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований.

В ходе проведённых расчётов были определены возможности совершенствования технических характеристик (увеличение эффективности преобразования и уменьшение уровня паразитных гармоник) утроителя частоты. Анализ характеристик показал, что увеличение мощности третьей гармоники на выходе утроителя возможно осуществить путём изменения параметров используемых цепей автосмещения диодов (увеличение номинала сопротивления $R1$).

Произведён анализ уровня мощности чётных гармоник на выходе при различной степени неидентичности параметров диодов. В широкополосном утроителе частоты 40-60 ГГц вторая и четвертая гармоники не могут быть отфильтрованы, поскольку находятся в рабочем диапазоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки.

Кроме этого, рассчитан динамический диапазон входных сигналов утроителя частоты, установлены границы его линейного участка. Следует заметить, что большой динамический диапазон (не менее 30 дБ) изменения уровня выходной мощности утроителя частоты с однозначной зависимостью $P_{вых}$ от $P_{вх}$ позволяет осуществлять регулировку уровня выходной мощности с помощью изменения входной. Это обстоятельство существенно упрощает построение широкополосных источников сигналов на умножителях частоты с регулируемым и стабилизированным уровнем выходной мощности.

Библиографический список

1. Березин, В.В. Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов, С.В. Оболенский // Информационные системы и технологии (ИСТ-2015): материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 2015. – С. 62–63.

2. Щитов, А.М. Автоматизированный расчет широкополосных волноводных диодных утроителей частоты в диапазонах 75-110 ГГц и 110-170 ГГц / А.М. Щитов, В.В. Березин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо’2015): материалы 25-й Междунар. Крымской конф.: в 2 т. – Севастополь, 2015 – Т. 1. – С. 75–76.

3. Щитов, А.М. Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5-110 ГГц) / А.М. Щитов, А.Е. Серебряков // Вестник ВВО АТН РФ, серия Высокие технологии в радиоэлектронике. – 1997. – №1(3). – С. 91-96.

4. Щитов, А.М. Расчет и проектирование балансного утроителя частоты на ДБШ в миллиметровом диапазоне // Специальная радиоизмерительная техника, НТС, «Кварц», Нижний Новгород, 1996. – С. 24–32.

V.A. Malakhov, A.S. Nechaev

COMPUTER-AIDED DESIGN AND RESEARCH OF THE CIRCUIT PARAMETERS INFLUENCE OF THE DIODE 40-60 GHZ FREQUENCY TRIPLER

Purpose: The computer aided design and characteristics calculation strategy of the broadband diode 40-60 GHz frequency tripler. The influence of a self-bias circuit and diode parameters on device characteristics is evaluated.
Methodology: This calculation strategy based on software from ANSYS (HFSS and Designer) and combines the electrodynamic analysis of a waveguide part and the calculation of circuits with nonlinear elements characteristics.
Findings: As a result, the calculated output characteristic of the frequency tripler is consistent with experimental data. The possibilities of the technical characteristics improvement are identified. The tripler dynamic range analysis is represented.
***Key words*:** frequency tripler, computer-aided design, diode multiplier, ANSYS HFSS, ANSYS Designer.

УДК 666.762.11

К.В. Муравьева, Л.И. Прокофьев, Р.В. Соколовская

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В работе рассмотрены результаты по исследованию и совершенствованию технологии изготовления вакуумплотной керамики. Разработан и внедрен в производство новый состав корундового керамического материала для применения в элементах антенн и других узлах сверхвысокочастотного диапазона. Свойства материала обеспечили возможность конструктивного совмещения антенны с электронным блоком, исключив разъемные соединения между ними и существенно снизив габариты и массу аппаратуры. Технология изготовления нового материала позволила изготавливать элементы сверхвысокочастотных антенн со стабильно высокими диэлектрическими параметрами при минимальном разбросе показателей, с высокой вакуумной плотностью и прочностью.

Ключевые слова: корундовая керамика; эвтектическая добавка; процесс спекания и обжига; электрофизические параметры; вакуумплотный материал; микрополосковые антенны.

В настоящее время с развитием спутниковых радионавигационных систем происходит развитие бортовой аппаратуры спутниковой навигации. К данным приборам предъявляются жесткие требования по стойкости и прочности к воздействиям внешних факторов, а также к массогабаритным характеристикам при постоянном наращивании функциональных возможностей, как самой бортовой аппаратуры, так и ее компонентов. Актуальность при разработке бортовой аппаратуры приобретает задача миниатюризации излучающих и принимающих антенн. Кроме того, для отечественных разработчиков и изготовителей в рамках импорт замещения - все элементы вновь разрабатываемых антенн должны быть выполнены из отечественных материалов. Данная задача была поставлена в«НИИИС им. Седакова» и успешно решена в рамках НИОКР, в результате были разработаны и изготовлены микрополосковые антенны (МПА), работающие в диапазонах частот L1, L2 ГЛОНАСС (рис. 1).

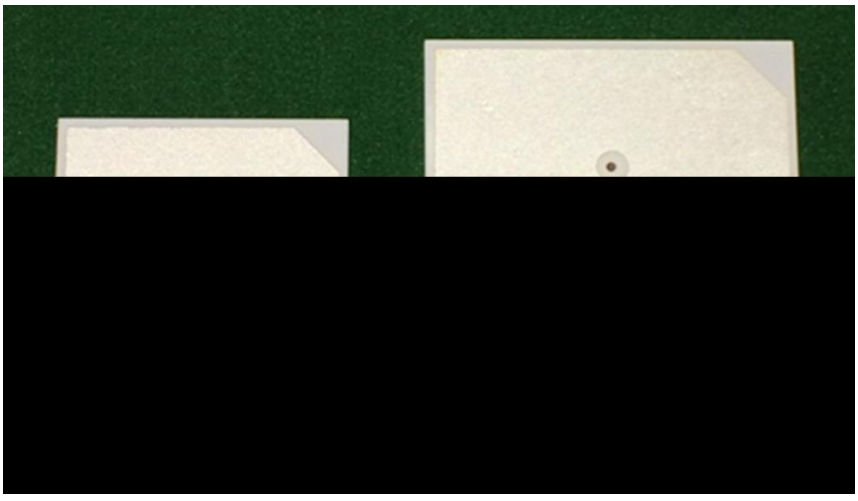


Рис. 1 Внешний вид излучателей сверхвысокочастотных антенн

Выбор материала несущей конструкции излучателя МПА был проведен с учетом следующих требований: высокая диэлектрическая проницаемость ε и малые потери на СВЧ (тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$); стабильность ε и $tg\delta$ в широком диапазоне частот; материал отечественного производства; хорошая адгезия с металлизированным слоем излучателя; достаточная механическая прочность; возможность механической обработки (доработки); высокая температура эксплуатации; наличие на предприятии технологического задела получения материала. Этим требованиям удовлетворяют керамические материалы на основе корундовой керамики.

Корундовая керамика обладает сочетанием целевых свойств - высокой плотностью, мелкокристаллической структурой, прочностью, прекрасными электроизоляционными свойствами, высокой твердостью и износостойкостью [1, 2].Эффективность и функциональность современной аппаратуры спутниковой навигации в значительной степени зависят от стабильности свойств и экономической доступности используемых для этих целей материалов, а также их поведения в процессе эксплуатации.

Достижения последних лет в области технологии убедительно показали, что возможности создания новых керамических материалов далеко не исчерпаны[3, 4].

К наиболее важным характеристикам качества изделий относятся минимальный разброс показателей их свойств и стабильность свойств в течение срока службы. Существенными недостатками изготовления вакуумплотных изделий из корундовой керамики по существующей технологии является высокая температура обжига (1600-1800) °С в среде водорода или вакууме [5].Поэтому целесообразна замена данного материала на керамический вакуумплотный материал с аналогичными свойствами с пониженной температурой спекания (1550 ^{o}С) в воздушной среде.

В данной работе рассмотрен вопрос совершенствования ранее разработанной на предприятии технологии изготовления вакуумплотной керамики с пониженной температурой обжига 1550 °С на воздухе. Несмотря на очевидные преимущества данной технологии, основным недостатком ее являлось отсутствие стабильности керамики по диэлектрическим параметрам от партии к партии.

По данной технологии керамика изготавливалась путем мокрого измельчения и перемешивания, отдельно взятых компонентов глинозема ГН и нерастворимых оксидов MgO и TiO_2в форме рутила. При введении добавки в виде отдельных компонентов MgO и TiO_2 даже при длительном перемешивании происходило неравномерное распределение компонентов в объеме глинозема. Это являлось главной причиной нестабильности свойств керамики.

Для экспериментальной работы нами было использовано сырье глинозема марки ГН предварительно прокаленное при температуре 1100°С и измельченное в водной среде до удельной поверхности 7200 см^2/г с размером частиц от 1 до 3 мкм.

В качестве исходных компонентовдля разработки и изготовления эвтектической добавки были использованы порошки углекислого магния $MgCO_3$и оксидаTiO_2 в форме анатаза, которые предварительно измельчались и смешивались в водной среде в течение 1 ч. Полученная добавка подвергалась термообработке на воздухе. Введение разработанного состава эвтектической добавки в количестве 3% в 97% глинозема ГН при мокром измельчении и перемешивании, позволило проводить процесс спекания и обжига керамических заготовок в воздушной среде при пониженной температуре спекания.

Для спекания и обжига заготовок из вакуумплотной керамики на воздухе использовался режим, графически представленный на рис. 2.Участок А – период сушки. Участок В – период подъема температуры. Участок С – период выдержки при максимальной

температуре. УчастокD – период охлаждения, который выполнялся вместе с печью. T_m – максимальная температура обжига;t_s– время выдержки при максимальной температуре.

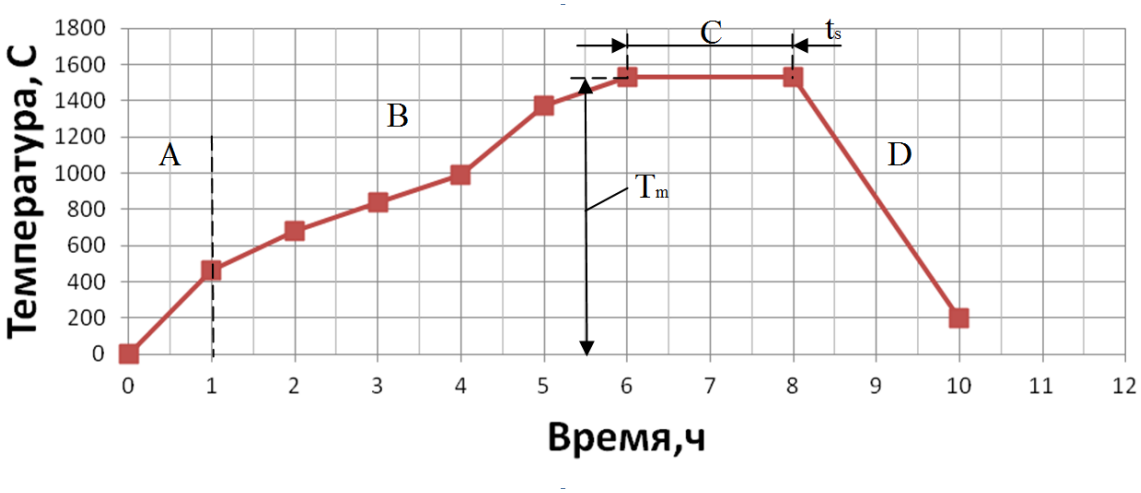


Рис.2. Режим спекания и обжига вакуумплотной керамики

По разработанному маршруту, представленному на рис. 3,был изготовлен состав вакуумплотной керамики и экспериментальная партия заготовок излучателей и образцов свидетелей.

Рис. 3. Блок схема маршрута изготовления вакуумплотной керамики и изделий на ее основе

Образцы-свидетели контролировались по внешнему виду на отсутствие следов красителя, вздутий, включений, пузырей, трещин, и на соответствие электрофизических параметров (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{ср}$, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, предел прочности при статическом изгибе $\delta_{изг}$, водопоглощение W, плотность ρ, пористость П) требованиям технических условий (ТУ) на вакуумплотный материал по действующим на предприятии методикам. Результаты измерений приведены в сводной таблице 1.

Таблица 1

Электрофизические параметры вакуумплотной керамики после обжига

Измеренные значения												
№ парт	**$\varepsilon_{ср}$**		**tgδ**		**$\delta_{изг}$, МПа**		**W, %**		**ρ, г/см^3**		**П, %**	
	ТУ	**Рез-т**	**ТУ**	**Рез-т**	**ТУ**	**Рез-т**	**ТУ**	**Рез-т**	**ТУ**	**Рез-т**	**ТУ**	**Рез-т**
1	**9,5±0,2**	**9,55**	**Не более $6\cdot10^{-4}$**	**$1,0\cdot10^{-4}$**	**Не менее 160**	**198**	**Не более 0,02**	**0,002**	**Не менее 3,6**	**3,7**	**Не более 0,2**	**0,007**
2		**9,42**		**$2,5\cdot10^{-4}$**		**200**		**0,003**		**3,65**		**0,001**
3		**9,52**		**$3,0\cdot10^{-4}$**		**193**		**0,001**		**3,62**		**0,001**

Выводы

Разработанный состав и технология изготовления вакуумплотной керамикигарантируют высокую повторяемость значений относительной диэлектрической проницаемости в пределах 9,5±0,2 материала от партии к партии при стабильно малой величине диэлектрических потерь (tg δ не превышает $6,0\cdot10^{-4}$) при пониженной температуре спекания (не более 1550 ºС по сравнению с 1600-1800 ºС для ВК-94 и его аналогов) в воздушной среде. Вакуумплотная керамика применена при создании малогабаритных приемных антенн аппаратуры спутниковой навигации.Свойства материала обеспечили возможность конструктивного совмещения антенны с электронным блоком, исключив разъемные соединения между ними и существенно снизив габариты и массу аппаратуры.

Библиографический список

1. Непочатов, Ю.К. Автореферат диссертационной работы: Разработка составов и технологии получения корундовой бронекерамики с радиопоглощающим феррит-содержащим покрытием/Ю. К. Непочатов// Томск - 2014. - 22 с.

2. Амелина, О.Д.Разработка бесспековой технологии вакуумплотной керамики группы ВК-100 для нужд электронной техники: дис. канд. техн. наук 05.27.06/ О.Д. Амелина //Москва. - 2016. 191 с.

3. Ротенберг, Б.А. Керамические конденсаторные диэлектрики/ Б.А. Ротенберг// Санкт-Петербург: ОАО НИИ «Гириконд», 2000.-246 с.

4. Бакунов, В.С.Оксидная керамика: спекание и ползучесть/В.С. Бакунов.,А.В. Беляков и др.//–Москва: Издательский центр РХТУ им. Менделеева. 2007.-584 с.

5. Гаршин, А.П. Керамика для машиностроения/А. П. Гаршин,[и др.]//- Москва: «Научтехлитиздат». 2003.- 384с.

K.V. Muravyova, L.IProkofiev, R.VSokolovskaya

RESEARCH AND IMPROVEMENT TECHNOLOGY OF MANUFACTURING A VACUUM-TIGHT CERAMICS

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center - All-RussianScientific Research Institute of Experimental Physics” “Scientific Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye.Sedakov”

This paper presents the results of research and improvementof vacuum-tight ceramics production engineering. The innovative compositionof corundum ceramic material has been designed and implemented into productionto be used in antenna segments and various microwave nodes. Material properties enabled to bond antennasto electronic unitsexcluding terminalinterconnections and considerably reducingequipment dimensions and weight. Innovative material production engineering made it possible to manufacture microwaveantenna components characterized by high vacuum tightness and durability, stably high dielectric parameters with their minimal range.

Keywords: corundum ceramics; eutectic additive; process of sintering and burning; electrophysical parameters; vacuum-tight material; microstrip antennas.

УДК 621.372.413

Ю.Г. Белов, В.А. Малахов, И.А. Нефедьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЛАМИНИРОВАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что для измерения параметров диэлектрических материалов ламинированных пластин без удаления металлической фольги может быть использован метод, основанный на возбуждении в прямоугольной пластине, рассматриваемой как резонатор, электромагнитных колебаний, измерении их резонансных частот и определении относительной диэлектрической проницаемости по результатам измерений. Приведены соответствующие расчетные соотношения, полученные в предположении «магнитных стенок» на торцах пластины. Путем математического моделирования показана обоснованность этого предположения, а также продемонстрирована возможность использования электродинамической модели резонатора с «магнитными стенками» на торцах для расчета добротности резонатора и, соответственно, определения тангенса угла диэлектрических потерь материала пластины по результатам измерения добротности.

Ключевые слова: фольгированная диэлектрическая пластина, резонансная частота, добротность, параметры диэлектрика.

В большинстве известных методов измерения относительной диэлектрической проницаемости ε_r и тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$ диэлектрических пластин [1-3], в том числе в методах, закрепленных в стандарте [4], перед измерением необходимо удалить металлическую фольгу с поверхности пластины. Указанные методы позволяют получить достаточно высокую точность определения параметров диэлектрика, но неудобны при входном контроле фольгированных диэлектрических пластин. Для упрощения процедуры предъявления рекламаций изготовителю ламинатов целесообразно применять «неразрушающий» контроль.

В связи с этим значительный интерес представляет метод [5], в основе которого лежит возбуждение в прямоугольной металлизированной диэлектрической пластине, рис. 1, электромагнитных колебаний, измерении их резонансных частот и вычислении по результатам измерений относительной проницаемости ε_r диэлектрика. Этот метод, называемый методом «целого листа», стандартизирован [6] в США и Канаде как IPC-TM-650-2.5.5.6 и применяется для контроля фольгированных пластин, предназначенных для изготовления микросхем ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. В стандарте отмечено, что не рекомендуется применять этот метод для определения $\mathrm{tg}\delta$ диэлектрика по результатам измерения добротности колебаний ввиду того, что он не учитывает потери на излучение с открытых торцов пластины (предполагается, что эти потери могут быть значительными).

Авторами настоящей статьи был проведен электродинамический анализ математических соотношений, применяемых в данном стандарте для расчета ε_r по результатам измерений. Результаты анализа опубликованы в работе [7], где показано, что в основе этих расчетных соотношений лежит использование на поверхности торцов пластины, рис. 1, граничного условия, соответствующего «магнитной стенке». Действительно, полагая в краевой задаче на уравнении Гельмгольца для области внутри пластины равной нулю тангенциальную составляющую магнитного поля на торцах

$$H_\tau\big|_{S_{\text{торц}}} = 0 \qquad (1)$$

(«магнитная стенка»), а также равной нулю тангенциальную составляющую электрического поля на верхнем и нижнем слоях металлизации

$$E_{\tau}\big|_{S_1,S_2} = 0 \qquad (2)$$

(металл считается идеально проводящим), для резонансной частоты колебаний H_{N0M} в пластине можно получить простую формулу:

$$f_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{\left(N/W\right)^2 + \left(M/L\right)^2}{4\varepsilon_r\varepsilon_0\mu_0}}, \qquad (3)$$

где $N = 1,2,3, \ldots$; $M = 0,1,2,\ldots$; $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ $\frac{\Phi}{\text{м}}$; $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ $\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$; W и L – геометрические размеры пластины, соответственно по координатам *x* и *z*, рис. 1. При условии, что толщина пластины мала ($d << W, L$), следует ожидать, что резонансные колебания, возбуждаемые на сравнительно невысоких частотах, не будут иметь вариаций по координате *y*. Поэтому в резонаторе не будут возбуждаться колебания типа "*E*", у которых компонента электрического поля $E_Z \neq 0$.

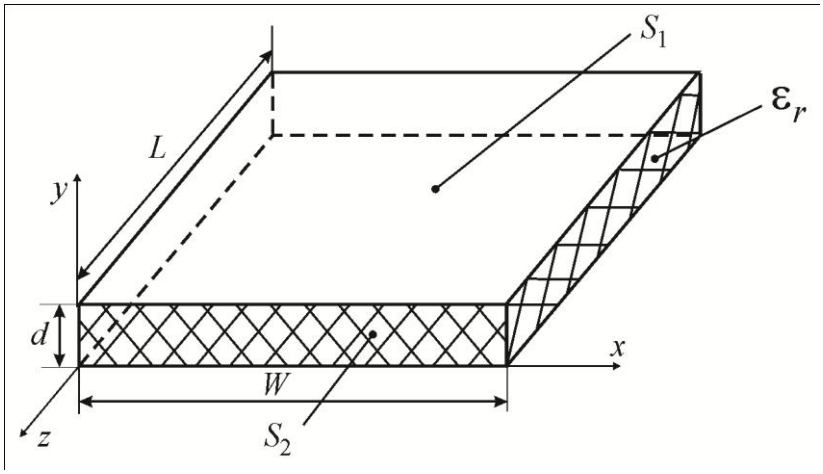


Рис. 1 Металлизированная диэлектрическая пластина

Формула (3) позволяет определить диэлектрическую проницаемость материала пластины ε_r по измеренному значению резонансной частоты колебания $f_{\text{рез}}^{M,N}$. Методика идентификации типа колебания (определение значений индексов *M* и *N*) описана в [7].

Граничное условие, соответствующее «магнитной стенке», находит применение в теории диэлектрических резонаторов. Оно задается на всей или части поверхности резонатора. При высокой диэлектрической проницаемости материала резонатора ε_r когда электромагнитное поле оказывается практически «запертым» в диэлектрике, такое граничное условие позволяет получить хорошие результаты при расчете резонансных частот.

Применение указанного граничного условия означает пренебрежение электромагнитным полем вне диэлектрика за пределами поверхности, на которой такое граничное условие задано. Это в полной мере относится и к решению задачи в работе [5] об электромагнитных колебаниях в фольгированной диэлектрической пластине. Таким образом, формула (3) и аналогичные соотношения в [5] и стандарте IPC-TM-650-2.5.5.6 могут быть использованы в предположении малого поля (поля излучения) за пределами пластины.

У реальных пластин толщина (размер *d*, рис. 1) мала ($d = 1 \div 3$ мм), в то время как размеры *W* и *L* обычно составляют несколько десятков сантиметров. На рабочих частотах, соответствующих ОВЧ- и УВЧ-диапазонам, электрические размеры излучающих апертур (торцов) также малы. Учитывая сказанное, предположение о слабом излучении с торцов

пластины, использованное в стандарте для определения ε_r, представляется естественным, однако при этом вызывает сомнение отмеченное выше замечание в стандарте о том, что потери на излучение с торцов настолько велики, что их необходимо обязательно учитывать при расчете добротности колебаний (с целью определения $\mathrm{tg}\delta$ диэлектрика по измеренным значениям добротности).

Представляет интерес оценить, насколько значительным является поле излучения с торцов реальных фольгированных пластин. Если поле излучения окажется слабым, то это, во-первых, станет обоснованием применения формулы (3) для определения ε_r по измеренным резонансным частотам колебаний и, во-вторых, покажет, что расчет добротности колебаний с достаточной для практики степенью точности можно производить без учета потерь на излучение. Последнее позволит получить сравнительно простые расчетные формулы для определения $\mathrm{tg}\delta$ диэлектрика пластины по измеренным значениям Q.

Строгое исследование колебаний в резонаторе, рис. 1, с учетом излучения со стороны торцов представляет собой сложную электродинамическую задачу, решение которой сопряжено со значительными математическими трудностями. Для оценки поля излучения было проведено математическое моделирование рассматриваемой электродинамической структуры в пакете *ANSYS HFSS*. Следует отметить, что инструменты, заложенные в этом пакете, не позволяют непосредственно решить задачу о свободных колебаниях в резонаторе с излучающими торцами и определить резонансную частоту $f_{\text{рез}}$ и добротность излучения $Q_{\text{изл}}$. Задачу о свободных колебаниях с помощью данного пакета можно решить, если заключить пластину в оболочку конечной толщины, рис. 2. Если на ее внутренней поверхности S задать импедансное граничное условие и принять поверхностный импеданс, равным волновому сопротивлению свободного пространства:

$$Z_S = Z_0 = 120\pi \ \text{Ом}/\square, \qquad (4)$$

то поток вектора Умова-Пойнтинга в эту оболочку будет характеризовать излучение из пластины.

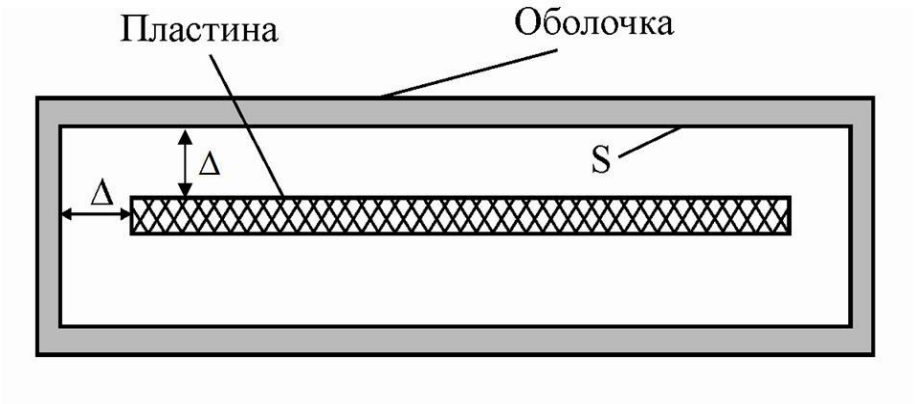


Рис. 2 Металлизированная диэлектрическая пластина в поглощающей оболочке

Необходимо лишь выбрать удаление Δ оболочки от пластины так, чтобы исключить электромагнитное взаимодействие торцов пластины с поверхностью S. При достаточно большом значении Δ вблизи нее электромагнитное поле будет близко к плоской волне, что соответствует граничному условию (4).

Собственная добротность Q_0 резонатора, рис. 2, определяется формулой

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_{\text{М}}} + \frac{1}{Q_{\text{Д}}} + \frac{1}{Q'}, \qquad (5)$$

где $Q_{\text{М}}$ и $Q_{\text{Д}}$ – значения добротности, обусловленные потерями, соответственно, в металле и диэлектрике фольгированной пластины. Слагаемое $1/Q'$ обусловлено потоком вектора Умова-Пойнтинга через поверхность *S* в оболочку, рис. 2. В соответствии с приведенными рассуждениями, при достаточном удалении Δ оболочки от пластины это слагаемое будет характеризовать излучение из торцов пластины, т.е. $Q' \approx Q_{изл}$. Чтобы в процессе математического моделирования непосредственно определять величину $Q_{изл}$, в формуле (5) должны быть равны нулю первые два слагаемых. С этой целью при проведении численных исследований необходимо принять, что у пластины диэлектрик без потерь ($\text{tg}\delta = 0$), а металл – идеально проводящий ($\sigma = \infty$).

Математическое моделирование с помощью пакета *ANSYS HFSS* производилось для фольгированной пластины с размерами $L \times W = 230 \times 90$ мм^2 и толщиной 1,27 мм. Диэлектрическая проницаемость материала пластины была принята равной $\varepsilon_r = 10{,}4$, что соответствует [3] материалу *AD*1000 компании «*Arlon*».

Как показывает расчет по формуле (3), у пластины с такими размерами первые по порядку следования резонансных частот колебания имеют индексы *M* = 1; *N* = 0 и *M* = 2; *N* = 0. Для этих колебаний значения резонансных частот, рассчитанные по формуле (3), соответственно, равны 0,2022 ГГц и 0,4041 ГГц.

Результаты расчета в программе *ANSYS HFSS* для этих колебаний представлены в таблице 1. В процессе численных исследований изменялось расстояние Δ от пластины до оболочки *S*, рис. 2. Кроме вычисления величин собственной добротности и резонансной частоты колебаний контролировалось распределение амплитуды электрического поля в полости, ограниченной *S*.

Таблица 1 – Значения резонансных частот и добротности колебаний фольгированной пластины, заключенной в оболочку *S*

Δ, мм	Колебание *M* = 1, *N* = 0		Колебание *M* = 2, *N* = 0	
	$f_{\text{рез}}$, ГГц	Q_0	$f_{\text{рез}}$, ГГц	Q_0
0	**0,2021**	**5170**	**0,4042**	**10320**
0,5	**0,2030**	**5230**	**0,4059**	**10330**
1,0	**0,2033**	**4990**	**0,4065**	**9120**
2,0	**0,2036**	**4360**	**0,4070**	**6400**
3,0	**0,2038**	**3850**	**0,4074**	**5610**
4,0	**0,2038**	**3530**	**0,4075**	**5400**
5,0	**0,2039**	**3540**	**0,4076**	**5410**

Как видно из табл. 1, значения $f_{\text{рез}}$ слабо зависят от расстояния Δ и весьма близки к значениям, рассчитанным по формуле (3). Различие менее 1%. Следовательно, можно сделать вывод, что излучение из торцов пластины при достаточно больших ее размерах и малой толщине практически не влияет на значения резонансной частоты резонатора и что при проведении практических расчетов, связанных с вычислением параметра ε_r диэлектрика по данным измерений, допустимо использовать формулы, полученные на основе электродинамической модели резонатора с «магнитными» стенками на торцах. Систематическая погрешность, обусловленная приближенностью модели, при этом будет заведомо ниже погрешности измерений.

Для определения степени влияния полученных значений $Q_{изл}$ на общую величину добротности резонатора, определяемой формулой (5), необходимо оценить значения $Q_М$ и $Q_Д$ для рассмотренных колебаний. Для выбранного материала пластины величина тангенса угла диэлектрических потерь составляет [3] $t\text{g}\delta = (2...3)\cdot 10^{-3}$. При высокой концентрации поля в диэлектрике можно принять $Q_Д \approx 1/\text{tg}\delta$. Для оценки величины $Q_М$ воспользуемся формулой, полученной в работе [7] для резонатора с «магнитными» стенками на торцах:

$$Q_М = \pi d\sqrt{120\sigma f_{рез}\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}. \quad (6)$$

В (6) обозначено: d – толщина пластины, σ – проводимость материала фольги, покрывающей пластину сверху и снизу.

Полагая в формуле (6) значение проводимости медной фольги $\sigma = 5\cdot 10^7$ См/м [8], для рассматриваемых колебаний получаем значения $Q_{М1} = 252$ и $Q_{М2} = 356$. Нетрудно видеть, что $Q_Д, Q_М << Q_{изл}$. Это означает, что величина $Q_{изл}$ практически не будет оказывать влияние на общую добротность, определяемую формулой (5), что, как было отмечено выше, позволяет производить расчет добротности Q_0 без учета потерь на излучение с торцов, т.е. по-существу означает применимость электродинамической модели резонатора с «магнитными» стенками на торцах при расчете не только резонансных частот, но и добротности колебаний.

С использованием указанной модели в работе [7] получено выражение:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_M} + \text{tg}\delta\ , \quad (7)$$

где Q_M рассчитывается с помощью формулы (6). Данное выражение открывает возможность определения $\text{tg}\delta$ диэлектрика пластины по измеренному значению Q_0:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_М}. \quad (8)$$

Используя современные анализаторы цепей СВЧ, обладающие высокой чувствительностью, измерение Q_0 можно произвести при слабой (минимально возможной) связи резонатора (фольгированной пластины) с измерительной цепью.

Библиографический список

1. Брандт, А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 403 с.
2. Зайцев, А.Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А.Н. Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240с.
3. Егоров, В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ (обзор) / В.Н. Егоров // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – №2 . – С. 5-38.
4. ГОСТ Р 8.623 – 2006. ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики выполнения измерений в диапазоне сверхвысоких частот.
5. Conrood, J. Methods for characterizing the dielectric constant of microwave PCB laminates / J. Conrood // Microwave Journal. – 2011. – №5. – P. 132-144.
6. IPC-TM-650. Standard Test Methods // http: ulstandards.ul.com
7. Белов, Ю.Г. Исследование электромагнитных колебаний в резонаторе, образованном диэлектрической пластиной с двухсторонней металлизацией / Ю.Г. Белов, Б.И. Ворошилов, В.А. Малахов, И.А. Нефедьев // Труды НГТУ. – 2015. – №1. – С. 35-41.
8. Фельдштейн, А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов – М.: Сов. радио, 1967. – 651 с.

Yu.G. Belov, V.A. Malakhov, I.A. Nefed'ev

THE RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS IN THE RECTANGULAR LAMINATED DIELECTRIC PLATE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev, N. Novgorod

It is shown that for measurement of parameters of dielectric materials of the laminated plates without deleting a metal foil the method based on excitation of electromagnetic oscillations in the rectangular plate considered as the resonator, measurement of their resonance frequencies and determination of the relative dielectric permittivity by results of measurements can be used. The appropriate estimated ratios received in an assumption of "magnetic walls" at plate end faces are given. By mathematical simulation the validity of this assumption is shown and also the possibility of use of electrodynamic model of the resonator with "magnetic walls" at end faces for calculation of a Q-factor of the resonator and, respectively, determination of a dielectric loss tangent of material of a plate by results of measurement of a Q-factor is shown.

Keywords: rectangular laminated dielectric plate, resonance frequency, Q-factor, parameters of dielectric.

УДК 537.862

А.С. Проемкин, В.А. Бажилов

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗИ ВЫСОКОДОБРОТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Рассмотреть вопрос возбуждения высокодобротного диэлектрического резонатора по средствам распределенной связи с прямоугольным диэлектрическим волноводом. Выработать подход к оценке зависимости параметров волновода для эффективного возбуждения конкретного колебания «шепчущей галереи»

Методология: Моделирование, оптимизация и расчёт основных характеристик устройства производился в САПР CST Microwave Studio.

Результаты: Анализ производился для круглого диэлектрического резонатора из лейкосапфира, возбуждаемого прямоугольным тефлоновым волноводом. Показано, что согласование фазовых скоростей резонаторной и волноводной мод, а также совпадение проекций полей данных мод, являются основополагающими критериями эффективного возбуждения. Показано влияние параметров волновода на эффективность возбуждения колебаний.

Выводы: Согласование фазовых скоростей резонаторной и волноводной мод является необходимым условием возбуждения резонансной структуры. Поле основной моды прямоугольного диэлектрического волновода в наилучшей степени совпадает с полем колебаний «шепчущей галереи».

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, «моды шепчущей галереи», сантиметровый диапазон, миллиметровый диапазон, САПР CST Microwave Studio, прямоугольный диэлектрический волновод, возбуждение колебаний.

Моды шепчущей галереи (моды типа шепчущей галереи) – резонансные стоячие волны, которые могут возбуждаться в осесимметричных системах из-за эффекта полного внутреннего отражения и являющиеся нормальными модами системы. В частности, данный тип колебаний существует в осесимметричных диэлектрических резонаторах (ДР). Такие ДР выполняются из высококачественных диэлектрических материалов с относительно низкой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 3 \dots 15$, малым значением тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta \leq 10^{-5} \dots 10^{-4}$) и позволяют достичь очень высоких значений собственной добротности. Так, например, в дисковых резонаторах из монокристаллического лейкосапфира. В сантиметровом диапазоне на сегодняшний день реализованы АК с добротностью $Q_0 \geq 10^5$ при комнатной температуре и не ниже $10^7 \dots 10^9$при криогенных температурах [2]. Такие колоссальные значения добротностей обусловлены тем, что благодаря эффекту полного внутреннего отражения, поле запирается внутри резонатора, в таком случае минимизируются потери на излучение, и диссипация энергии практически полностью обуславливается тепловыми потерями в диэлектрике, которые предельно малы.

Объект исследования открытый аксиально-симметричный экранированный диэлектрический резонатор из лейкосапфира (Al_2O_3), возбуждаемый прямоугольным диэлектрическим волноводом из тефлона (фторопласт). Резонаторы данного типа возбуждается на высших азимутальных колебаниях порядка $n > 1$, где 2n – число вариаций электромагнитного поля по азимутальной координате φ.

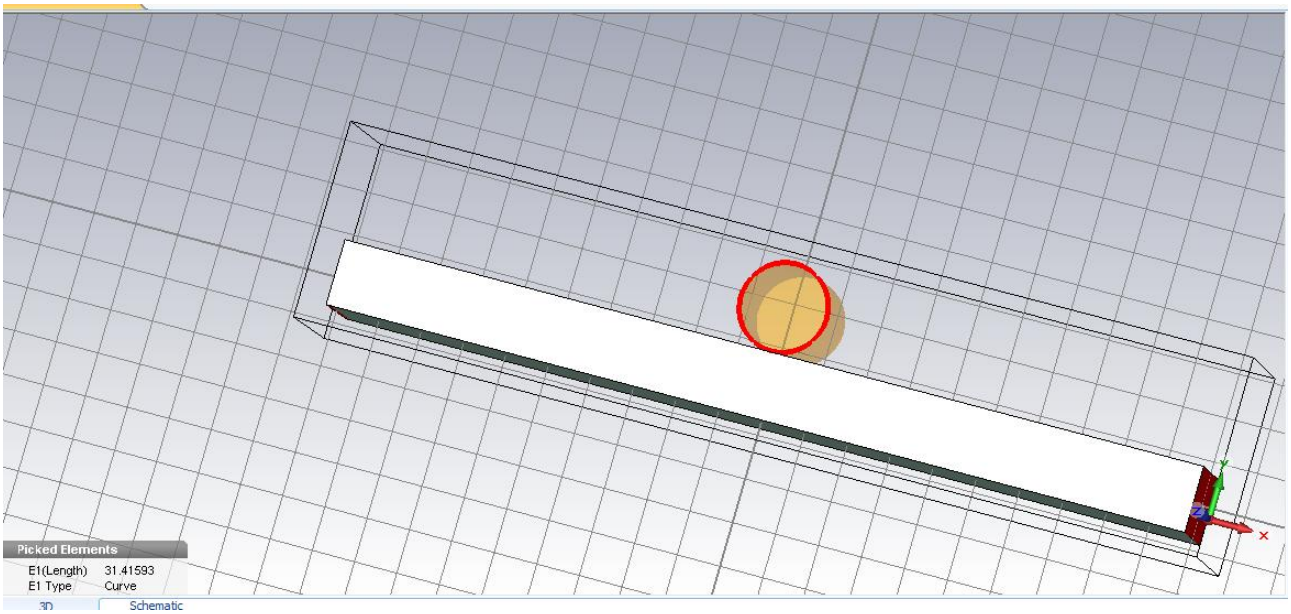


Рис. 1 . Круглый диэлектрический резонатор с распределённым возбуждением

Параметры системы:

Радиус резонатора $R = 5мм$

Высота резонатора $h = 10мм$

Относительная диэлектрическая проницаемость лейкосапфира

$$\varepsilon_r = \begin{pmatrix} 9.2908 & 0 & 0 \\ 0 & 9.2908 & 0 \\ 0 & 0 & 11.3534 \end{pmatrix}$$

Тангенс угла диэлектрических потерь лейкосапфира

$$tg(\delta) = \begin{pmatrix} 1.25*10\text{^}{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 1.25*10\text{^}{-7} & 0 \\ 0 & 0 & 4*10\text{^}{-8} \end{pmatrix}$$

Ширина волновода $b = 10мм$

Толщина волновода a

Длина волновода $l = 100мм$

Относительная диэлектрическая проницаемость материала волновода $\varepsilon_w = 2.1$

Зазор между волноводом и резонатором $d = 0.1мм$

Данная система представляет собой резонатор бегущей волны с распределённой связью. Для эффективного возбуждения колебаний в подобной структуре необходимо соблюсти 2 условия:

1. Для наиболее эффективного возбуждения ДР должно выполняться равенство линейной фазовой скорости азимутальной поверхностной волны ДР на поверхности радиусом $R + d$ и фазовой скорости возбуждающей волны ДВ. Т.е., на участке связи должно выполняться условие фазового синхронизма возбуждающей волны в линии и возбуждаемой в ДР азимутальной волны, что означает приближенное равенство их фазовых скоростей V_φ (коэффициентов фазового замедления $U_\varphi = c / V_\varphi$).

2. Скалярное произведение напряженности поля волны возбудителя и напряженности поля возбуждаемого колебания (интеграл перекрытия) должно достигать максимально возможного значения. Это означает, что картины силовых линий поля возбуждаемого колебания ДР и поля возбуждающей волны в области их перекрытия в поперечном сечении линий должны быть подобными (не быть ортогональными). [11]

Для начала необходимо определиться с условием 2. Поскольку на данный момент не существует аналитического решения как задачи о собственных колебаниях в круглом диэлектрическом резонаторе, так и для прямоугольного диэлектрического волновода, то наиболее простым в реализации вариантом является численное моделирование полей волновода и резонатора, с дальнейшим и визуальным сравнением. Для решения этой задачи используем САПР CST Microwave Studio.

В резонаторе данного вида существует два типа высших азимутальных колебаний: GE (с преобладанием осевой составляющей электрического поля) и GH (с преобладанием осевой составляющей магнитного поля). Основная волна в волноводе E_{01} имеет структуру поля близкую к структуре поля колебания типа GE (рис. 2).

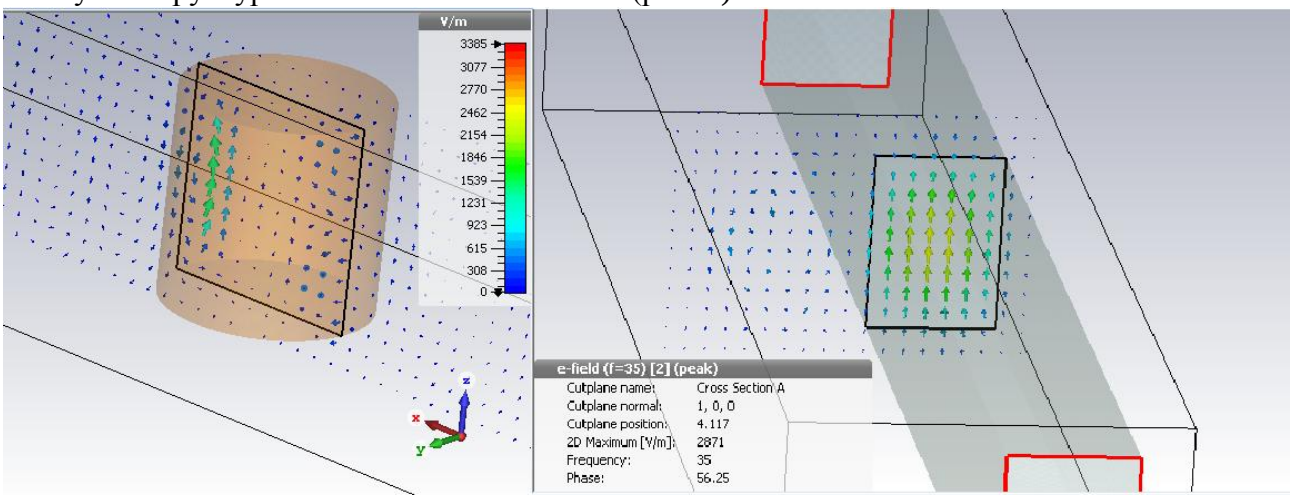


Рис. 2 Вид электрического поля собственного азимутального колебания круглого ДР (слева) и электрическое поле основной моды прямоугольного диэлектрического волновода (справа).

Кроме того, волна E_{01} не имеет критической частоты, что следует учитывать при селективном возбуждении колебаний (в данной статье не рассматривается). Таким образом, волна типа E_{01} в наибольшей степени удовлетворяет условию 2.

Условие 1 говорит нам о том, что для возбуждения недостаточно создать поле, схожее с полем собственного колебания, необходимо так же согласовать скорость набега фазы колебания (подробнее этот вопрос рассмотрен в [6]). Как известно, диэлектрические волноводы – это система с медленными волнами, которые также обладают дисперсией [1]. Это значит, что изменяя параметры волновода (ширина, толщина, материал), мы можем управлять значением фазовой скорости основной волны, и таким образом, согласовать фазовые скорости на фиксированной частоте.

Рассмотрим рассогласование фазовых скоростей на примере азимутального колебания n=6 (Рис. 3)

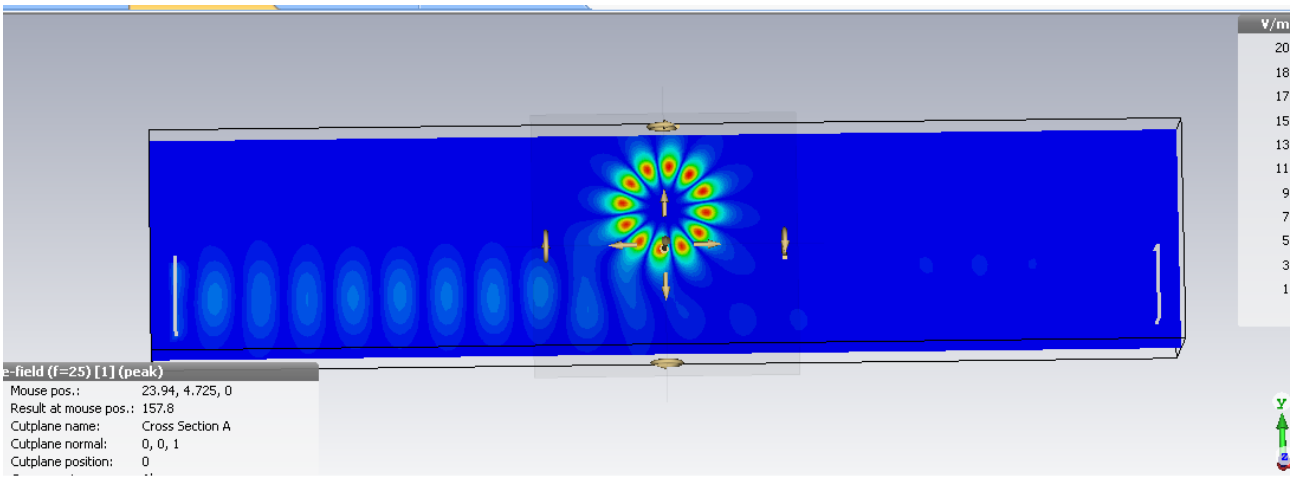


Рис. 3 Азимутальное колебание с азимутальным индексом n=6

Далее, изменяя толщину волновода *a*, с целью изменения фазовой скорости основного колебания, был рассчитан параметр S21 для каждого случая. На рис. 4 приведены результаты моделирования для толщин 8 и 12 мм.

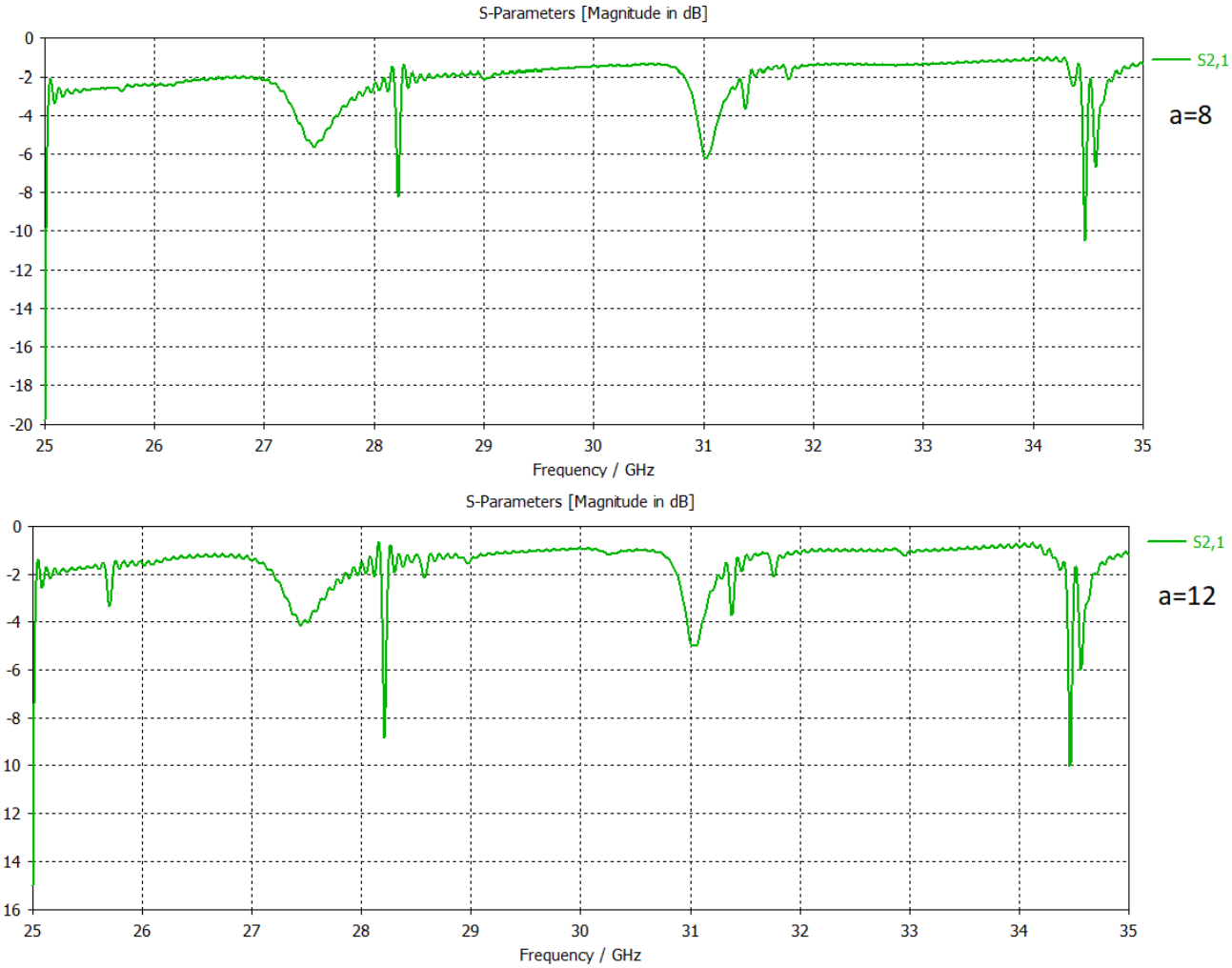


Рис. 4 Коэффициент передачи системы при различной толщине волновода

Интересующее нас колебание находится на частоте 25 ГГц. Из графиков видно, что происходит рассогласование фазовых скоростей, в следсвии чего снижается эффективность возбуждения структуры.

Выводы

В данной работе был рассмотрен вопрос возбуждения азимутальных колебаний в круглом диэлектрическом резонаторе с помощью прямоугольного диэлектрического волновода. Для расчета и оптимизации устройства использован программный пакет CST Microwave Studio. Обоснован выбор моды волновода для возбуждения колебаний. Рассмотрено влияние фазовой скорости волноводной моды на эффективность возбуждения колебаний. Рассогласование фазовых скоростей ведёт к выраженному снижению эффективности возбуждения колебаний.

Библиографический список

1. В.А. Неганов, С.Б. Раевский// Электродинамика и распространение радиоволн. Учебник.4-е издание, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2007. – 744 с., ил.
2. Бажилов В.А.//Аксиально-симметричные металлодиэлектрические резонансные структуры, LAP, 327 с.
3. Малахов В.А., Раевские А.С., Раевский С.Б.//Особенности спектров волн направляющих электродинамических структур, описываемых несамосопряженными операторами. – Нижний Новгород: 2014.
4. Ефимов И.Е., Шермина Г.А. //Волноводные линии передачи.– М.: Связь, 1979. - 232 с.
5. Ильченко М.Е. , Трубин А.А. //Электродинамика диэлектрических резонаторов - Киев Наукова думка, 2004 - 266с
6. Ильченко М.Е., Взятышев В.Ф., Гассанов Л.Г. и др.//Диэлектрические резонаторы, ред. Ильченко М.Е. - М Радио и связь, 1989 -328с
7. Ильченко М.Е., Кудинов Е.В.//Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. - Киев: изд-во КГУ, 1973. - 175с.
8. Демидович Б.П.,Марон И.А. //Основы вычислительной математики – М.: Наука, 1966.- 664с.
9. В.С. Добромыслов, В.И. Калиничев, А.В. Крюков// Расчёт спектра собственных колебаний экранированных диэлектрических резонаторов- Изв. вузов. Сер. Радиофизика. – 1990, т. 33, №9, с.с. 1068-1076.
10. Juan A. Monsoriu, Miguel V. Andres//Analysis of Dielectric-Loaded Cavities Using an Orthonormal-Basis Method - доклад IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 11 November 2002.
11. Егоров В.Н. // Микроволновые диэлектрические резонаторы в физических измерениях. – Иркутск: 2013.

A.S.Proemkin, V.A.Bazhilov

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE CONNECTION OF A HIGH-DECODER DIELECTRIC RESONATOR WITH A DIELECTRIC WAVEGUIDE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

Objective: To consider the issue of excitation of a high-Q dielectric resonator via means of distributed coupling with a rectangular dielectric waveguide. To develop an approach to the evaluation of the dependence of the parameters of the waveguide for the effective excitation of a specific oscillation of the "whispering gallery"

Methodology: Simulation, optimization and calculation of the main characteristics of the device was done in CAD CST Microwave Studio.

Results: The analysis was performed for a circular dielectric resonator made of alumina, excited by a rectangular Teflon waveguide. It is shown that the coordination of the phase velocities of the resonator and waveguide modes, as well as the coincidence of the projections of the fields of these modes, are the fundamental criteria for effective excitation. The effect of waveguide parameters on the efficiency of oscillation excitation is shown.

Conclusions: The coordination of the phase velocities of the resonator and waveguide modes is a necessary condition for the excitation of the resonance structure. The field of the fundamental mode of a rectangular dielectric waveguide coincides in the best possible way with the field of oscillations of the "whispering gallery".

Key words: dielectric resonator, "whispering gallery" modes, centimeter range, millimeter range, CAD CST Microwave Studio, rectangular dielectric waveguide, oscillation excitation.

УДК 621.396.677.833.2

А.С. Раевский, М.Е. Ульянов, В.В. Щербаков

ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТЕЙВОССТАНОВЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ АМПЛИТУДНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ОТ ПОГРЕШНОСТЕЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ НА ПЛОСКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты восстановления характеристик направленности круглой фазированной антенной решётки амплифазометрическим методом из измерений амплитудно-фазового распределения в ближнем поле на плоскости.

Основным источником погрешностей при реализации амплифазометрического метода измерений характеристик антенных устройств являются, как известно, погрешности измерения фазы. В настоящей работе рассмотрен характер изменения амплитудной диаграммы направленности в одном из главных сечений в зависимости от преднамеренного внесения погрешностей в результаты измерений распределения фаз.

Ключевые слова: антенные измерения амплифазометрический метод, ближнее поле, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности

Введение

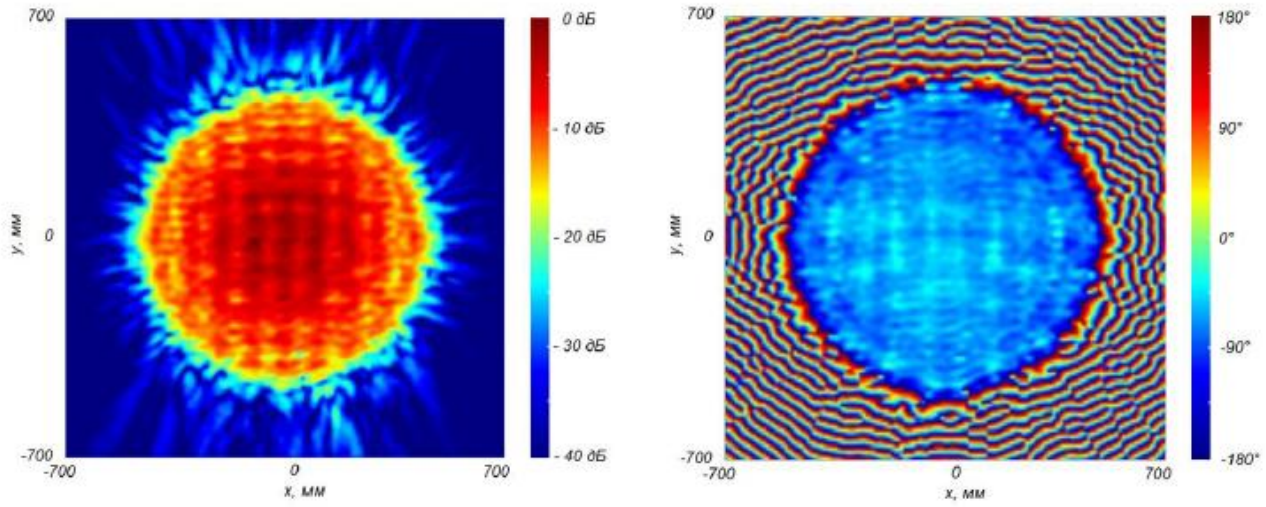
В настоящее время антенные устройства изделий военной и специальной техники должны удовлетворять весьма жёстким требованиям к электродинамическим и эксплуатационным характеристикам. Практика доказала высокую эффективность применения при решении задач разработки и серийного производства изделий антенной техники численных методов электродинамики, в частности реконструктивных методов антенных измерений в ближнем поле, в том числе обусловила широкое распространение автоматизированных измерительных комплексов (АИК) на основе плоских сканеров ближнего поля для контроля на соответствие требованиям технических условий характеристик антенных устройств путём пересчёта в дальнее поле амплитудно-фазового распределения(АФР) электромагнитного поля в ближней зоне. По мере практического распространения этого метода стала более популярной аббревиатура АИВК (автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс), подчёркивающая косвенность метода измерений).

Методы реконструкции полей излучения антенн по результатам измерения АФР в ближней зоне активно развивались с начала 1960-х годов 20 века. Методология реконструкции диаграмм направленности антенн при измерениях в ближнем поле на плоской, цилиндрической, или сферической поверхностях базируется на теореме единственности решений уравнений Дж. К. Максвелла, и представлении поля в области вне источников поля спектрамиволн: плоских, цилиндрических, или сферических, соответственно.

Физические основы амплифазометрических антенных измерений в ближней зоне на плоскости подробно описаны в литературе [1,2,3]. Для традиционных реконструктивных измерений на плоскости важен вопрос о влиянии погрешностей исходного (измеренного) амплитудно-фазового распределения (АФР) на точность восстановления антенных характеристик в дальнем поле. В настоящей работе проводится рассмотрение этого вопроса на примере измерений при помощи плоского сканера характеристик направленности фазированной антенной решётки (ФАР) с круглой апертурой для случая представления погрешностей измерений АФР некоррелированными случайными величинами с нормальным распределением.

Методика численного эксперимента

На Рис. 1 представлены результаты измерений (в сторонней организации) плоским вертикальным сканером АФР поля, создаваемого плоской круглой ФАР диаметром ≈ 1,0 метр с рабочей частотой ≈ 9,07 ГГц, представляющие собой квадратные матрицы 141 × 141 отсчёт, соответствующие размеру области сканирования 1,4 × 1,4 м^{2}с шагамиs= 1 см и по горизонтали, и по вертикалы, при вертикальной поляризации измерительной антенны-зонда.



а *б*

Рис. 1. Амплитудно-фазовое распределение поля в ближней зоне на плоскости: *а* –амплитудное распределение,*б* –фазовое распределение

В общем случае количественный характер зависимости эволюции геометриисечений амплитудной диаграммы направленности от погрешностей измерений АФРможет быть различным, зависящим от вида АФР, однако представляет интерес и частныйслучай АФР рассматриваемой в настоящей работе ФАР.Исследуем зависимость эволюции геометрии сечения амплитудной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости от погрешности измерения амплитуд, добавляя в амплитудное распределение имитирующий погрешность измерений шум. При этом считая, что измерения фазы выполнены верно. Будем исходить из целесообразности анализа эволюции вида сечений от относительной вносимой искусственно (математически) ошибки измерения, то есть положим случайное «ошибочное» дополнительное слагаемое к каждому отсчёту амплитуды пропорциональным величине этой амплитуды (взятой не в логарифмической, а в линейной шкале). Будем задавать относительные «ошибки измерений» величиной ε по следующему правилу: новое «искажённое» значение амплитуды A_{new} в некоторой точке скана связано со «старым», «неискажённым» A_{old} следующим образом:

$$A_{new} = A_{old}\left(1 + sign \cdot \varepsilon\right), \tag{1}$$

где *sign* – величина, равновероятно принимающая значения единица или минус единица.

Параметр ε зададим на уровне 0,5. Сгенерируем семь реализаций набора «ошибок измерений» (чтобы не слишком загружать рисунок с результатами моделирования).

Вывод ожидаем: если правильно измерены фазы (что и представляет основную сложность в амплифазометрических измерениях), то даже значительные относительные ошибки в измерениях амплитуд (на уровне ±50%) не приводят к сколько-нибудь значимым искажениям

уровней и формы главного и первых боковых лепестков амплитудной диаграммы направленности.

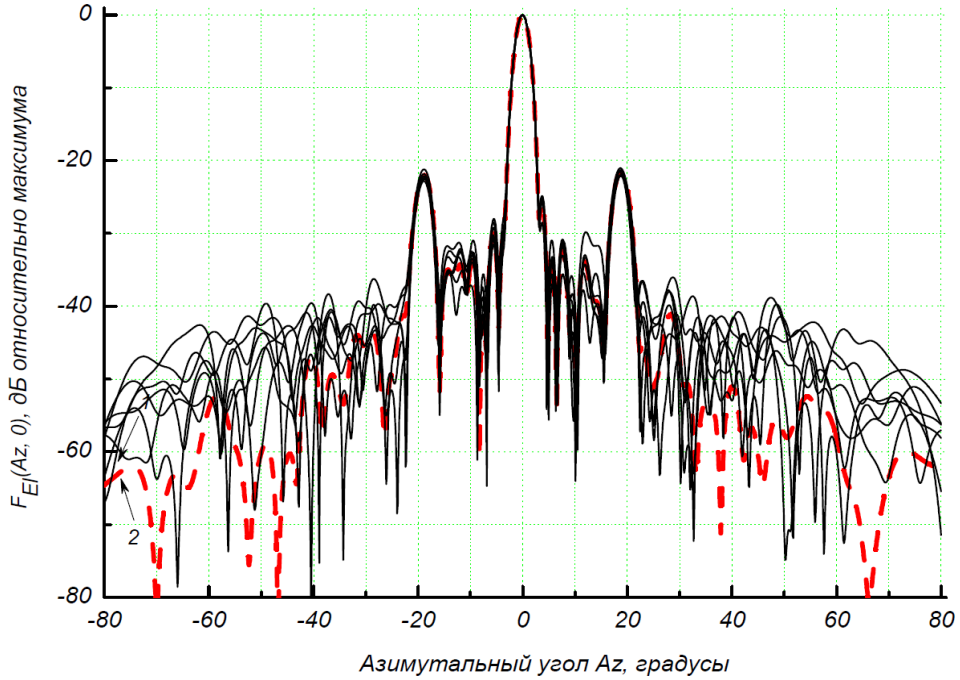


Рис. 2. Результаты восстановления сечения амплитудной диаграммы направленности при ε = 0,5 (семь случайных реализаций) в сравнении с сечением исходной диаграммой (красный пунктир)

С целью рассмотреть зависимость от погрешностей измерения фазовой части АФР было проведено моделирование погрешности измерения фазы, в каждом из 141 × 141 отсчёте сигнала ошибка принималась равной $sign \times \delta\varphi$, где $\delta\varphi$ принимало значения 12, 24, 36, 42, 48, 60, и 72 градуса. Результаты моделирования приведены на Рис. 3.

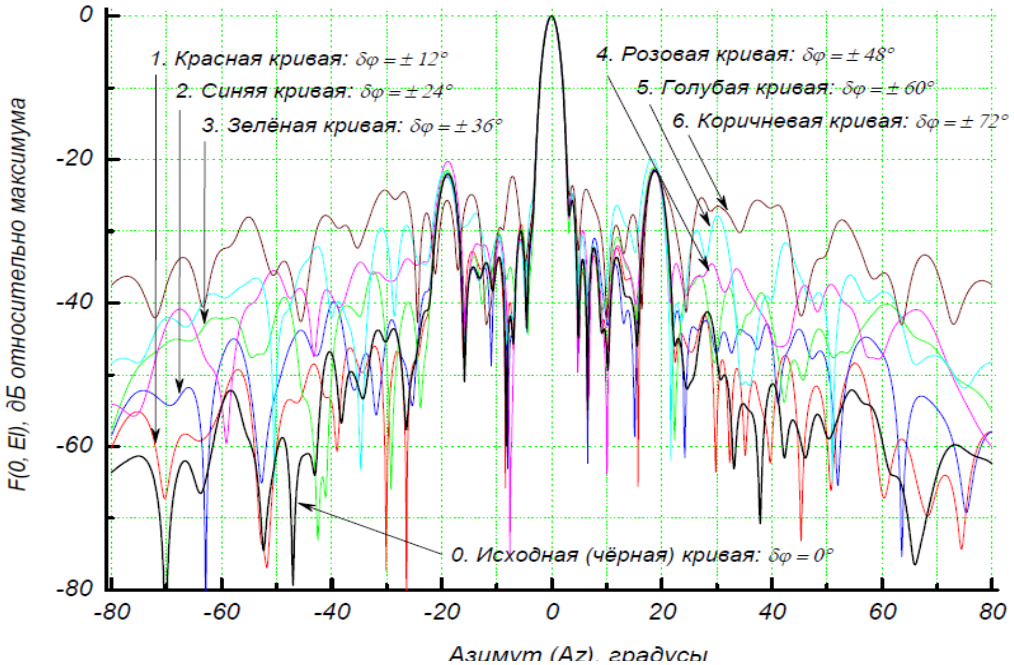


Рис. 3. Результаты восстановления сечения амплитудной диаграммы направленности привнесении случайных погрешностей в фазовую часть амплитудно-фазового распределения

Таким образом, погрешности фаз становятся существенными для формы первых боковых лепестков, начиная с ошибок измерений в 48 градусов, при более значимых ошибках форма первых боковых лепестков искажается.

Выводы

При амплифазометрических измерениях в ближнем поле на плоскости более существенен вклад в результирующую погрешность измерений погрешностей измерений фазовой части АФР, если правильное измерены фазы (что и представляет основную сложность), то даже значительные относительные ошибки в измерениях амплитуд (на уровне ±50%) не приводят к сколько-нибудь значимым искажениям уровней и формы главного и первых боковых лепестков сечений амплитудной диаграммы направленности.

По причине неважности для целей настоящей работы, в ней не потребовалось обсуждать учёт свойств зонда, приводящий к тому, что в действительности относительные уровни амплитудной диаграммы направленности при больших углах расположены ниже показанного на рисунках.

Библиографический список

1. Бахрах, Л.Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.Н. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин // Л.: Наука, 1985. 272 с.

2. Синтез характеристик антенн по измерениям в ближней зоне: монография / Ю.А. Антохина, А.Ф. Крячко, А.С. Ковалев, и др. – СПб.: ГУАП, 2016. – 309 с.

3. C.A. Balanis Antenna Theory: Analysis and Design. // 4th Edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2016. – 1095 p.

A.S. Rayevsky, M.E. Ulyanov, V.V. Shcherbakov

DEPENDENCE OF RECOVERY ERRORS RELATIVE LEVELS OF THE AMPLITUDE DIAGRAMS OF DIRECTION FROM THE ERRORS OF AMPLITUDE PHASE DISTRIBUTION WITH MEASUREMENTS IN THE MIDDLE FIELD ON THE PLANE

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva
Nizhny Novgorod

The results of reconstructing the directivity characteristics of a circular phased array antenna by an amplitude-phase method from measurements of the amplitude-phase distribution in a near field in a plane are presented.

The main source of errors in the implementation of the ampliphasometric method of measuring the characteristics of antenna devices is, as is well known, the errors in measuring the phase. In the present work, the character of the amplitude directivity pattern in one of the main sections is considered, depending on the deliberate introduction of errors into the results of phase distribution measurements.

Keywords: antenna measurements, amplitude-phase method, near field, amplitude-phase distribution, radiation pattern.

УДК 690.192; 623.624.9

Д.А. Рябов, Л.Б. Рязанцев, А.И. Казьмин

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН В СИСТЕМЕ CST STUDIO SUITE

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

В статье рассмотрены основные однослойных и многослойные структуры для создания микрополосковых излучателей для широкополосных антенных решеток, приведена методика расчета их геометрических параметров в системе CST Studio Suite. Показаны сравнительные характеристики однослойных и двухслойных структур. Установлено, что ширина полосы рабочих частот однослойных структур не превышает 2−4%, двухслойных – 10-25%.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, многослойная структура, коэффициент отражения, система электродинамического моделирования.

Антенная система вносит наибольший вклад в массогабаритные показатели радиолокатора с инверсным синтезированием апертуры антенны (РСА). Выбор ее параметров и конструкции, зачастую, производится на основе компромисса между требуемой формой диаграммы направленности (ДН), параметрами движения носителя РСА, аэродинамическими характеристиками, допустимыми значениями ее массы и размеров. Основными параметрами являются: форма ДН, ширина ДН в азимутальной и угломестной плоскостях, рабочая полоса частот, размеры и вес, степень развязки между передатчиком и приемником.

Основными типами антенн, применяемых на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) являются зеркальные и микрополосковые (МП) антенны. В последнее время в подавляющем большинстве наблюдается использование МП антенн [1–2]. Изготовление таких антенн не вызывает трудностей в связи с развитой технологией производства печатных плат. На основе МП технологии создаются малогабаритные низкопрофильные (в том числе и конформные) антенны, обладающие малым весом и габаритами. На МП антенны достаточно просто устанавливаются интегральные микросхемы, что позволяет реализовать управление поляризацией, импедансом, полосой рабочих частот, а также положением луча ДН в пространстве для компенсации траекторных нестабильностей и реализации различных режимов работы РСА.

Недостатками МП антенн по сравнению с другими типами антенн являются низкие поляризационные характеристики, высокий уровень боковых лепестков, невысокие предельные рабочие мощности излучаемых сигналов и достаточно узкая полоса рабочих частот. В тоже время использование многослойных материалов позволяет добиться расширения полосы рабочих частот, а низкое значение средней мощности зондирующих сигналов в РСА непрерывного излучения делает МП антенны очень привлекательными для их использования.

Микрополосковые антенны РСА непрерывного излучения могут быть построены на основе прямоугольных излучателей (patch-элементов). Рабочая полоса частот прямоугольных излучателей с однослойным диэлектриком не превышает 2–4%. Применение многослойных конструкций дает расширение полосы рабочих частот до – 10–25%.

Для расширения полосы рабочих частот МП антенн применяют многослойные структуры с несколькими (чаще двумя) связанными электромагнитным полем резонаторами (рисунок 1). Такая структура отличается от прямоугольного МП излучателя наличием второго, так называемого, паразитного резонатора, отделенным от первого диэлектриком.

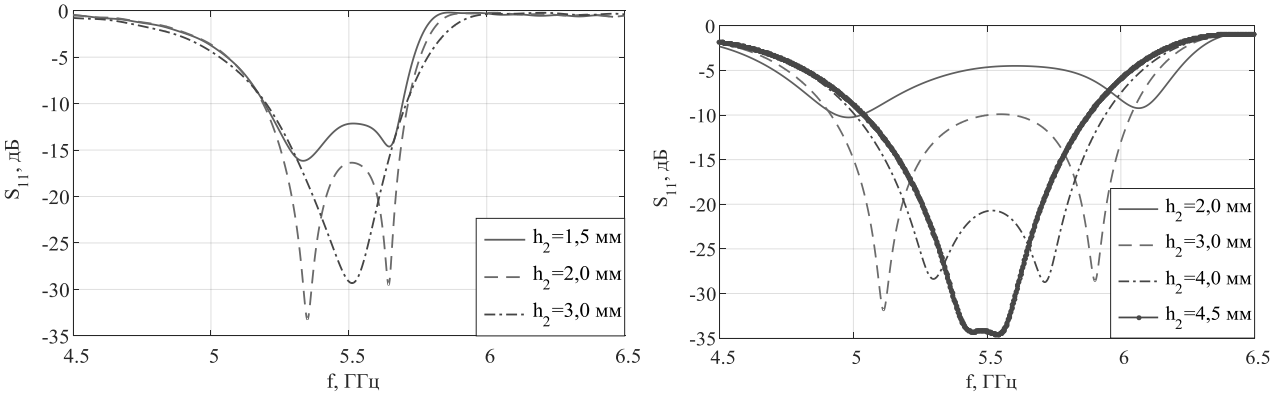
Ширина полосы рабочих частот такого излучателя Δf_a, как и в связанных LC контурах [3], определяется резонансными частотами f_{p1} и f_{p2} каждого из резонаторов, степенью электромагнитной связи $K_{св}$ межу резонаторами и добротностью структуры Q.

Рис. 1. Прямоугольный двухслойный излучатель с двумя резонаторами

При $K_{св}Q<1$ (слабая связь) зависимость коэффициента отражения S_{11} от частоты имеет один резонансный минимум. При $K_{св}Q>1$ (сильная связь между резонаторами) наблюдается два резонансных минимума. При $K_{св}Q=1$ (критическое значение) зависимость имеет наиболее плоскую форму в области резонанса. Увеличение $K_{св}$ с одной стороны приводит к увеличению расстояния между резонансными минимумами и к увеличению Δf, а с другой – к увеличению S_{11} (снижению эффективности излучателя).Коэффициент связи подбирается толщиной диэлектрика h_2. Положения резонансных минимумов f_1 и f_2 в случае $f_{p1}=f_{p2}=f_0$ определяются как

$$f_{1,2}=f_0\Big/\sqrt{1\pm\sqrt{K_{св}^2-1/Q^2}}\ . \qquad (1)$$

Для достижения больших значений Δf предпочтительно выбирать материал диэлектрика второго слоя с меньшими значениями диэлектрической проницаемости (рисунок 2). Так при $\varepsilon_{r2}=2,2$ ширина полосы рабочих частот излучателя не превышает 10% в следствие малых значений Q. В то время как при $\varepsilon_{r2}=1,2$ ширина полосы рабочих частот достигает значений 20%. Коэффициент усиления МП излучателя с двумя резонаторами аналогичен коэффициенту усиления прямоугольного МП излучателя с одним резонатором и имеет значения 7–9 дБ.



а) б)

а) $\varepsilon_{r2}=2,2$; б) $\varepsilon_{r2}=1,2$

Рис. 2. Зависимости S_{11} от частоты

Расчет геометрии резонаторов двухслойного излучателя может быть осуществлен путем решения оптимизационной задачи с использованием программных продуктов

электродинамического моделирования AntennaMagus, CSTMicrowaveStudio, FEKO и др., в которых реализованы все известные и практически применяемые асимптотически строгие и приближенные методы решения электродинамических задач. Методика расчета состоит из следующих этапов.

Расчет геометрии резонаторов двухслойного излучателя может быть осуществлен путем решения оптимизационной задачи с использованием программных продуктов электродинамического моделирования Antenna Magus, CST Microwave Studio, FEKO и др., в которых реализованы все известные и практически применяемые асимптотически строгие и приближенные методы решения электродинамических задач. Методика расчета состоит из следующих этапов.

Этап 1. На основе заданных значений Z_0, f_0, ε_1, ε_2, h_1 и h_2 производится расчет начальных размеров L_{10}, L_{20} первого и второго резонатора исходя из решения уравнений [4]

$$f_{p1} = \frac{c}{2\left(L_{10} + 2\Delta L_1'\right)\sqrt{\varepsilon_{r\,эф1}}},$$

$$f_{p2} = \frac{c}{2\left(L_{20} + 2\Delta L_2\right)\sqrt{\varepsilon_{r\,эф2}}},$$

где f_{p1}, f_{p2} – резонансные частоты первого и второго резонатора соответственно;

$$\varepsilon_{r\,эф1} = \varepsilon_{r1} q_1 + \varepsilon_{r2} \frac{\left(1-q_1\right)^2}{\varepsilon_{r2}\left(1-q_1-q_2\right)+q_2};$$

$$\varepsilon_{r\,эф1} = \frac{\varepsilon_{r2}+1}{2} + \frac{\varepsilon_{r2}-1}{2}\left(1+\frac{12h_2}{W_2}\right)^{-1/2};$$

W_2 – ширина второго резонатора; выражения для $\Delta L_1'$, ΔL_2, q_1, q_2, q_3 представлены в [4] и здесь не приводятся в силу своей громоздкости.

Значения f_{p1} и f_{p2} принимаются равными f_0. Ширина первого и второго резонаторов принимается $W_1 = (1,0\ldots1,4)L_{10}$ и $W_2 = (1,0\ldots1,4)L_{20}$, соответственно.

Этап 2. Путем решения оптимизационной задачи производится поиск таких параметров y_0 и L_{10}, которые обеспечивают минимальное значение S_{11} на частоте f_0. Оптимизация на данном этапе проводится без учета верхнего резонатора.

Этап 3. Производится расчет зависимости S_{11} от частоты для различных значений длины второго резонатора в диапазоне от $0{,}8L_{10}$ до $1{,}2L_{10}$ с некоторым шагом, выбираемым исходя из требуемой точности. По рассчитанным зависимостям S_{11} выбирается такое значение длины второго резонатора L_{20}, при котором зависимость S_{11} имеет два выраженных резонансных минимума с наиболее близкими значениями параметра S_{11}.

Этап 4. Осуществляется поиск значения y_0, при котором зависимость S_{11} имеет минимальные значения во всей рабочей полосе частот.

Этап 5. По положениям резонансных минимумов f_1 и f_2 на зависимости S_{11} вычисляется величина отклонения α полученной центральной рабочей частоты излучателя от заданной, в соответствие с которой определяются размеры L_1 и L_2 обоих излучателей $L_1 = \alpha L_{10}$ и $L_2 = \alpha L_{20}$, где $\alpha = |f_2 + f_1|/2f_0$.

Таким образом, в статье рассмотрен методический подход для к расчету многослойных структур для создания микрополосковых излучателей для широкополосных антенных решеток. Установлено, что ширина полосы рабочих частот однослойных структур не превышает 2-4%, двухслойных – 10-25%.

Библиографический список

1. **Balanis, C.** Antenna Theory. Analysis and Design / C. Balanis. – John Wiley & Sons, Inc., 2016. – 1072 p.

2. **Fang, D. G.** Antenna Theory and Microstrip Antennas / D. G. Fang. – CRC Press, 2010. – 543 p.

3. **Мигулин, В.В.** Основы теории колебаний / В.В. Мигулин, В.И. Медведев, Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин. – М.: Наука, 1978. – 348 с.

4. **Vijay K Pandey** Theoretical analysis of linear array antenna of stacked patches / Vijay K Pandey, Babau R Vishvakarma // Indian Journal of Radio & Space Physics. – Vol. 34. – April 2005. – P. 125−130.

D.A. Rjabov, L.B. Rjazancev, A.I. Kaz'min

METHOD OF CALCULATION OF MULTILAYER DIELECTRIC STRUCTURES FOR MICROSTRIP ANTENNAS IN THE SYSTEM OF CST STUDIO SUITE

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

The paper considers the basic single-layer and multilayer structures for creating microstrip radiators for broadband antenna arrays, and a methodology for calculating their geometric parameters in the CST Studio Suite is presented. Comparative characteristics of single-layer and double-layer structures is presented. It is established that the width of the working frequency band of single-layer structures does not exceed 2-4%, two-layer widths - 10-25%.

Keywords: radio absorbing coating, characteristic equation, electrophysical parameters, electrodynamic simulation system.

УДК 537.862

А.С. Табунова[1], В.А. Бажилов[1,2]

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

[1] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
[2] Филиал ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Цель работы: Разработка и исследование колебательных систем прибора для измерения параметров диэлектриков резонансным методом.

Методология: Моделирование, расчёт и оптимизация основных характеристик устройства производился в САПР CST Microwave Studio.

Результаты: Анализ производится для аксиально-симметричного экранированного диэлектрического резонатора с радиусом диэлектрика 40 мм. В модели резонатора предусмотрены два коаксиальных порта, подключенных к штыревым элементам возбуждения. При использовании метода решения Eigenmode рассчитана зависимость значений собственных частот от соотношения размеров колебательной системы и от различных значений диэлектрической проницаемости. Задача о возбуждении резонатора решалась с применением электромагнитного анализа во временной области.

Выводы: В данной работе было выбрано конструктивное исполнение устройства, приведены результаты расчета для модели аксиально-симметричного экранированного диэлектрического резонатора. Введение двух коаксиальных портов позволяет использовать измерительный резонатор в схеме “на проход”. Данная система может быть использована для измерения диэлектрической проницаемости по результатам измерений резонансной частоты колебания H_{01}.

Ключевые слова: резонатор, параметры диэлектрика, диэлектрическая проницаемость, САПР CST Microwave Studio.

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ является одной из наиболее важных характеристик диэлектрических материалов. Ряд задач радиофизики и СВЧ-электроники связан с неразрушающим измерением диэлектрической проницаемости при различных внешних воздействиях. Такие измерения позволяют исследовать свойства диэлектриков.

Резонансные методы измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ сводятся к частотным измерениям и во многих случаях оказываются наиболее точными, позволяя уверенно регистрировать малые $tg\delta$, вплоть до 10^{-8} -$10^{-9.}$

Объект исследования аксиально-симметричный металлодиэлектрический резонатор. Подобные резонансные структуры достаточно частот используются в качестве измерительных ячеек для определения компонент комплексной диэлектрической проницаемости для керамических и органических материалов с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 3...80$ и значением тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta \le 10^{-5}...10^{-2}$ [3].

Моделирование проводилось в среде автоматического проектирования CST MICROWAVE STUDIO. CST MWS представляет собой программный пакет, предназначенный для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения.

Модель рассчитываемого устройства представлена на рис.1. Радиус диэлектрика 40 мм.

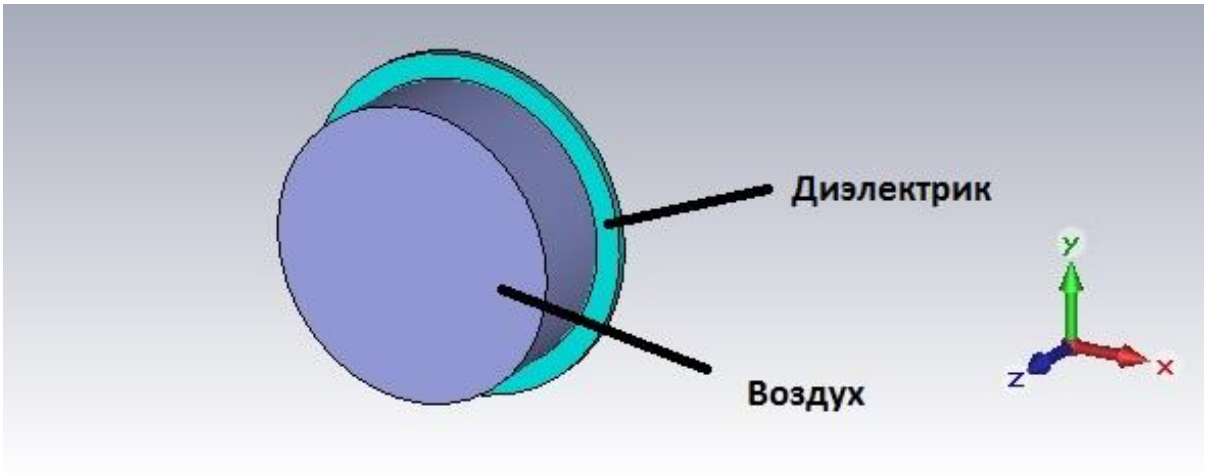


Рис.1. Модель устройства

Был произведен расчет зависимостей значений собственных частот от соотношения размеров колебательной системы (изменение высоты диэлектрика *h* от 1 до 10 мм) и от различных значений диэлектрической проницаемости (рис.2, рис.3).

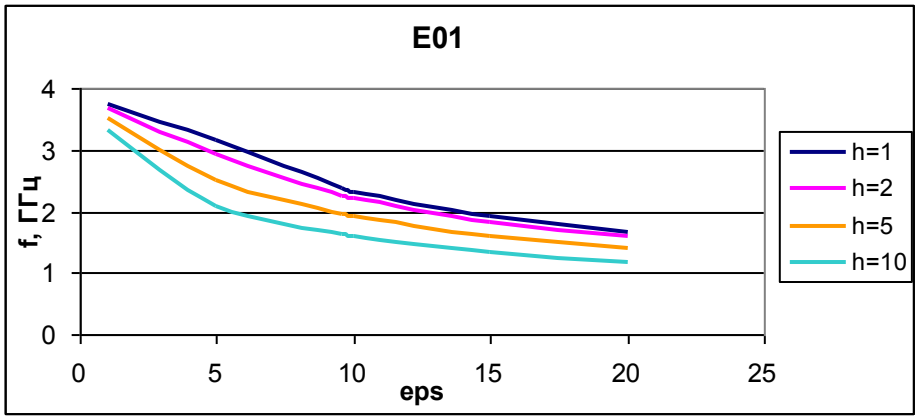


Рис.2. Зависимость параметров колебания E_{01} от величины диэлектрической проницаемости

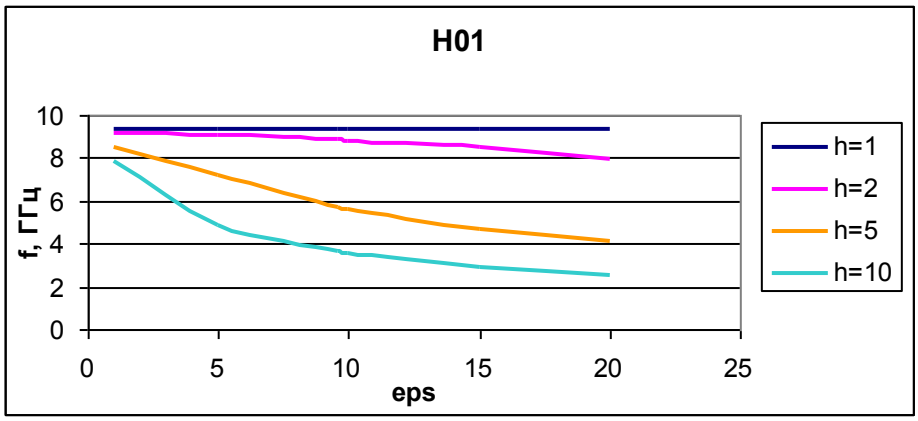


Рис.3. Зависимость параметров колебания H_{01} от величины диэлектрической проницаемости

При анализе структуры электромагнитных полей низших колебаний анализируемой колебательной системы, было принято решение для дальнейшего исследования использовать

в качестве рабочего колебания симметричное колебание H_{01} и толщину диэлектрика $h=5$ *мм.* Также было рассмотрено возбуждение данного диэлектрического резонатора путем введения двух коаксиальных портов. Соотношения внутреннего и внешнего радиусов коаксиальных портов выбирались исходя из условия равенства волнового сопротивления значению 50 Ом.

Модель рассчитываемого устройства представлена на рис.4.

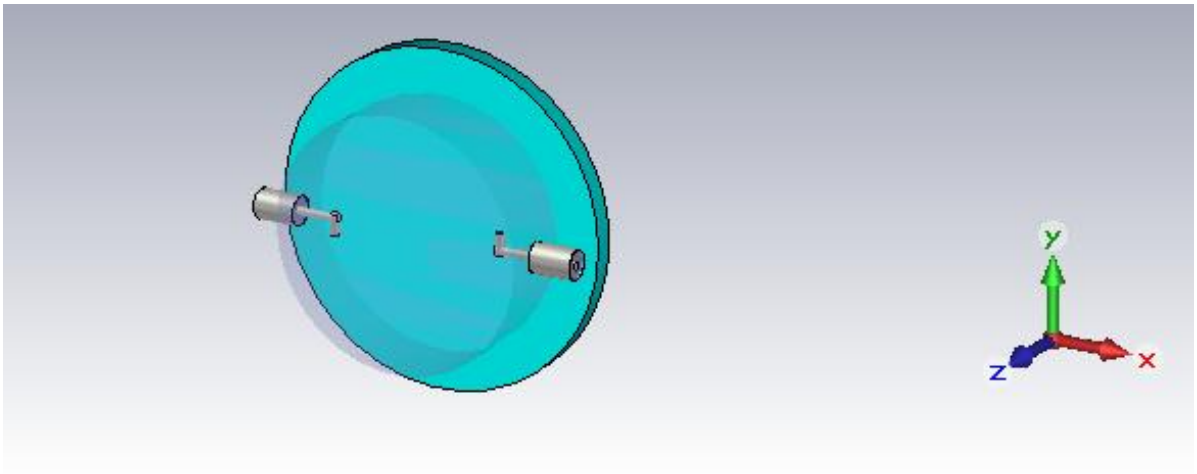
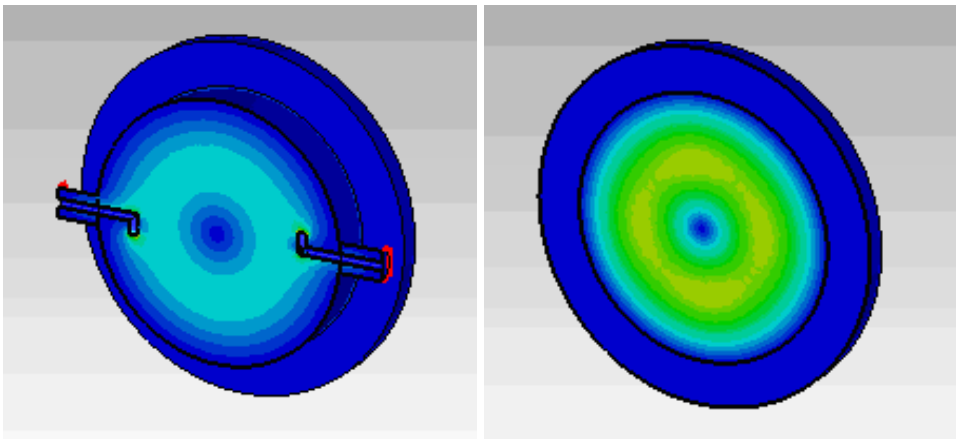


Рис.4. Модель устройства с возбуждением

По результатам расчетов получили следующее значение частоты для колебания H_{01}: f = 5,708477 *ГГц.* Данная частота примерно совпадает с частотой у колебания H_{01} в схеме без возбуждения.

Картина поля для данного колебания представлена на рис.5.



а) б)

Рис.5. Электрическое поле резонатора: а) в плоскости возбуждения; б) в верхней плоскости диэлектрика.

Коэффициент передачи S_{21} на промежутке, включающем в себя данную частоту, представлен на рис.6.

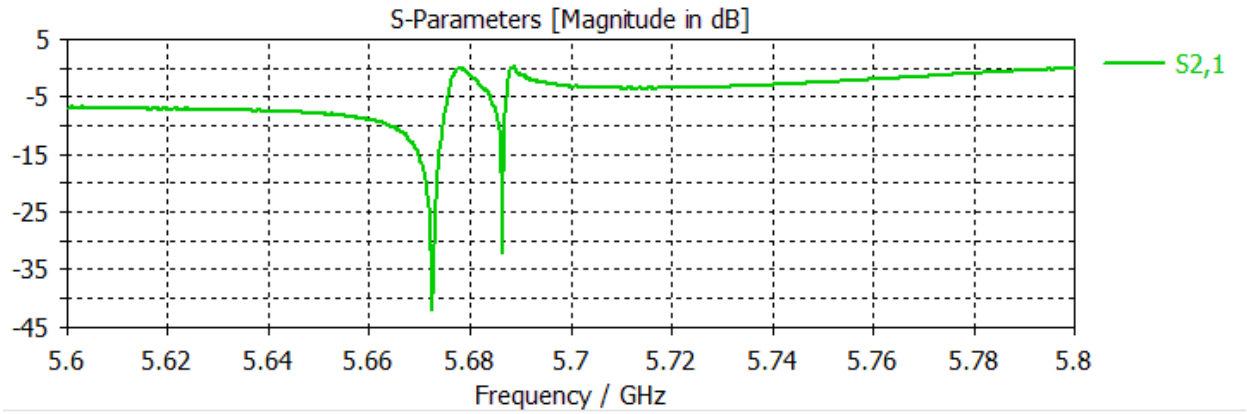


Рис.6. Коэффициент передачи S_{21}

Выводы

Таким образом, в данной работе было выбрано конструктивное исполнение устройства, приведены результаты расчета модели аксиально-симметричного экранированного диэлектрического резонатора. Для расчета и оптимизации устройства использован программный пакет CST Microwave Studio. Представлены основные характеристики модели аксиально-симметричного экранированного диэлектрического резонатора с радиусом диэлектрика 40 мм. Рассчитана зависимость значений собственных частот от соотношения размеров колебательной системы и от различных значений диэлектрической проницаемости. Показано, что введение двух коаксиальных портов позволяет использовать измерительный резонатор в схеме “на проход”.

Таким образом, получили, что данная система может быть использована для измерения диэлектрической проницаемости по результатам измерений резонансной частоты колебания H_{01}.

Библиографический список

1. Ильченко, М.Е. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ / М.Е. Ильченко, Е.В. Кудинов - Киев: изд-во КГУ, 1973. – 175 с.

2. Ильченко, М.Е. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятышев, Л.Г. Гассанов - М Радио и связь, 1989. – 328 с.

3. Бажилов, В.А. Аксиально-симметричные металлодиэлектрические резонансные структуры, Lambert Academic Publishing, 325 с.

4. Курушин, А.А. Расчет спектра мод шепчущей галереи в цилиндрических резонаторах с возмущенными граничными условиями / Курушин, А.А., Пластиков А.Н. - Квант. электрон., 2013, том 43, номер 5, с.с. 414–417

5. Ефимов, И.Е. Волноводные линии передачи. / И.Е. Ефимов, Г.А Шермина – М.: Связь, 1979. - 232 с.

6. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков – М. Издательство МЭИ, 2011 - 155 с.

7. Добромыслов, В.С. Расчёт спектра собственных колебаний экранированных диэлектрических резонаторов/ В.С. Добромыслов, В.И. Калиничев, А.В. Крюков - Изв. вузов. Сер. Радиофизика. – 1990, т. 33, №9, с.с. 1068-1076.

A. S. Tabunova[1], V. A. Bazhilov[1,2]

VIBRATING SYSTEMS OF THE DEVICE FOR MEASUREMENT OF PARAMETERS OF DIELECTRICS BY THE RESONANCE METHOD

[1] Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
2 Branch FSUE RFNC VNIIEF «NIIIS named after Yu.Ye. Sedakov»

Purpose: Development and a research of vibrating systems of the device for measurement of parameters of dielectrics by the resonance method.

Methods: Modeling, optimization and calculation of the main characteristics of the device was produced in CAD CST Microwave Studio.

Results: The analysis is performed for an axially symmetric shielded dielectric resonator with a dielectric radius of 40 mm. In the model of the resonator two coaxial ports connected to the pin excitation elements are provided. When using solutions solutions Eigenmode calculated dependence on different values of the permittivity. The problem of excitation of the resonator was solved with the use of electromagnetic analysis in the time domain.

Finding: In this work, the circuit design of the device was chosen, the results of calculation of the model of an axially symmetric shielded dielectric resonator are presented. The introduction of two coaxial ports allows the use of a measuring cavity in the "pass-through" scheme. This system can be used to measure the dielectric constant from the results of measurements of the resonance frequency of oscillation H_{01}.

Key words: resonator, dielectric parameters, dielectric constant, CAD CST Microwave Studio.

УДК 543.61:621.372.88

Д.П. Федюнин, А.И. Казьмин

ДАТЧИК КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННЫХ ЖИДКИХ СРЕД

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

В статье представлено новое волноводное устройство для измерения диэлектрической проницаемости авиационных жидких сред. Описывается моделирование устройства в CST Studio suit при измерении диэлектрической проницаемости авиационного керосина со свободной влагой. Характеристики волноводного устройства позволяют проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости авиационных жидких сред.

Ключевые слова: волноводное устройство, диэлектрическая проницаемость, авиационная жидкая среда, система электродинамического моделирования.

Высокие требования предъявляются к качеству авиационных жидких сред (АЖС), в том числе авиационного топлива на наличие посторонних фракций, например влаги и механических мелкодисперсных примесей различной физической природы, процентное содержание серы и удельной проводимости топлива. Особое внимание при этом должно уделяться безопасности контроля, а сам контроль должен быть оперативным и высокоточным.

Одним из перспективных направлений контроля характеристик АЖС является использование косвенных методов, основанных на измерении комплексной диэлектрической проницаемости исследуемой среды [1].

В статье рассмотрен новый датчик для измерения диэлектрической проницаемости АЖС. Датчик представляет собой волноводно-сильфонный преобразователь диэлектрической проницаемости АЖС в давление. Принцип работы датчика основан на адаптации величины зоны взаимодействия поля бегущих волн с жидкостью в гофрированном волноводе (сильфоне), размером которого удобно управлять пневматически. В рассматриваемом датчике полевое взаимодействие через СВЧ поля бегущих волн с АЖС без гальванического контакта обеспечивает бесконтактный неразрушающий принцип измерений параметров пожаро - взрывоопасных и потенциально опасных жидких сред.

На рисунке 1 показано устройство волноводно-сильфонного преобразователя диэлектрической проницаемости в давление.

Устройство состоит из сильфона (гофрированного участка волновода) 3, длина которого l линейно зависит от давления в нём P, являющегося вставкой регулярного круглого волновода 3', в котором петлёй 5 возбуждается волна типа H_{01} от генератора СВЧ (клеммы 3, 4) с постоянной длиной волны $\lambda_г$. Трубопровод 2, расположенный аксиально и закреплённый вдоль оси волновода радиопрозрачными вставками 4, содержит анализируемую среду 1 с параметром ε, поступающую в зону взаимодействия через патрубки 2' и 2''. Клеммы 1 и 2 - выводы для сравнения фаз двух колебаний до и после сильфона подключены к дифференциальному векторному фазометру, вырабатывающему управляющий сигнал при отклонении разности фаз волны до и после сильфона от заданной величины Δφ (π или 2π), управляющий источником пневмосигнала P. Набег фазы зависит от переменной l = f(P) и средней по объёму диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ср}$= f(ε). Реализуется нулевой компенсационный метод измерения давления P = f(ε) при постоянстве набега фазы Δφ. Рассмотрим случай распространения волны H_{01} в сильфонном отрезке нерегулярного волновода с целью получения статической характеристики, зависимости P = f(ε).

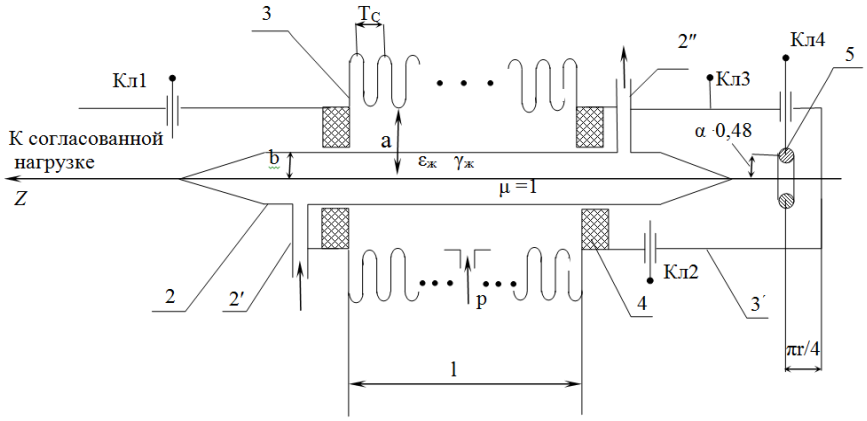


Рис. 1. Волноводно-сильфонный преобразователь диэлектрической проницаемости в давление

Для применения датчика в аналитических целях получим величину средней диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ср}$ по объёму взаимодействия ограниченного длиной сильфона l:

$$l = \lambda_{сильф} \text{ при } \Delta\varphi = 0{,}2\pi,$$
$$l = \lambda_{сильф}/2 \text{ при } \Delta\varphi = \pm\pi,$$

где $\lambda_{сильф}$ – длина волны H_{01} в сильфонном отрезке.

Оптимальным является фиксированный набег фазы $\Delta\varphi = \pm\pi$, так как в этом случае измеритель выполняет роль устройства поиска нуля (минимума) разности двух противофазных когерентных колебаний (до и после сильфона). Величина этого минимума разности амплитудных (или действующих) значений двух колебаний позволяет судить о величине затухания волны H_{01}, прошедшей длину l, что при практическом пренебрежении потерями в стенках сильфона на длине l даёт возможность определять по величине этого минимума проводимость жидкости $\gamma_ж$ (при $\gamma_ж = 0$ – минимум равен нулю).

С учётом тождественности мгновенной картины поля волны H_{01} на длине $l = \lambda_{сильф}/2$ и колебаний H_{011} в объемном резонаторе при его длине $l = \lambda_{сильф}/2 = \lambda_г/2$ величина $\varepsilon_{ср}$ определяется выражением

$$\sqrt{\varepsilon_{ср}} = F^{1/2}\{B + \varepsilon_ж A\}C^{-1}\{D + \varepsilon_ж E\}^{-1/2}.$$

Фазовая скорость волны H_{01} в сильфоне

$$V_{фH01} = V_ф\left[1 - \left(\lambda_г / \lambda_{крH01}\right)^2\right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где $V_ф$ – скорость волны в свободном пространстве, заполненном диэлектриком с параметром $\varepsilon_{ср}$; $\lambda_{крH01} = 1{,}639a$ – критическая длина волны H_{01} в круглом волноводе.

Набег фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f_г}{V_{фH01}} l = k_ф \beta_г l = \beta_{сильф} l, \quad (2)$$

где $\beta_г = (2\pi / \lambda_г)$; $k_ф$ – безразмерный фазовый коэффициент равный $k_ф = \sqrt{\varepsilon_{ср}}\sqrt{1-(\lambda_г / \lambda_{крН01})^2}$; $\beta_{сильф}$ – коэффициент распространения волны H_{01} в сильфоне с диэлектриком.

Пусть фиксированный набег фазы $\Delta\varphi = \pm\pi$ (или 2π). Тогда из (2) следует зависимость длины l отрезка сильфонного волновода от величины $\varepsilon_ж$, т.е.:

$$l = \frac{\lambda_г}{2}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{ср}}}\frac{1}{\sqrt{1-0.372(\lambda_г / a)^2}} = \frac{\Lambda}{2}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{ср}}} = \frac{\Lambda}{2}\frac{C\{D+\varepsilon E\}^{1/2}}{F^{1/2}\{B+\varepsilon A\}}, \quad (3)$$

где Λ – длина волны в пустом отрезке сильфонного волновода, т.е. при $\varepsilon_ж = 1$. Влияние диэлектрической трубки на эту величину легко учесть методом «малых» возмущений.

Из выражения (3) следует:

– при $\sqrt{\varepsilon_{ср}} = 1$, что соответствует минимальному значению диапазона измерения $\varepsilon_ж = 1$ (пустая трубка), можно получить при заданных конструктивно параметрах сильфона: а=0,02 м, l_{max}, где

$$l_{max} = \frac{\lambda_г}{2}\frac{1}{\sqrt{1-0{,}372(\lambda_г / a)^2}},$$

значение рабочей длины волны (при l_{max} соответствующей величине P_{max}):

$$\lambda_{г.раб} = \frac{2al_{max}}{\sqrt{a^2 + 1{,}488 l_{max}^2}}, \quad (4)$$

при условии а < 1,639 $\lambda_г$;

– общий случай:

$$\lambda_{г.раб} = \frac{2al_{max}\sqrt{\varepsilon_{ср.min}(\varepsilon_{min})}}{\sqrt{a^2 + 1{,}488(l_{max})^2 \varepsilon_{ср.min}}}, \quad (5)$$

здесь $l_{max}(\varepsilon_{cpmin}) = l_{max}(\varepsilon_{min})$ при $P = P_{max}$.

Из выражения (3) видно, что базовую величину сильфона

$$l_0 = \frac{\Lambda}{2}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{ср.н}}} \quad (6)$$

можно выбирать любую, конструктивно удобную, варьируя величину $\lambda_г/a$, изменяя $\lambda_г$ при обычно фиксированной величине а, при условии, что величина $0{,}372(\lambda_г/a)^2 < 1$, т.е. $\lambda_г < 1{,}639a$, избегая приближения $\lambda_г$ к 1,639а, так как при этом увеличивается погрешность измерения Δl от нестабильности $\lambda_г$ (режим работы должен быть далёк от критического). Величина $\varepsilon_{срн}$ в (6), которой соответствует значение l_0, должна соответствовать верхнему значению $\varepsilon_в$ диапазона его измерения, так как длина сильфона увеличивается при уменьшении величины

ε, т.е. при $\varepsilon_в$ сильфон должен обладать минимальной длиной при давлении в нём $P=P_{атм}$, и при измерении ε работать на растяжение, так как избыточное давление создать легче, и оно реализуется точнее и стабильней.

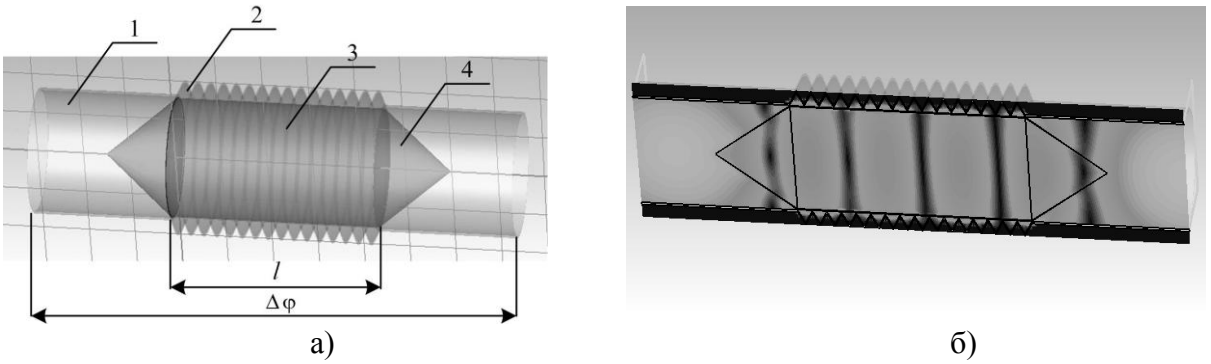
Для исследования характеристик рассматриваемого волноводного датчика разработана его трехмерная электродинамическая модель в среде CST Studio suit. На рисунке 3а показан общий вид разработанной модели. Модель состоит из сильфона (гофрированного участка волновода) – 2, длина которого l линейно зависит от давления в нём P, являющегося вставкой регулярного круглого волновода – 1, в котором возбуждается волна типа H_{01} с постоянной длиной волны $\lambda_г$. Трубопровод – 4, расположенный и закреплённый вдоль оси волновода, содержит анализируемую среду – 3 с параметром $\varepsilon_ж$.

Для создания условий соответствующих реальной практической ситуации были оценены возможности датчика по измерению влагосодержания в авиационном керосине

Определение малых примесей влаги в авиационном керосине возможно благодаря очень высокой относительной диэлектрической проницаемости воды 80, во много раз большей, чем у большинства исследуемых веществ.

Набег фазы $\Delta\varphi$ зависит от переменной длины зоны взаимодействия электромагнитной волны с анализируемой жидкостью $l = f(P)$ и средней по объёму взаимодействия диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ср} = f(\varepsilon)$. Распределение напряженности электрического поля в рассматриваемой системе для f=8,5 ГГц и авиационного керосина с $\varepsilon = 2.1$ на рисунке 3б.

На разработанной электродинамической модели проведено исследование зависимости начальной фазы φ_0 на выходе рассматриваемой системы от длины сильфона l и диэлектрической проницаемости ε авиационного керосина. Полученные данные подтверждают теоретические зависимости.



а) б)

Рис. 3. Модель сильфонного измерителя АЖС

На рисунке 4 показана зависимость начальной фазы сильфона от длины сильфона, а на рисунке 5 от диэлектрической проницаемости авиационного керосина.

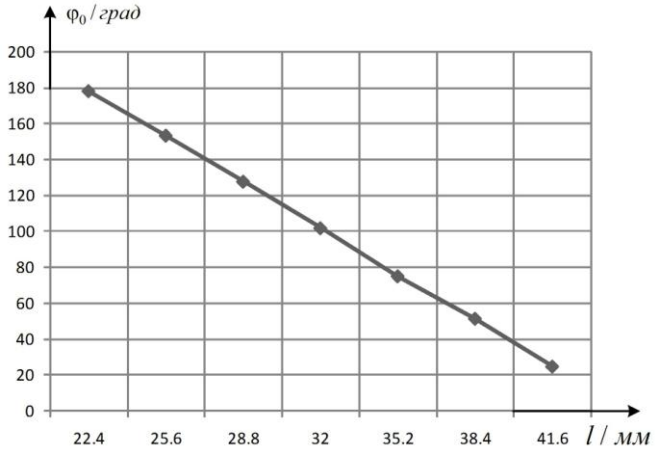


Рис. 4. Зависимости начальной фазы от длины сильфона

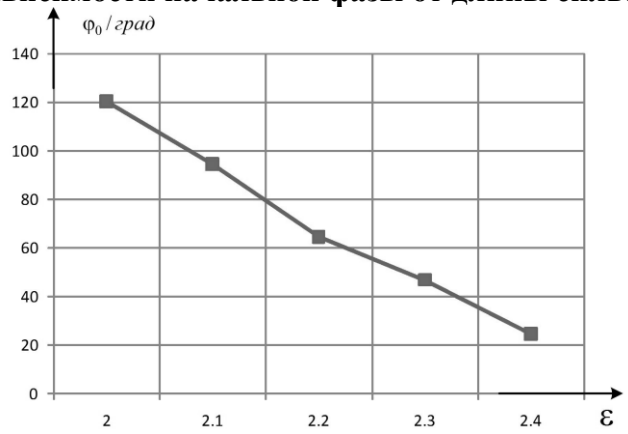


Рис. 5. Зависимости начальной фазы от диэлектрической проницаемости авиационного керосина

В настоящее время перспективно использование СВЧ-устройств для контроля электрофизических параметров различных жидких материалов в авиационной и различных других отраслях промышленности. Несмотря на большое количество работ по данной тематике существует еще множество не исследованных электродинамических эффектов, которые можно применить для измерения электрофизических параметров жидких материалов.

В статье представлен волноводный датчик контроля диэлектрической проницаемости авиационных жидких сред. Разработанный волноводный датчик позволяет повысить оперативность и точность измерения диэлектрической проницаемости гетерогенных жидких сред. В нем полностью отсутствует гальванический контакт с измеряемой средой. Конструкция датчика позволяет решать конструктивно-оптимизационные задачи.

Исследованы возможности датчика по измерению диэлектрической проницаемости гетерогенных дисперсных жидких сред. Проведенное электродинамическое моделирование в среде CST Studio suit подтверждает принципиальную возможность практического применения волноводного датчика для измерения влагосодержания в авиационном керосине.

Библиографический список

1. Казьмин, А.И. Волноводные способы и устройства контроля состава и свойств авиационных жидких сред / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Ю.Н. Черных. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. 208 с.

D. P. Fedyunin, A.I. Kaz'min

THE SENSOR FOR MEASUREMENT QUALITY AVIATION LIQUID MEDIA

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

In this paper a new waveguide device for control the dielectric permittivity of heterogeneous dispersed liquid media is presented. It is spoken in detail CST Studio suit simulation device when measuring the dielectric constant of aviation fuel with a free moisture and mechanical impurity. Characteristics waveguide device allows to perform high precision measurement of the permittivity heterogeneous liquid media.

Keywords: waveguide device, dielectric permittivity, aviation liquid media, electrodynamic simulation system

УДК 004.056

Н.Н. Акимов

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП

Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ
«Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

В работе приводится классификация существующих методов оценки рисков кибер-безопасности АСУ ТП критически важных промышленных объектов. Рассматриваются положения основных стандартов, а также руководящих документов.

Ключевые слова: кибербезопасность; АСУ ТП; оценка рисков.

Количество кибератак на объекты критически важной инфраструктуры неуклонно растет по всему миру [1, 2], так же как и число инцидентов, связанных с нарушением безопасности систем оперативного диспетчерского управления и сбора данных (*SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition*), которые являются неотъемлемой частью современных АСУТП и обеспечивают интерфейс между человеком и системой управления[3]. Эти обстоятельства обуславливают необходимость разработки эффективных методов оценки и управления рисками кибербезопасности АСУ ТП[1, 3].

В настоящее время предложен ряд подходов к оценке рисков информационных систем (ИС),используемых в промышленности, в том числе:

- Оценка критических эксплуатационных угроз и уязвимостей(*OCTAVE - Operationally Critical Threat and Vulnerability Evaluation*)[4];
- методанализаиуправлениярискамиЦентральногоагентстваповычислительнойтехникеителекоммуникациямправительстваВеликобритании (*CRAMM – Central Computer and Telecommunications Agency Risk Analysis and Management Method*)[5];
- консультативный, целевой и бифункциональный анализ рисков (*COBRA – Consultative, Objectiveand Bifunctional Risk Analysis*[6];
- консультативный и целевой анализ рисков(*CORAS -Consultative and Objective Risk Analysis)*[7, 8];
- основанная на модели, методология оценки рисков для систем, критичных по безопасности (*Model-Based Risk Assessment methodology for security-critical systems*).

Под риском информационной безопасности [9] понимается возможностьтого, чтоданная угрозасможетвоспользоватьсяуязвимостьюактиваилигруппыактивовитемсамымнанесетущербор ганизации.

Количественная оценка риска определяется, в зависимости от вероятности того, что с использованием некоторой уязвимости угроза будет реализована и от последствий соответствующего инцидента [3, 8].

Не смотря на то, что существует ряд подходов к оценке риска ИС, непосредственное применение этих методов для анализа уровня безопасности АСУ ТП затруднено из-за особенностей *SCADA*-систем. Поэтому методология оценки риска должна быть скорректирована, чтобы соответствовать особенностям *SCADA*-систем.

Оценка рисков в АСУ ТП помогает определить приоритетность компонентов системы с точки зрения их важности для успешной работы системы в целом и с точки зрения степени их уязвимости к кибератакам. С другой стороны оценка рисков позволяет ранжировать угрозы с точки зрения опасности, которую они представляют и вероятности их реализации. Результаты оценки рисков применяются при разработке политики безопасности, системы защиты и для рационального распределения материально-технических ресурсов при построении системы кибербезопасности[2].

Процесс менеджмента риска, соответствующий [9] представлен на рис. 1.

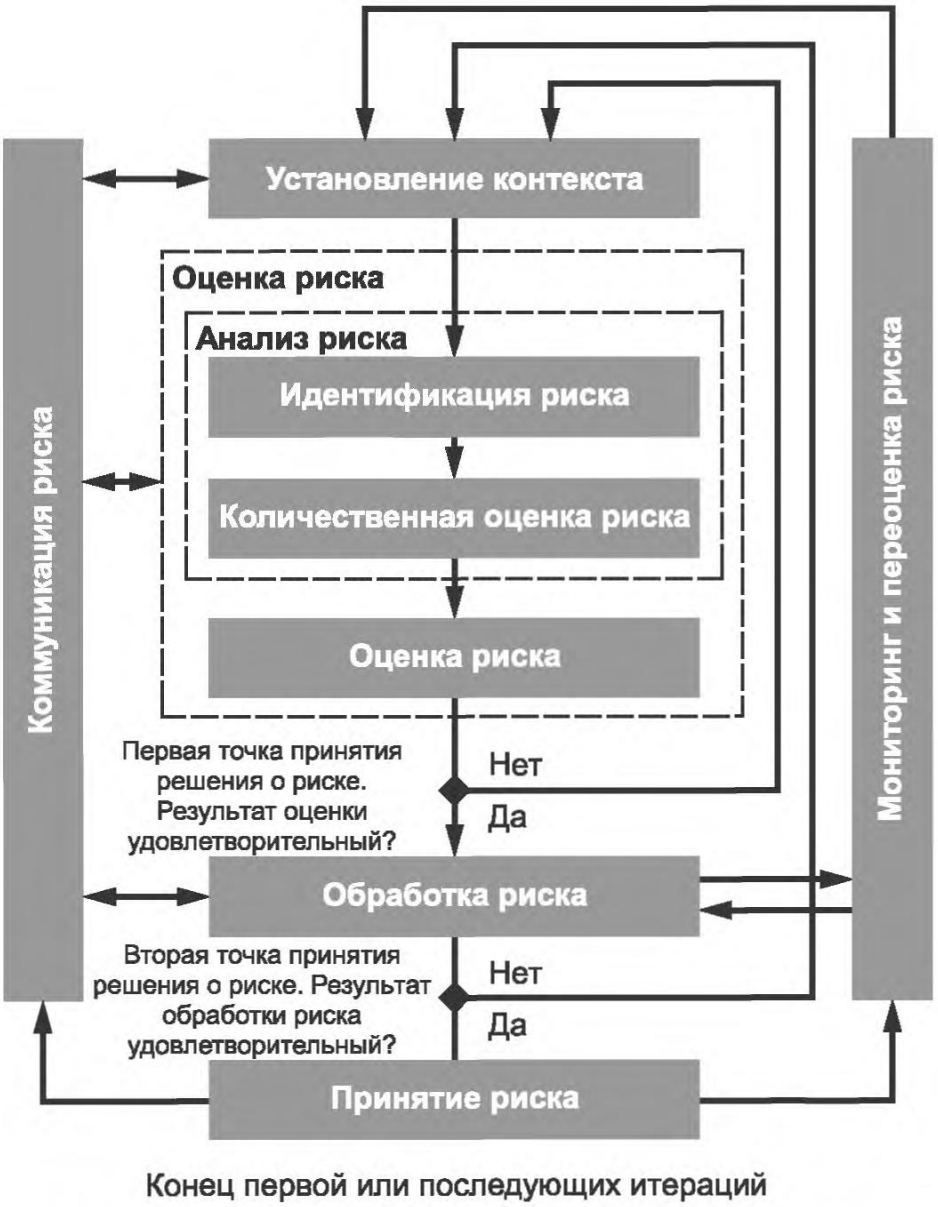


Рис. 1.Процесс менеджмента риска информационной безопасности[9]

Процесс менеджмента риска информационной безопасности состоит из[9] установления контекста, оценки риска, обработки риска, принятия риска, коммуникации риска (обмена информацией относительно риска), мониторинга и переоценки риска.

Стандарт [9] обеспечивает следующие определения для процедур, входящих в процесс менеджмента риском.

- **Идентификация риска** –процесс нахождения, составления перечня и описания элементов риска.
- **Количественная оценка риска –** процесс присвоения значений вероятности и
- последствий риска.
- **Обработка** риска заключается в выборе мер и средств контроля и управления для снижения, сохранения, предотвращения или переноса рисков, а также в определении плана обработки рисков.
- **Принятие** риска ИБ Должно быть принято решение о принятии рисков и установлена ответственность за это решение, что должно быть официально зарегистрировано.

- **Коммуникация риска –** обмен информацией о риске или совместное использование этой информации лицом, принимающим решение, и другими причастными сторонами.

В первую очередь методы оценки рисков подразделяют на качественные и количественные. Качественные методы используют субъективную классификацию риска (например, низкий, средний, высокий).Количественные методы позволяют измерить риск численно.

Большинство количественных методов являются вероятностными (*probabilisticmethods*). Иногдариски измеряют в финансовых затратах на восстановление в результате потерь, некоторые – в объёмах потерь продукта в натуральных единицах измерений (электричества – в Ваттах, нефти – в тоннах, газа – кубических метрах и др.).

Широко распространены методы оценки рисков на основе графов (*GB – GraphBased*). К ним относятся методы оценки рисков на основе деревьев (*TB - TreeBased*), например, на базе дерева отказов, дерева атак, дерева событий, дерева уязвимости и различных комбинаций из вышеперечисленных, а также другие методы оценки риска на основе направленных графов. Обычно в этих методах учитываются вероятности различных событий. Так методы на базе деревьев событий направлены на определение вероятности конкретного события или совокупности событий, как правило, неблагоприятных для безопасности [10]. Основным отличием между различными методами на основе деревьев, является целевое событие, вероятность которого оценивается. Среди вероятностных методов на базе графов для SCADA-систем разделяются индуктивные и дедуктивные методы. В индуктивных методах реализуется прямой поиск (например, по дереву событий), позволяющий отследить возможные причины до нежелательных событий. В дедуктивных методах реализуется обратный поиск (например, по дереву атак), который позволяет проследить нежелательные события до их возможных причин [11, 12].

По уровню детализации (глубине) и охвату анализируемые методы можно разделить следующим образом.

- **Руководящие принципы** (*Guidelines*) описывают набор шагов, которые необходимо выполнить, либо, предполагая, что пользователь знает, как выполнять каждый шаг, либо, в лучшем случае, предоставляя ему ссылки на конкретные методы, которые могут быть использованы. Полное описание деятельности на каждом этапе отсутствует. Руководящие принципы направлены на охват большинства этапов процесса управления рисками. Охват возможных этапов руководящими принципами широк, в то время как уровень их детализации низок.
- **Методы специфической деятельности** (*Activity-specificmethods*), сосредоточены на подробном, глубоком описании (спецификации) конкретной деятельности, осуществляемой на определённом этапе процесса управления рисками. Уровень детализации высок, а охват с точки зрения этапов управления рисками напротив узок.
- **Подробно изложенные руководящие принципы** (*Elaboratedguidelines*) – представляют собой комбинации двух перечисленных выше категорий. Подробно изложенные руководящие принципы содержат обширный обзор многих или всех этапов процесса управления рисками и сосредоточены, в частности, на одной или нескольких конкретных видах деятельности в рамках этого процесса. Охват этапов процесса управления рисками здесь широк при достаточно высоком уровне детализации.

С точки зрения используемого математического аппарата среди методов оценки риска можно выделить следующие группы.

- **Методы на базе формул** (FB –Formula-basedmethods) – представляют собой методы, основанные на математических моделях риска, и содержащие алгоритмы для расчёта рисков или последствий инцидентов. Эти методы не используют какие-либо модели для оценки рисков, но могут предоставлять вспомогательную информацию в табличной или текстовой форме.

- **Методы на базе моделей** (MB –Model-basedmethods) – анализ рисков основан на графических моделях. Реализуются с помощью математических моделей для обеспечения вероятностного анализа. Можно выделить методы на базе графов и методы, основанные на других типах моделей.

В [13] отмечается, что во многих методах менеджмента риском информационной безопасности основное внимание уделяется анализу **угроз и уязвимостей.** При этом предусмотреть все возможные виды отказов или атак практически не возможно. В [13] рассматривается применение **цель-ориентированного** подхода к управлению рисками, способного обеспечить управление рисками даже в ситуациях, когда всесторонний список типов атак и отказов не может быть установлен. Перспективно дальнейшее исследование этого подхода для построения интеллектуальной системы управления кибербезопасностью АСУ ТП.

Библиографический список

1. Дмитриев С.М., Акимов Н.Н., Кольцов В.А. Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8 (15). С. 7-13.
2. Morgan H. Cyber security risk management in the SCADA critical infrastructure environment. EngManag J. 2013; 25(2): 38–45.
3. Cheminod M, Durante L, Valenzano A. Review of security issues in industrial networks. IEEE Trans Industr Inform 2013; 9(1): 277–93.
4. Alberts C, Dorofee A, Stevens J,Woody C. Introduction to the OCTAVE approach. Software Engineering Institute; 2003.
5. Yazar Z. A qualitative risk analysis and management tool – CRAMM. SANS Institute; 2002.
6. RiskWorld. <http://www.riskworld.net/>. [accessed 16.10.15]. RISI. Industry attacks growing. October 14. <http://www.isssource.com/risi-industry-attacks-growing>; 2013 [accessed 23.01.15].
7. Aagedal J, Braber D, Dimitrakos T, Gran B, Raptis D, Stolen K. Model-based risk assessment to improve enterprise security. In: Proceedings of the sixth international enterprise distributed object computing conference. 2002. p. 51–62 EDOC'02.
8. Stolen K, den Braber F, Dimitrakos T, Fredriksen R, Gran B, Houmb S, et al. Model-based risk assessment – the CORAS approach. In: 1st iTrust workshop. 2002.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.
10. Patel S, Graham J, Ralston P. Quantitatively assessing the vulnerability of critical information systems: a new method for evaluating security enhancements. Int J Inf Manage 2008;28(6):483–91.
11. Ralston P, Graham J, Hieb J. Cyber security risk assessment for SCADA and DCS networks. ISA Trans 2007;46(4):583–94.
12. Taylor C, Krings A, Alves-Foss J. Risk analysis and probabilistic survivability assessment (RAPSA): an assessment approach for power substation hardening. In: Proceedings of ACM workshop on scientific aspects of cyber terrorism (SACT), vol.64. Washington, DC; 2002.
13. The Open Group. Dependency modeling (O-DM). Constructing a data model to manage risk and build trust between interdependent enterprises. Open Group Standard; 2012.

N.N. Akimov

ANALYSIS OF THE METHODS OF EVALUATING CYBER-SECURITY RISK IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM

Branch of RFNC-VNIIEF
«Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye Sedakov»

The work is devoted to the classification of existing methods for assessing the cybersecurity risks of automated process control system. The provisions of the main standards as well as the guidance documents are considered.

Keywords: cybersecurity; automated process control system; risk assessment.

УДК 004.056

Н.Н. Акимов, В.Р. Милов, Ю.С. Егоров

ЭЛЕМЕНТЫ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается подход к обеспечению кибербезопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами критически важных промышленных объектов, таких как атомные электростанции. Рассматриваются основные понятия кибербезопасности и связи между ними. Предложена концептуальная модель системы киберзащиты.

Ключевые слова: кибербезопасность; киберугроза; кибератака; атомная электростанция; автоматизированная система управления технологическими процессами.

Сложная геополитическая обстановка и развитие средств проведения компьютерных атак заставляют пересмотреть используемые подходы к обеспечению кибербезопасности. Анализ защищенности ряда широко используемых автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) продемонстрировал наличие дефектов и уязвимостей, использование которых злоумышленником позволяет не только снижать ключевые показатели стойкости и обходить механизмы функциональной безопасности, но и реализовывать атаки, напрямую влияющие на промышленную безопасность, а также способные стать причиной техногенных катастроф [19].

К критически важным промышленным объектам, несомненно, относятся атомные электростанции (АЭС). Применение СВБУ в составе АСУ ТП для реализации различных функций системы управления на АЭС [3] приводит к появлению нового типа слабых мест в системах защиты и безопасности, так называемых киберугроз, которые должны быть тщательно и всесторонне рассмотрены. Потенциальная реализуемость киберугрозы для систем управления промышленных объектов, в частности для АЭС, подтверждена как в ходе экспериментов, проводимых различными структурами, ответственными за безопасность данных систем, так и уже случившимися инцидентами по кибербезопасности [1, 2].

Под **кибербезопасностью** в общем случае понимается свойство защищённости активов от угроз доступности, целостности, конфиденциальности, которые должны быть обеспечены в киберпространстве, в отличие от информационной безопасности, в которой речь идёт о защите информации: от кражи, от изменения, от возможности создания препятствий при ее обработке и передаче.

В настоящее время в различных концептуальных, а также отечественных и зарубежных нормативных документах сложился ряд направлений толкования определения «киберпространство», отражающего различные аспекты военной политики, международного права, критических информационных инфраструктур, информационно-коммуникационных технологий и компьютерных сетей [5-16].

Под **киберпространством** (cyberspace) понимается электронная среда в (посредством) которой информация создаётся, передаётся, принимается, хранится, обрабатывается и уничтожается [17].

Отмечается [17], что Российская точка зрения на информационную безопасность делает акцент на всеобъемлющем характере информации, где киберпространство является только одним из элементов системы. Информация рассматривается как естественная и искусственная. Киберпространство является искусственной средой.

Зарубежная точка зрения, в частности Американская, акцентируется на рассмотрении данных, появляющихся в электронных инфраструктурах [17]. Так **киберинфраструктура** (cyber

infrastructure) определена как совокупность людей, процессов (в том числе управляющих), и систем, составляющих киберпространство [17].

В общем смысле под угрозой понимается событие, действующее лицо, которое потенциально может нанести ущерб через существующие уязвимости (недостатки), уязвимость, в свою очередь, представляет собой неотъемлемое свойство практически любого элемента инфраструктуры информационных технологий: компьютера, телекоммуникационного оборудования, программного обеспечения, серверного оборудования, контроллеров и т.п.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1:2004 определяет **угрозу** (threat) как потенциальную причину нежелательного инцидента, результатом которого может быть нанесение ущерба системе или организации.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1:2004 определяет **уязвимость** (vulnerability) как слабость одного или нескольких активов, которая может быть использована одной или несколькими угрозами.

Таким образом, **киберугрозу** (cyberthreat) можно определить как потенциальную причину нежелательного инцидента, результатом которого может быть нарушение работы автоматизированной системы в результате кибератаки.

При этом, **кибератака** (cyberattack) – несанкционированное воздействие на автоматизированную систему специальными программными средствами с целью нарушения её работы (нанесения вреда).

Понятие «вред» включает в себя приведение в упадок, воспрещение действий – временно или постоянно [17].

Кибератакой может быть как применение специальных программных средств (кибероружия) против средств киберзащиты, так и против целей в физическом мире, однако, считается [17], что кибератакой не является применение не-кибероружия против средств киберзащиты или против целей в физическом мире.

Средства киберзащиты обеспечивают возможность защитить и/или отразить кибератаку, предупредить использование злоумышленником преимуществ в киберпространстве и могут быть использованы в качестве средств сдерживания в киберпространстве в рамках обеспечения кибербезопасности.

Основные понятия кибербезопасности и характер связей между ними, представлены в виде семантической сети (рис. 1), которая разработана на основе соответствующих схем из стандартов ISO 27032:2012 и ISO/IEC 15408-1 [4]. В отличие от этих стандартов дополнительно показаны понятия «Требования» и «Уязвимости АСУ ТП», а также вводится система защиты, которая направлена на обеспечение защищенности критически важного объекта управления.

Система защиты в процессе обеспечения кибербезопасности должна выявлять существующие уязвимости АСУ ТП, затем реализовывать меры защиты, которые способствуют устранению уязвимостей, посредством противодействия кибератакам и нейтрализации нарушителей, что в целом обеспечит снижение рисков для объекта управления, и соответственно повысит уровень его защищенности.

В соответствии с Приказом ФСТЭК России № 31 защита информации, обрабатываемая в АСУ ТП, является составной частью работ по её созданию и эксплуатации и обеспечивается на всех стадиях её создания и в ходе эксплуатации путём принятия организационных и технических мер защиты информации (встроенные в АСУ ТП функции безопасности (информационной и функциональной); наложенные на АСУ ТП средства защиты информации (СрЗИ); другие меры физической и функциональной безопасности) в рамках системы защиты.

Целями мер обеспечения защищённости является защита от нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации в АСУ ТП.

Меры защиты могут быть направлены на предотвращение киберугроз (относятся меры, обеспечивающие предупреждение и упреждение от планирования проникновения, организации и реализации кибератаки); противодействие кибератакам (относятся меры, препятствующие или ограничивающие воздействие на объект защиты) и смягчение (восстановление) последствий

кибератак (относятся меры устранения (ликвидации) последствий кибератак (частичной, либо полной их нейтрализации).

Исходя из закона № 149-ФЗ защиту информации можно разделить на несколько уровней:

1. Правовой уровень обеспечивает соответствие государственным стандартам в сфере защиты информации и включает авторское право, указы, патенты и должностные инструкции.
2. Грамотно выстроенная система защиты не нарушает права пользователей и нормы обработки данных.
3. Организационный уровень позволяет создать регламент работы пользователей с конфиденциальной информацией, подобрать кадры, организовать работу с документацией и носителями данных.
4. Регламент работы пользователей с конфиденциальной информацией называют правилами разграничения доступа. Правила устанавливаются руководством совместно со службой безопасности и поставщиком, который внедряет систему безопасности.
5. Правила разграничения доступа разрабатываются на организационном уровне и внедряются на этапе работ с технической составляющей системы.
6. Технический уровень разделяют на физический, аппаратный, программный и математический (криптографический).

Меры защиты должны быть внедрены на протяжении всего жизненного цикла АСУ ТП, включая этапы разработки, пусконаладочных работ, промышленной эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и технической поддержки.

Немаловажным вопросом при обеспечении кибербезопасности является рассмотрение различных моделей информационной безопасности, которые могут применяться при построении системы защиты.

Можно выделить три основных модели: концептуальная модель, математическая модель и функциональная модель информационной безопасности.

Концептуальная модель отвечает на общие вопросы и отражает схематично общую структуру модели информационной безопасности, на которой как на стержне строятся остальные модели и концепции информационной безопасности [18].

Концептуальная модель информационной безопасности включает в себя: источники информации; приоритет или степень важности информации; источники угроз; цели угроз; угрозы; способы доступа; направления защиты; средства защиты; методы защиты.

Построение концептуальной модели информационной безопасности принято разделять на несколько различных уровней [18]. В большинстве случаев достаточно двух уровней – верхнего, организационно-управленческого, который охватывает всю информационную систему, и нижнего или сервисного, который относится к отдельным подсистемам самой информационной системы и различным сервисам.

Математическая и функциональные модель на прямую связаны друг с другом. Математическая модель представляет собой формализованное описание сценариев в виде логических алгоритмов представленных последовательностью действий нарушителей и ответных мер. Расчетные количественные значения параметров модели характеризуют функциональные зависимости, описывающие процессы взаимодействия нарушителей с системой защиты и возможные результаты действий. Именно такой вид модели чаще всего используется для количественных оценок уязвимости объекта, построения алгоритма защиты оценки рисков и эффективности принятых мер.

В зависимости от целей и решаемой задачи, может быть построено и применено множество математических моделей части системы информационной безопасности, которые помогут еще на стадии проектирования системы информационной безопасности оценить ее эффективность.

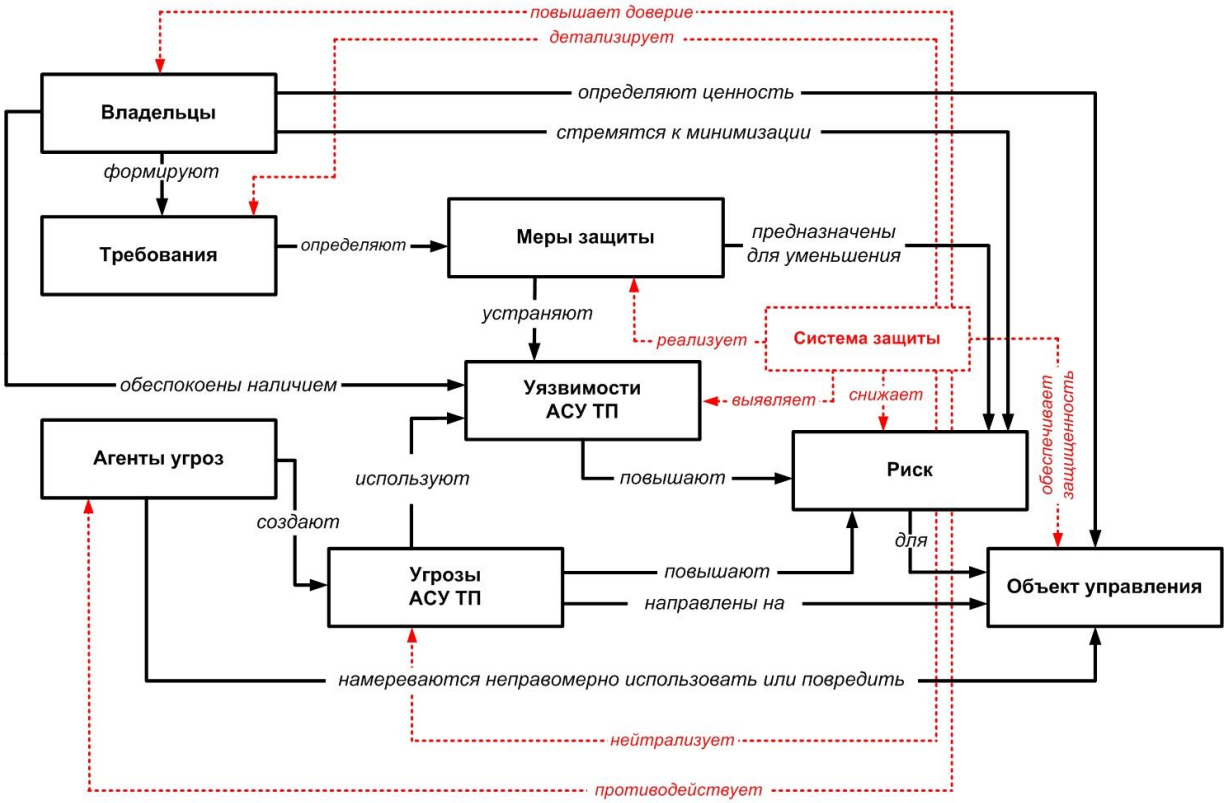


Рис. 1.Основные понятия кибербезопасности и отношения между ними

В настоящее время выработана обширная терминология в области информационной безопасности, которая отражена в ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000 и других нормативных документах, однако определения терминов из различных нормативных документов зачастую несколько отличаются.

В законодательстве РФ на текущий момент понятия киберпространство и кибербезопасность отсутствуют. Вынесенная на обсуждение Советом Федерации РФ «Концепция стратегии кибербезопасности» 10.01.2014 года не была принята.

Не смотря на это, вопросы кибербезопасности активно обсуждаются и развиваются международным сообществом. Выпущен международный стандарт ИСО/МЭК 27032:2012 Руководящие указания по кибербезопасности «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Руководящие указания по кибербезопасности» (ISO/IEC 27032:2012 Information technology – Security techniques – Guidelines for cybersecurity), который может быть взят за основу при исследовании кибербезопасности.

Таким образом, в области обеспечения кибербезопасности критически важных объектов актуальными являются вопросы выработки единой терминологический базы, позволяющей согласовать области информационной и кибербезопасности, а также выработки эффективных подходов к обеспечению киберзащиты наиболее ценных активов от киберугроз.

Библиографический список

1. Лукацкий А.В. Кибербезопасность ядерных объектов // Индекс безопасности. № 4 (115). С. 113 – 126.
2. Акимов Н.Н., Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Цыренов Д.В. Опыт и критический анализ применения российских и международных норм кибербезопасности для АСУ ТП АЭС. Информационная безопасность и кибербезопасность гражданских ядерных объектов: оценка угроз и определение путей их преодоления, Семинар, 12 июля 2017 г.

3. Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Менгазетдинов Н.Э. Новые кибернетические угрозы и методы обеспечения кибербезопасности в цифровых системах управления // Энергетик. 2012. №7. С. 18-23.
4. Марков А.С., Цирлов В.Л. Руководящие указания по кибербезопасности в контексте ISO 27032 // Вопросы кибербезопасности. 2014. №1(2). С. 28-35.
5. Безкоровайный М.М., Лосев С.А., Татузов А.Л. Кибербезопасность в современном мире: термины и содержание // Информатизация и связь. 2011. № 6. С. 27-33.
6. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Бутусов И.В. Кибербезопасность как основной фактор национальной и международной безопасности XXI века (Часть 1) // Вопросы кибербезопасности. 2013. № 1(1). С.2-9.
7. Зубарев И.В., Жидков И.В., Кадушкин И.В. Кибербезопасность автоматизированных систем управления военного назначения // Вопросы кибербезопасности. 2013. №1(1). С.10-16.
8. Казарин О.В., Тарасов А.А. Современные концепции кибербезопасности ведущих зарубежных государств // Вестник Российского государственного гуманитарного университета. 2013. № 14. С. 58-74.
9. Корченко А.Г., Бурячок В.Л., Гнатюк С.А. Кибернетическая безопасность государства: характерные признаки и проблемные аспекты // Безпека інформації. 2013. Т.1.№ 19. С. 40-44.
10. Старовойтов А.В. Кибербезопасность как актуальная проблема современности // Информатизация и связь. 2011. № 6. С. 4-7.
11. Masood R. Assessment of Cyber Security Challenges in Nuclear Power Plants
12. Security Incidents, Threats, and Initiatives. Report GW-CSPRI-2016-03 /
13. Cyber Security and Privacy Research Institute (CSPRI) of the George Washington University (GWU). 2016. – 40 p.
14. Штитилис Д., Клишаускас В. Особенности правового регулирования кибербезопасности в национальных законах Литвы, России и США: стратегии кибербезопасности // Вопросы российского и международного права, 2013, № 7-8, С. 80-100.
15. Юсупов Р.М., Пальчун Б.П. Безопасность компьютерной инфосферы систем критических приложений // Вооружение. Политика. Конверсия. 1993. №3. С. 23-31.
16. Walls A., Perkins E., Weiss J. Definition: Cybersecurity. Gartner. 2013. ID:G00252816. 4 p.
17. Двусторонний проект Россия-США по кибербезопасности. Основы критически важной терминологии. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://iisi.msu.ru/UserFiles/File/Terminology%20IISI%20EWI/Russia-U%20S%20%20bilateral%20on%20terminology%20RUS.pdf
18. Модели информационной безопасности [Электронный ресурс] Режим доступа: https://habrahabr.ru/company/vps_house/blog/347088.
19. Дмитриев С.М., Акимов Н.Н., Кольцов В.А. Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8 (15). С. 7-13.

N.N. Akimov, V.R. Milov, Y.S. Yegorov

ELEMENTS OF THE CONCEPTUAL MODEL FOR ENSURING CYBER-SECURITY OF CRITICALLY IMPORTANT INDUSTRIAL OBJECTS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Branch of «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics» (RFNC-VNIIEF)
«NIIIS named after Yu. Ye. Sedakov»

The paper discusses the approach to creating cybersecurity of automated process control systems for critical industrial objects, such as nuclear power plants. The basic concepts of cybersecurity and the relationship between them are considered. A conceptual model of the cybersecurity system is proposed.

Keywords: cybersecurity; cyber threat; cyber attack; nuclear power plant; automated process control system.

УДК 004.9

В.В. Алексеев, Д.В. Баранов, Ю.С. Егоров

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПОРУЧЕНИЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается возможность интеллектуализации процесса управления поручениям за счет самообучения с использованием системы поддержки принятия решений, включающей базу правил и базу моделей. Выявление и уточнение закономерностей в данных позволит уточнить используемые модели и повысить их адекватность реальным бизнес-процессам.

Ключевые слова: поддержка принятия решений; автоматизированная система; поручение; база знаний; интеллектуальный анализ данных.

Корпоративный менеджмент крупных международных корпораций сосредоточен на описании, анализе и оптимизации внутренних бизнес-процессов, в то время как в России многие компании, а также органы государственной власти используют в своей практике управление по поручениям [1].

Все стоящие перед организацией задачи расписываются вышестоящим руководителем вниз по управленческой иерархии нижестоящим руководителям. При этом основным и незаменимым атрибутом любого поручения является срок его исполнения, при наступлении которого требуется предъявить руководителю результаты. На практике, поручение не исполняется руководителями его получившими, а передается на исполнение непосредственно тем сотрудникам, которые и будут выполнять предусмотренные поручением задачи. Через некоторое время все, кто должен участвовать в исполнении поручения, получают от своих руководителей задачи и срок их исполнения, иногда в слабоструктурированном виде [1].

Проблема же чаще всего состоит в том, что затраченное на выдачу поручений время может быть значительным (иногда может даже достигать нескольких дней), а это, в свою очередь, уменьшает срок, оставшийся для исполнения самого поручения. При этом руководители, назначая задачу, своему подчиненному, дополнительно занижают срок исполнения, оставляя запас на проверку и согласование полученного результата, а также на переработку поручения исполнителем.

В результате, при сложной иерархической структуре, когда поручение попадает к исполнителю, срок его исполнения оказывается минимальным, поэтому исполнитель старается выполнить поручение максимально быстро, часто формально, чтобы «перекинуть» его обратно руководителю. Дополнительную сложность создают разные заинтересованные стороны, которые выдают фактически дублирующие друг друга поручения.

Намного сложнее исполнять поручение и тогда, когда в качестве соисполнителей поставлены сотрудники других территориально удаленных структур. Результаты при этом создаются совместно, после чего их еще надо согласовать со всеми заинтересованными сторонами. Такое масштабное согласование с учетом различных интересов может занять достаточно длительный промежуток времени и потребовать проведения множества совещаний. И только после того, как все соисполнители придут к единому мнению, результат будет продемонстрирован руководителю, который и выдал поручение изначально. Если руководителю не понравится результат – цикл может повториться несколько раз, но уже с большей скоростью, т.к. исполнители уже назначены.

Логика управления по поручениям приведена на рис. 1.

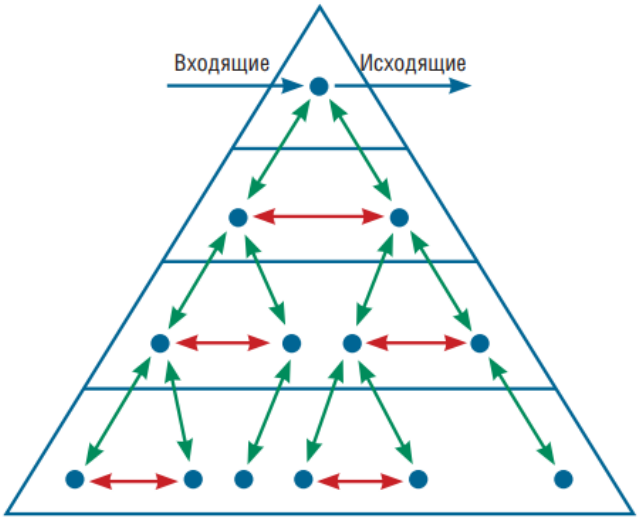


Рис. 1. Логика управления по поручениям [1]

Несмотря на всю бюрократичность управление по поручениям имеет и преимущества. Прежде всего, это простота менеджмента, поскольку система привычна и понятна многим руководителям. При этом она достаточно прозрачна, потому что всегда можно быстро найти ответственного за постановку задач, так как все документы и их перемещения фиксируются в журналах учета.

Однако длительные сроки исполнения заданий, связанных с назначением очень большого числа исполнителей, а также снижение общей активности в организации при отсутствии поручений – резко снижает результативность организации.

Таким образом, управление по поручениям является следствием использования функциональной системы управления в организации, которая не эффективна на конкурентных рынках и применяется для контроля над существующей инфраструктурой и перераспределения ресурсов.

С целью интеллектуализации процесса управления поручениями предлагается разработка автоматизированной системы (АС), обеспечивающей следующие функциональные возможности:

- коллективная работа с большим объемом поручений через единую базу данных;
- параметрический поиск с настраиваемым уровнем «похожести»;
- исключение дублирования поручений;
- повышение эффективности работы за счет мониторинга и анализа исполнения поручений;
- автоматизация рутинных функций за счет накопления базы знаний (БЗ) и самообучения;
- гибкая настройка оповещений;
- интеграция со сторонними системами учета поручений.

Важным аспектом интеллектуализации АС является способность ее адаптации к изменению внешних условий. Наиболее вероятным представляется будущая потребность в добавлении новых типов данных мониторинга и расширении существующих на новые поручения, а так же модернизация алгоритмов обработки информации на основе выявленных закономерностей в накопленных данных мониторинга, синхронизированных с бизнес-процессами.

Для выявления закономерностей возможно применение технологий интеллектуального анализа данных (Data mining). В качестве примера можно привести наиболее вероятную корреляцию между действиями над поручением и его параметрами.

С появлением возможности выявлять и уточнять закономерности в данных мониторинга можно говорить об адаптируемости АС к бизнес-процессам на основе приобретаемых о них знаний, а также об увеличении степени адекватности используемых моделей данных.

Самообучение возможно только при наличии в АС аналитической подсистемы с БЗ, включающей в себя как базу правил, так и базу моделей [2].

Под самообучением понимается выделение зависимостей действий над поручением от его параметров в системе поддержки принятия решений (СППР).

Общая схема работы СППР выглядит следующим образом (рис. 2):

1. На вход блока предварительной обработки поступают данные мониторинга.
2. Поступившие данные помещаются в блок оценки, затем они подаются в блок формирования решений и после взаимодействия пользователя с СППР – выдается решение.
3. Одновременно данные мониторинга поступают в БД, откуда они идут в аналитическую подсистему в блок извлечения знаний и интеллектуального анализа данных и блок обучения, на который в свою очередь оказывают воздействие эксперты и аналитики.
4. На основе полученных знаний от блока извлечения знаний интеллектуального анализа данных формируется база правил, а на основе данных от блока обучения - база моделей, что вместе составляет базу знаний, которая связана с блоком визуализации и через него с пользователем.
5. По мере обучения на данных мониторинга, уточняется база моделей, корректируется база правил, таким образом, база знаний начинает становиться все более адекватной реальным бизнес-процессам, а благодаря взаимодействию базы знаний с подсистемой поддержки принятия решений пользователь получает возможность принимать более взвешенные решения, или же поручения будут выполняться автоматически.

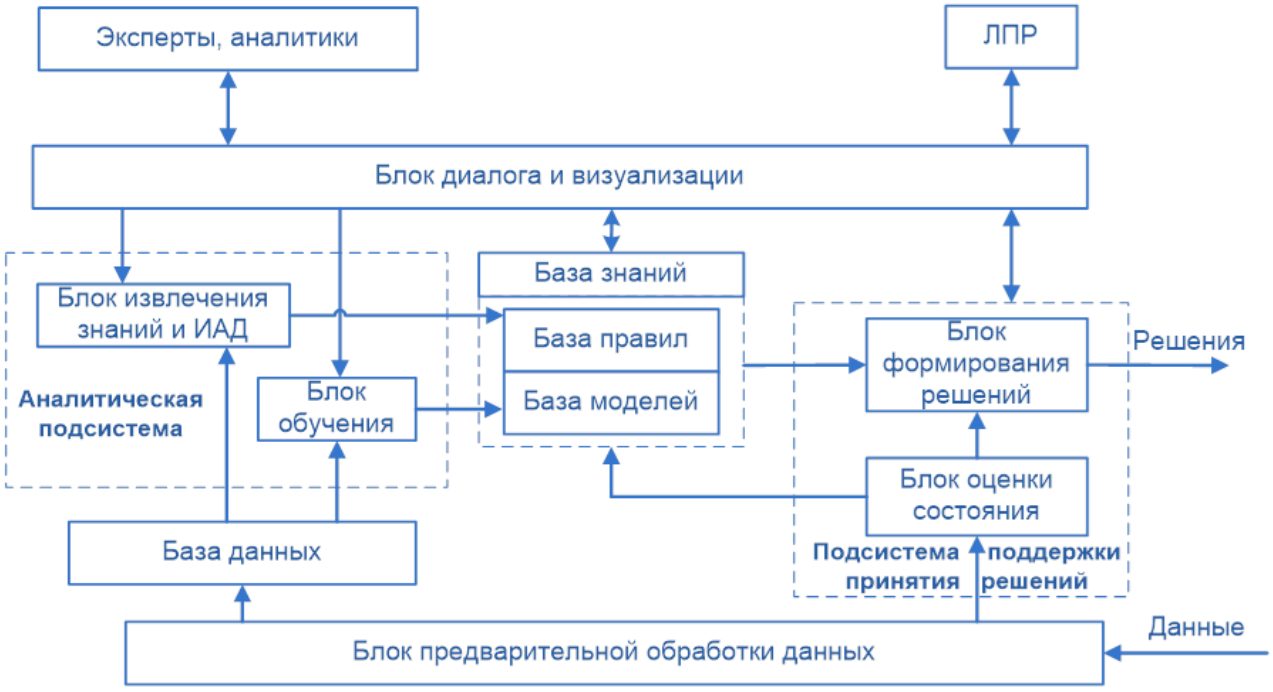


Рис. 2. Схема работы СППР [2]

На основе начальных знаний формируются начальные модели, которые можно применить для моделирования происходящих бизнес-процессов.

По мере накопления данных и их анализа происходит уточнение знаний, соответственно уточняются модели и их применение становится все более адекватно реальным бизнес-процессам (рис. 3).

Рис. 3. Процесс увеличения степени адекватности используемых моделей данных

На рисунке 4 представлена трёхуровневая архитектура АС.

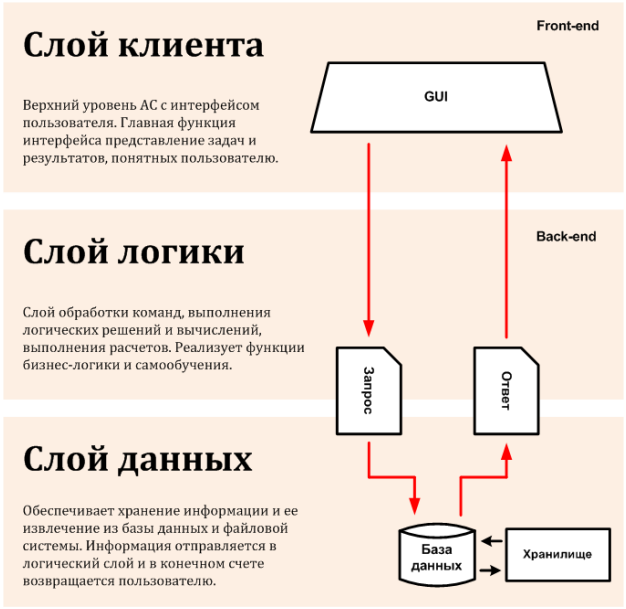


Рис. 4. Трёхуровневая архитектура АС

С внедрением АС с СППР руководитель сможет корректировать ход работ по поручениям и, при необходимости, привлечь дополнительных специалистов, которые сразу получат доступ ко всем наработанным данным и накопленным знаниям.

Библиографический список

1. Коптелов А.К. Российская управленческая специфика – управление по поручениям // Деловое совершенство. 2011. №10. С. 40-42.
2. Баранов В.Г., Милов В.Р., Суслов Б.А. Способы аналитической обработки для системы поддержки принятия решений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 2. С. 12-15.

V.V. Alekseev, D.V. Baranov, Y.S. Yegorov

TASKS MANAGEMENT PROCESS INTELLECTUALIZATION

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

The paper considers the possibility of intellectualizing the process of task management through self-learning using a decision support system that includes the rules base and model base.
Identifying and clarifying the patterns will increase the adequacy of models to real business processes.

Keywords: support for decision-making; automated system; task; knowledge base; data mining.

УДК 623.618.5: 355.354

А.Д. Афанасьев

ПОСТРОЕНИЕ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С НЕОДНОРОДНОЙ ТОРОИДАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

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

Предложено использование информационно-телекоммуникационных сетей с неоднородной тороидальной топологией в качестве основы авиационной системы связи. Показаны достоинства применения неоднородной тороидальной топологии.

Ключевые слова: система связи, тороидальная топология, сеть, узел коммутации

В настоящее время развитие авиационной связи связано с развертыванием и внедрением авиационных информационно-телекоммуникационных сетей, автоматизацией обработки сообщений и применением сжатия данных.

Применение цифрового телекоммуникационного оборудования при построении авиационных систем связи предоставляет должностным лицам органов управления авиационного формирования широкий набор телекоммуникационных услуг, включающий передачу речи, видео, электронных документов, электронной почты, а также доступ к информационным ресурсам. Это позволяет путем оперативного сбора, обработки, анализа разнородной информации, доведения задач до исполнителей в режиме времени, близком к реальному, своевременно принимать решения, а также повысить эффективность управления и организовать взаимодействие между подчиненными силами и средствами [1].

Структура большинства авиационных информационно-телекоммуникационная сетей повторяет структуру системы управления авиационного формированием и имеет иерархическую топологию (рис. 1).

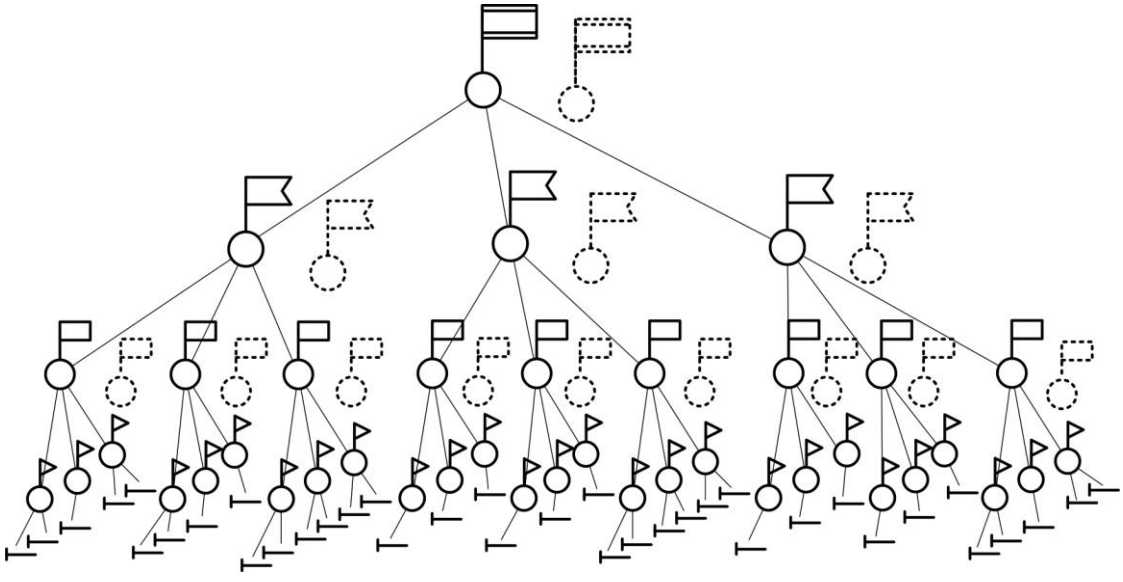


Рис. 1. Иерархическая структура топологии сети

Зачастую цифровым телекоммуникационным оборудованием оснащаются только стационарные объекты, использующие высокоскоростные проводные каналы связи, при этом наличие подвижных объектов и необходимость ведения информационного обмена с экипажами самолетов в воздухе не учитываются.

Необходимо отметить, что для решения данной проблемы не достаточно оснастить все, в том числе и подвижные, объекты цифровым телекоммуникационным оборудованием, обеспечить его сопряжение со средствами радиосвязи и на этой основе построить авиационную систему связи. Важно при этом, построить систему связи, соответствующую требованиям по устойчивости, пропускной способности, разведывательной защищенности, доступности и др. Для этого информационно-телекоммуникационная сеть, являющаяся основой авиационной системы связи, должна обладать топологической структурой близкой к оптимальной. Однако иерархическая топология авиационных сетей не отвечает данному требованию в полном объеме.

Возможным вариантом построения информационно-телекоммуникационной сети, как основы авиационной системы связи, является сеть с неоднородной тороидальной топологией [2].

Представленная сеть состоит из трех взаимосвязанных (вложенных) тороидальных однородных структур, образованных узлами коммутации различного типа. Тип каждого узла коммутации зависит от состава используемой аппаратуры и пропускной способности подключенных каналов связи. Также тип узла коммутации определяется положением в структуре и степенью вершины (количеством линий связи инцидентных узлу).

В первую подсеть входят узлы коммутации вышестоящих пунктов управления авиационного формирования, связанные каналами с максимально возможными пропускными способностями и максимальным расстоянием между соседними узлами (рис. 2).

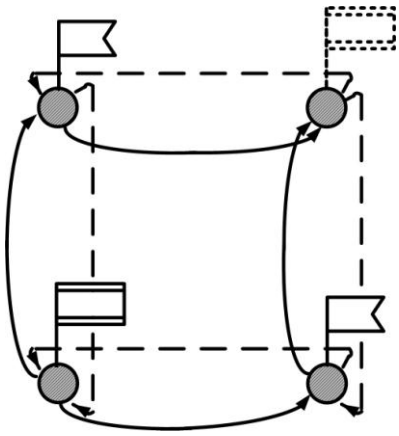


Рис. 2. Вариант первой подсети

Вторая подсеть образована узлами коммутации первой подсети и узлами коммутации подчиненных пунктов управления, связанными каналами связи меньшей пропускной способности, чем в первой подсети, при этом расстояние между соседними узлами вдвое меньше данного расстояния первой подсети (рис. 3).

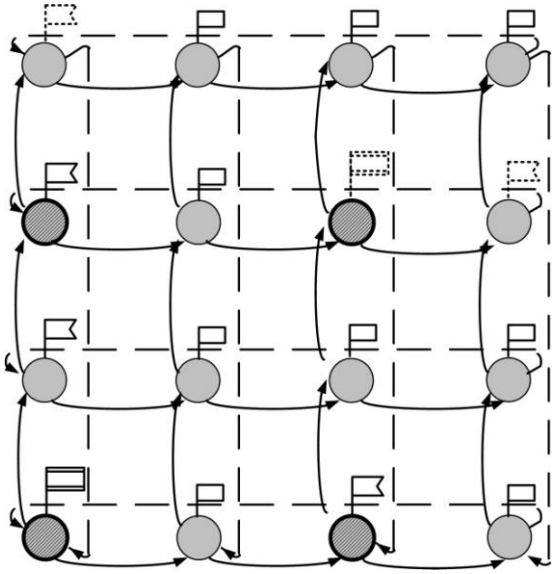


Рис. 3. Вариант второй подсети

В третью подсеть входят узлы коммутации второй подсети и узлы коммутации всех пунктов управления авиационного формирования, связанные низкоскоростными каналами связи, при этом расстояние между соседними узлами минимально (рис. 4).

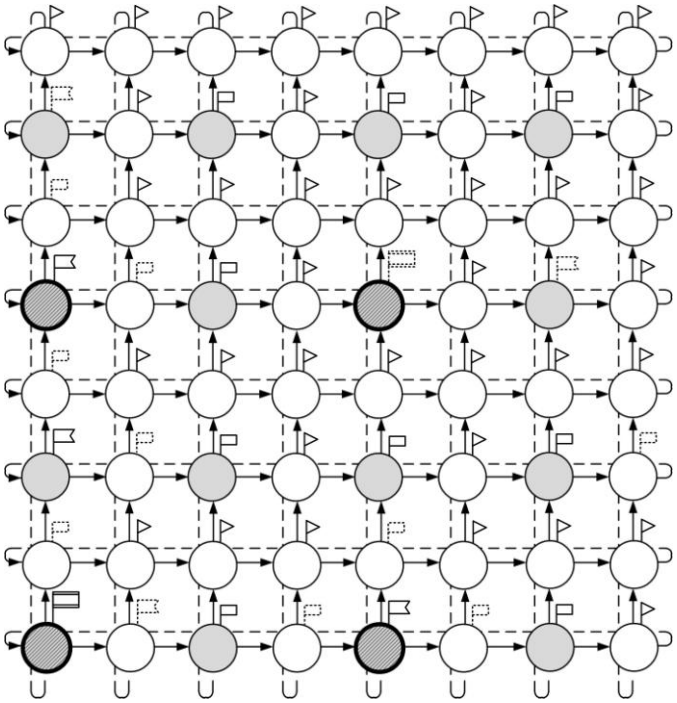


Рис. 4. Вариант третьей подсети

Полный состав варианта информационно-телекоммуникационной сети авиационного формирования показан на рис. 5.

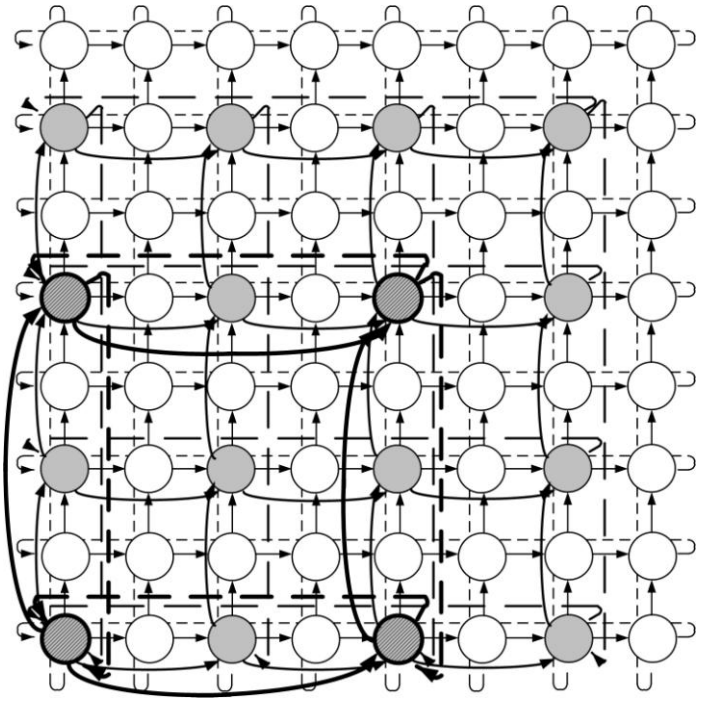


Рис. 5. Вариант сети с неоднородной тороидальной топологией

Для возможности обмена информацией с воздушными судами помимо телекоммуникационного оборудования все узлы коммутации или часть узлов коммутации необходимо оснащать средствами радиосвязи. Для обеспечения качественной связи с воздушными судами в частности по декаметровому каналу необходимо использовать способы автоматического установления и адаптивного ведения связи, например описанные в стандарте MIL-STD-188-141B или в стандарте HFDL [3].

Выводы

Построение авиационной системы связи на основе информационно-телекоммуникационной сети с неоднородной тороидальной топологией позволит распределить потоки информации в иерархической структуре системы управления авиационного формирования по всей сети, повысив тем самым пропускную способность системы связи. Помимо этого возможно использование каналов связи с меньшей скоростью, по сравнению с каналами связи в сети с иерархической топологией, что позволит применять не только проводные каналы связи, но и низкоскоростные радиоканалы, работающие в декаметровом диапазоне длин волн.

Библиографический список

1. Сидорин А.Н. и др. Информационные, специальные, воздушно-десантные и аэромобильные операции армий ведущих зарубежных государств: Информационно-аналитический сборник. М: Воениздат, 2001.

2. Головченко Е.В. Алгоритм маршрутизации в цифровых сетях связи с тороидальной топологией / Е.В. Головченко // Телекоммуникации. – 2012. – № 10. – С. 12-18.

3. Лузан Ю.С. Адаптивная радиосвязь в ДКМ диапазоне частот. Современное состояние и тенденции развития / Ю.С. Лузан, Н.П. Хмырова // Техника радиосвязи. Омский научно-исследовательский институт приборостроения. – Омск. – 2008. – № 13. – С 3-24.

A.D. Afanas'ev

CONSTRUCTION OF AVIATION COMMUNICATION SYSTEM USING INFORMATION AND TELECOMMUNICATIONS NETWORKS WITH NON-UNIFORM TOROIDAL TOPOLOGY

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

The use of information and telecommunication networks with non-uniform toroidal topology as the basis of the aviation communication system is proposed. The advantages of using non-uniform toroidal topology are shown.

Key words: communication system**,** toroidal topology, network, switching node

УДК 519.718:004.722

К. А. Батенков

СИНТЕЗ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ

Академия ФСО России

В работе рассмотрен подход к синтезу структур сетей связи на основе детерминированного показателя надежности – линейного функционала связности.

Ключевые слова: сети связи, надежность, коэффициент готовности, линейный функционал связности.

Введение

Анализ и синтез сетей связи, основанный на критериях устойчивости [1], предполагает рассмотрение простых и удобных для понимания показателей, слабо привязанных к классическому понятию вероятности выхода объекта из состояния работоспособности [2]. Целью использования подобных детерминированных показателей устойчивости [3, 4] является возможность, пусть и весьма приближенно, решать целый комплекс задач, связанных с оценкой надежности и живучести сложноразветвленных сетей связи [5, 6]. Причем основным преимуществом данных показателей оказывается, прежде всего простота их расчета, и как следствие, возможность анализа и синтеза структур крупномасштабных сетей связи.

Ограниченные возможности применения известных показателей связности графов при решении задач анализа надежности сетей связи вынуждают использовать более простые с вычислительной точки зрения показатели.

Линейный функционал связности сетей связи

Рассмотрим некоторый линейный функционал, представляющий собой линейную комбинацию определенным образом выбранных параметров связности, составленную по всем узлам (вершинам) сети связи (графа). Такими параметрами могут быть относительная и абсолютная связности каждого узла (каждой вершины) рассматриваемой сети связи (графа) [7, 8].

Относительная связность *i*-го узла (вершины) сети (графа) определяетсяследующим отношением:

$$c_i = \frac{v_i}{v - d_i + 1},\ i = 1, 2, \ldots, v,$$

где v_i – ранг i-го узла сети (степень вершины); v – общее число узлов в сети связи; d_i – количество узлов сети связи, с которыми *i*-й узел может иметь связь в сети (учитывается также и сам i –й узел), то есть величина d_i на единицу больше числа узлов, с которыми *i*-й узел соединен хотя бы одной простой цепью.

В векторном виде данное соотношение имеет форму

$$\mathbf{c} = \operatorname{diag}\left\{\operatorname{diag}(\mathbf{v})\left[\operatorname{diag}(v+1-\mathbf{d})\right]^{-1}\right\},$$

где $\operatorname{diag}(\mathbf{x})$ – диагональная матрица с главной диагональю, соответствующей вектору $\mathbf{x}$, а $\operatorname{diag}(\mathbf{X})$ – вектор, составленный из элементов главной диагонали матрицы $\mathbf{X}$; $\mathbf{c} = \{c_i\}_{i=1,2,\ldots,v}$ – вектор относительных связностей; $\mathbf{v} = \{v_i\}_{i=1,2,\ldots,v}$ – вектор степеней вершин.

Величину v_i можно справедливо трактовать как число прямых связей, которыми обладает i-й узел. Очевидно, что $v_i \le d_i - 1$. Данный параметр показывает соотношение числа прямых и отсутствующих связей у *i*-го узла, указывает на преобладание одних над другими. Он

будет тем больше, чем больше первых и меньше вторых. В итоге значение данного параметра будет определяться числом связей, которыми может обладать *i*-й узел сети связи.

Относительность этого параметра состоит в том, что он не дает полного представления о связях *i*-го узла с остальными рассматриваемой сети.

Абсолютная связность *i*-го узла сети определяется отношением числа связей, которыми может обладать *i*-й узел, к общему числу узлов рассматриваемой сети:

$$c_i^{'} = \frac{d_i - 1}{v},\ i = 1, 2, \ldots, v,$$

или в векторном виде:

$$\mathbf{c}^{'} = \frac{1}{v}(\mathbf{d} - 1).$$

Данная величина при фиксированном числе узлов v в сети будет полностью определяться величиной d_i. Чем больше d_i, тем абсолютная связность *i*-го узла больше.

На основании рассмотренных параметров общий вид линейного функционала для графа G определяется выражением

$$k(G) = \sum_{i=1}^{v} \alpha_i \left(c_i + c_i^{'}\right) = \sum_{i=1}^{v} \alpha_i \left(\frac{v_i}{v - d_i + 1} + \frac{d_i - 1}{v} \right),$$

где α_i – коэффициент веса *i*-го узла (вершины),

или в векторном виде:

$$k(G) = \alpha^{\mathrm{T}} \left(\mathbf{c} + \mathbf{c}^{'}\right) = \alpha^{\mathrm{T}} \left(\mathrm{d}iag \left\{ \mathrm{d}iag(\mathbf{v}) \left[\mathrm{d}iag(v + 1 - \mathbf{d}) \right]^{-1} \right\} + \frac{1}{v} \left[\mathbf{d} - 1 \right] \right),$$

где $\alpha = \{\alpha_i\}_{i=1, 2, \ldots, v}$ – вектор весовых коэффициентов вершин графа.

Следует отметить, что коэффициенты веса вершин α_i имеют смысл степени важности того или иного узла связи, относительно других узлов, и задаются субъективно при постановке задач анализа и синтеза.

Для весовых коэффициентов справедливо условие нормировки

$$\sum_{i=1}^{v} \alpha_i = \alpha^{\mathrm{T}} \mathbf{1}_v = 1,$$

а для других параметров сети неравенство

$$v_i \le d_i - 1 \le v.$$

Синтез структур сетей связи

Вследствие достаточно простого аналитического вида линейного функционала связности для синтеза структур оказывается возможным использовать аналитический метод. Общая постановка задачи для синтеза связных графов может быть представлена в следующем виде:

$$k(\mathbf{v}) > \max_{\mathbf{v}},$$

$$v = \mathrm{const},\ l = \mathrm{const},\ \alpha_i = \mathrm{const},\ i = 1, 2, \ldots, v.$$

Естественно решением задачи является вектор степеней вершин $\mathbf{v}$, который и определяет структуру результирующего графа. Сложность заключается в том, что, как и в любой задаче на графах, вектор варьируемых переменных $\mathbf{v}$ имеет дискретный характер. Ситуация несколько упрощается некоторыми особенностями целевой функции задачи синтеза. Во-первых, синтезировать необходимо исключительно связный граф, что позволяет использовать упрощенную формулу (1) для линейного функционала связности. Во-вторых, введение дополнительно ребра в граф приводит лишь к увеличению линейного функционала, причем чем выше вес инцидентных вершин, тем на большее значение увеличивается

функционал. В результате оказывается возможным реализовать последовательную процедуру добавления ребер, которая является оптимальной.

Первоначально определяется связный граф с минимальным числом ребер. Естественно подобным графом будет являться дерево, причем для максимизации его линейного функционала связности необходимо корневой вершиной назначить узел с максимальным весом,а все остальные узла считать листьями.

В результате задача синтеза графа с максимальным значением линейного функционала связности k с заданным числом вершин v с весами $\alpha_i, i=1,2,\ldots,v$ и количеством ребер l решается путем реализации следующих процедур.

Первоначально определяется матрица весов ребер $\mathrm{A}'=\{\alpha_{i,j}\}_{i,j=1,\ldots,v}$, элементы которой задаются в виде

$$\alpha_{i,j}=\begin{cases}\alpha_i+\alpha_j, i\neq j,\\ 0, i=j, i,j=1,2,\ldots,v.\end{cases}$$

Таким образом, корневой вершиной в начальном графе (дереве) будет вершина с номером

$$n=\arg\max_{i=1,2,\ldots,v}\left(\max_{j=1,2,\ldots,v}\alpha_{i,j}\right).$$

Тогда матрица смежности $\mathbf{A}=\{a_{i,j}\}_{i,j=1,\ldots,v}$ начального деревазаполнена нулевыми элементами $a_{i,j}=0$, за исключением $a_{i,n}=a_{n,j}=1, i\neq j, i,j=1,2,\ldots,v$.

Затем элементы матрицы весов ребер A', соответствующие ребрам сформированного дерева, обнуляются, т. е. $\alpha_{i,n}=\alpha_{n,j}=0, i,j=1,2,\ldots,v$.

Заметим, что на первом этапе граф (дерево) содержит $v-1$ ребер, т. е. на последующих этапах необходимо добавить еще $l-v+1$ ребер.

Далее последовательно вычисляются пары, идентифицирующие добавляемые ребра:

$$(n_1,n_2)=\arg\max_{i,j\ i,j=1,2,\ldots,v}\alpha_{i,j},$$

на основе которых соответствующие элементы матрицы смежности A назначаются единичными, т. е. $a_{n_1,n_2}=a_{n_2,n_1}=1$, а элементы матрицы весов A' обнуляются $\alpha_{n_1,n_2}=\alpha_{n_2,n_1}=0$. Процедура выполняется дом момента распределения всех l ребер.

Оптимальность данного алгоритма вытекает из формулы (1), которую можно представить в следующем виде

$$k(G)=\alpha^{\mathrm{T}}\mathbf{v}+1-\frac{1}{v}=\sum_{i=1}^{v}\alpha_i v_i+1-\frac{1}{v}=\sum_{i=1}^{v}\sum_{j=1}^{v_i}\alpha_i+1-\frac{1}{v}=$$

$$=\sum_{l_{i,j}\in L}(\alpha_i+\alpha_j)+1-\frac{1}{v},$$

где $L=\{l_{i,j}\}$ – множество ребер графа G.

Величина под суммой $\alpha_i+\alpha_j$ является, по сути, весом ребра, задаваемым весами инцидентных ему вершин. Поскольку в графе отсутствуют по определению петли и двойные ребра [9], то для максимизации линейного функционала связности $k(G)$ необходимо выбирать ребра $l_{i,j}$ с максимальным весом $\alpha_i+\alpha_j$, что и выполняется в предложенном алгоритме.

Пример синтеза

В качестве примера рассмотрим синтез структуры сети с заданным числом ребери вершин с соответствующими весами.

Синтезировать структуру сети связи с 5 вершинами и 7 ребрами. Вектор весов узлов $\boldsymbol{\alpha} = [0{,}4;\ 0{,}25;\ 0{,}1;0{,}1;\ x]^T$, где x – неизвестное число.

Дано: $v = 5$, $l = 7$, $\alpha = [0{,}4;\ 0{,}25;\ 0{,}1;\ 0{,}1;\ x]^T$.

Найти: $G : k(G) > \max_{\mathbf{A}}$.

Неизвестный весовой коэффициент рассчитывается исходя из условия нормировки

$$\alpha_5 = 1 - \sum_{i=1}^{4} \alpha_i = 0{,}15.$$

Матрица весов ребер

$$\mathrm{A}' = \begin{bmatrix} 0 & 0{,}65 & 0{,}5 & 0{,}5 & 0{,}55 \\ 0{,}65 & 0 & 0{,}35 & 0{,}35 & 0{,}4 \\ 0{,}5 & 0{,}35 & 0 & 0{,}2 & 0{,}25 \\ 0{,}5 & 0{,}35 & 0{,}2 & 0 & 0{,}25 \\ 0{,}55 & 0{,}4 & 0{,}25 & 0{,}25 & 0 \end{bmatrix}.$$

Номер корневой вершины

$$n = \arg\max_{i} \max_{i=1,2,\ldots,v} \left(\max_{j=1,2,\ldots,v} \alpha_{i,j} \right) = 1.$$

Матрица смежности начального дерева

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Заметим, что на первом этапе граф (дерево) содержит 4 ребра, т. е. необходимо добавить еще 3 ребра.

Модифицированная матрица весов ребер

$$\mathrm{A}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}35 & 0{,}35 & 0{,}4 \\ 0 & 0{,}35 & 0 & 0{,}2 & 0{,}25 \\ 0 & 0{,}35 & 0{,}2 & 0 & 0{,}25 \\ 0 & 0{,}4 & 0{,}25 & 0{,}25 & 0 \end{bmatrix}.$$

Пара, идентифицирующая первое добавляемое ребро,

$(n_1, n_2) = (2,5), (5,2)$.

Из этого набора можно выбрать любую пару, поскольку все они приводят к идентичному росту линейного функционала. Тогда матрица смежности приобретает вид

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а матрица весовых коэффициентов

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,35 & 0,35 & 0 \\ 0 & 0,35 & 0 & 0,2 & 0,25 \\ 0 & 0,35 & 0,2 & 0 & 0,25 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0,25 & 0 \end{bmatrix}.$$

Продолжая подобную процедуру, получается следующая матрица смежностей:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Диаграмма соответствующего графа приведена на рисунке 1.

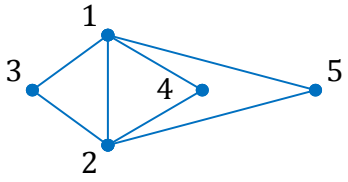


Рис. 1. Граф с максимальным значением линейного функционала связности

Заметим, что в результате решения задач оптимального синтеза структур сетей по линейному функционалу связности последовательно назначаются ребра, инцидентные вершинам с весами, упорядоченными в порядке невозрастания.

Библиографический список

1. Форман Дж. Много цифр: Анализ больших данных при помощи Excel. Москва: Альпина Паблишер, 2016. 464 с.
2. Батенков К. А.Числовые характеристики структур сетей связи //Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53). – С. 5–28.
3. Лакеев А. В. Элементы теории обыкновенных графов : учеб.пособие / Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 83 с.
4. Колганов А. С. Параллельная реализация алгоритма поиска минимальных остовных деревьев с использованием центрального и графического процессоров / Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ’2016). С. 530–543.
5. Батенков К.А. Общие подходы к анализу и синтезу структур сетей связи //Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической конференции. – 2017. – С. 19–23.

6. Батенков К. А.К вопросу оценки надежности двухполюсных и многополюсных сетей связи //Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / науч. ред. А. И. Громыко ; отв. за вып. А. А. Левицкий. – Электрон. дан.(31,5 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 604–608.
7. Батенков К. А.Устойчивость сетей связи. Орел: Академия ФСО России, 2017. 277 с.
8. Оптимизация структур сетевых моделей / Под ред.А. А. Колесникова. – Л. : ВАС, 1987. – С. 101.
9. Татт У. Теория графов: пер. с англ. Москва: Мир, 1988. 424 с.

K. A. Batenkov

STATISTICAL RELIABILITY INDEXES OF BIPOLAR AND MULTIPOLARCOMMUNICATIONS NETWORK

Academy of Federal Guard Service of Russian Federationl

Statistical reliability indexes of bipolar and multipolar communications network are considered in paper. Communication line readiness factor computation method on base of activenormative documents is displayed.Correlation of statistical reliability index and its probabilistic one is specified.

Key words: communicationsnetwork, bipolarnetwork, multipolar network, reliability, readiness factor.

УДК 004.89

Д.И. Киров, А.В.Хныгина, М.А.Соболев, Г.Б. Бронфельд

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОТОТИП ЭЛИНГИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматривается исследовательский прототип интеллектуальной электронной книги – элинги. Описываются ее основные функции, структура программного обеспечения. Приводятся примеры функционирования прототипа.

Ключевые слова: знания; модель знаний; текст; молинга; элинга; прямое наложение знаний

Введение

Одной из главных проблем научно-технического развития является бурное накопление информации и знаний. Этот процесс получил название - сатурация (перенасыщение информацией). В последние десятилетия применение Интернет, мощных информационных систем и различных интеллектуальных систем (ИС) [1-5] несколько повысило эффективность работы с информацией, но не снизило остроту проблемы работы с информацией и знаниями. Во весь рост все более встает проблема интеграции знаний и повышение результативности работы с ними.

Знания содержатся в неких книгах, документах, описаниях, стандартах, статьях и т.п. Все это будем называть сверхтекстами в соответствии с общепринятым подходом в лингвистике, если они относятся к определенной предметной области.

Тут есть несколько аспектов проблемы.

Первый из них, – как моделировать знания?

Второй, – как организовывать знания, содержащиеся в сверхтекстах?

Третий, - как находить решения, выдаваемые ИС?

Четвертый аспект, – как трактовать получаемое решение?

Исторически это развивалось на основе разных подходов. Одним из первых из удачных, - было применение единых баз знаний (БЗ) для экспертных систем (ЭС) [1]. В единую БЗ сводятся необходимые знания из сверхтекста и экспертов. Но требуется длительная отладка ЭС, чтобы получить ответы на уровне опытного эксперта. Этот подход применим для ограниченного числа задач с ограниченным объемом информации и знаний.

Описание прототипа элинги

В основе прототипа элинги лежит технология прямого наложения знаний (ТПНЗ) [6-8]. ТПНЗ позволяет использовать свойство текстов – интертекстуальность [9], поскольку в научно-технических текстах содержание текстов других авторов доходит до 90-95%, а то и более.

Для введения ТПНЗ знания промоделированы по-новому [6-8]. Известно, что «простое предложение … было и остается основной единицей синтаксиса текста, так как именно в предложении находят выражения наиболее существенные функции языка...», «наиболее существенной чертой предложения является его способность формировать и выражать мысль» [9-10]. Так почему не взять за основу моделей – сразу простое предложение?

Метод описания знаний моделью, названной молингой, заключается в следующем [6-8]. Каждое простое предложение текста (сложные делятся на простые) представляется маленькой семантический сетью 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 вводе знаний в виде молинг в БЗ, указываются идентификаторы из какого текста-источника и места в исходном тексте. Повторение знаний, имеющихся в БЗ и полученных ранее из других источников, приводит к повышению достоверности имеющихся знаний (все

пометки дублированных знаний из разных источников в виде набора идентификаторов сохраняются). А то чего нет, вводится и увеличивает объем БЗ. Ключевая особенность применения ТПНЗ - значительно меньший объем БЗ сверхтекстов по сравнению с другими способами получения БЗ на основе других моделей знаний. А это приводит к значительному ускорению поиска ответа даже для одинаковых методов логического вывода (ЛВ).

ИС с БЗ на основе ТПНЗ могут иметь следующие варианты: с массовым производством для индивидуального потребителя в варианте интеллектуальная электронная книга, названная – элингой [6-8], в индивидуальном варианте для отдельного предприятия (организации) в варианте аналитическая система управления знаниями (АСУЗ) [7,8] и для общего использования массовым потребителем в виде библиотеки аналитического накопления знаний (БАНЗ) [7,8].

Элинга позволяет:

– заносить в них постепенно большое количество знаний;

– получать пользователю (с минимальной подготовкой) требуемый результат сразу (почти со скоростью расчетных программных средств) без изучения технической литературы;

– работать в широкой предетной области;

– пользователям с невысокой подготовкой получать постепенно результаты на уровне лучших специалистов мира.

Элинга для потребителя выступает, как «носитель знаний», или иначе – локальная библиотека знаний в конкретной предметной области или областях. Физически элинги представляют собой съемное устройство хранения информации со специальной машиной вывода и БЗ. Одновременно могут создаваться элинги по многим направлениям знаний.

В элинге создается своя специальная среда для ускоренного и эффективного нахождения рациональных решений. Структура элинги представлена на рис. 1.

В состав элинги входят программные средства, реализующие машину вывода, интеллектуальный интерфейс, БЗ, сервисные и вспомогательные программы.

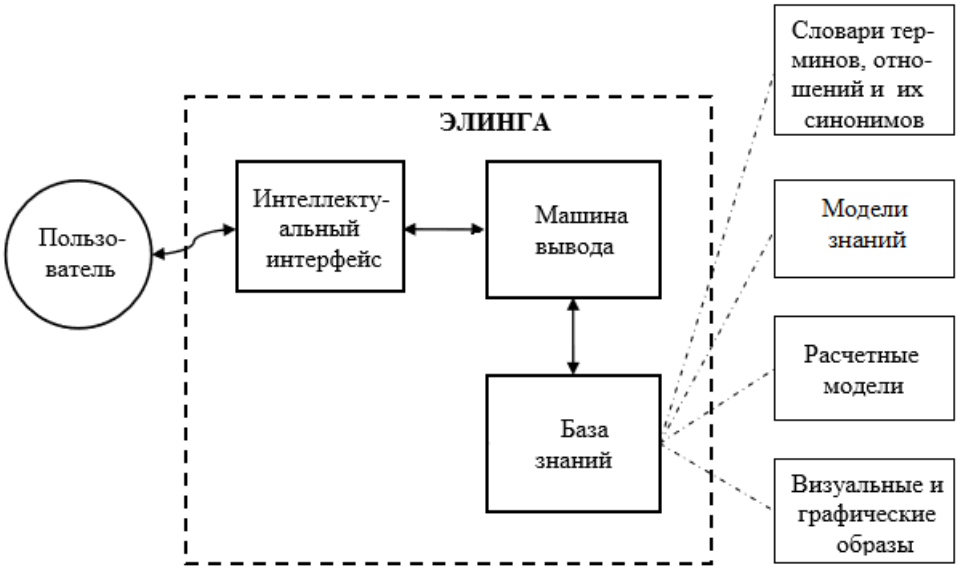


Рис. 1. Структура элинги

На рис. 2 приведены режимы работы элинги. Пользователь задает вопрос системе, и она выдает ответы в виде блоков ядер молинг (простых предложений) на основе разных принципов, в том числе при ЛВ – через связь понятий на основе абдуктивного вывода [11,12] через модифицированное правило *modus ponens*, применительно к БЗ из молинг. С точки зрения лингвистики – это уже выдача связанного текста [9].

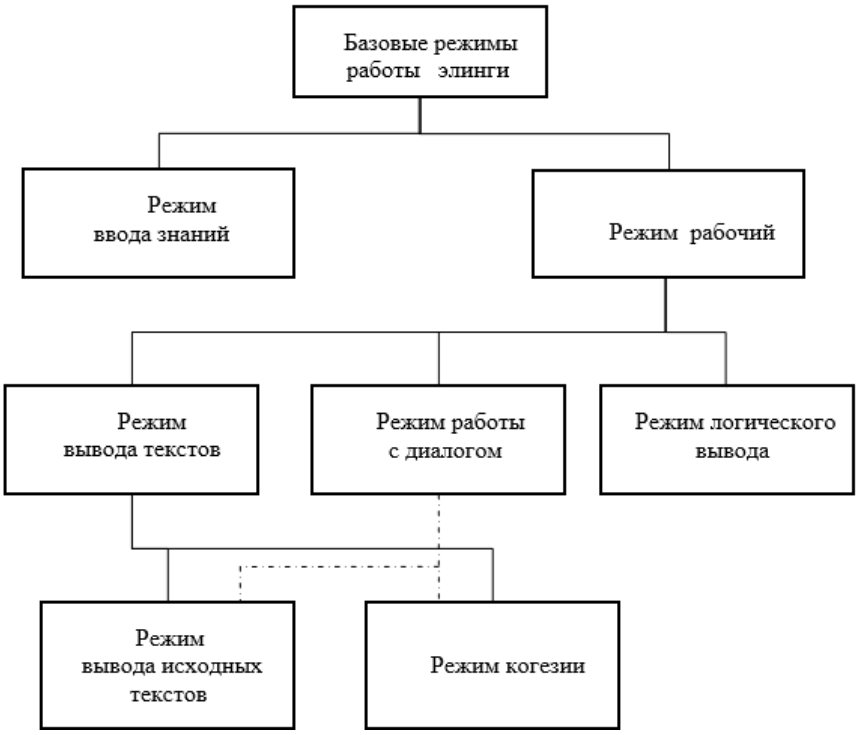


Рис. 2. Основные режимы элинги

Процесс логического вывода можно условно разделить на три основных этапа: подготовительный; итеративный; итоговый.

На подготовительном этапе происходит формирование матрицы истинности, «пересечения» которой символизируют наличие определенных терминов в определенных молингах. Так же происходит отбор тех молинг, что содержат один из искомых терминов, и формирование «зачатков» логических комбинаций (ЛК) на их основе. Каждая ЛК включает в себя список содержащихся в ней молинг (от одной и более) и «однострочную таблицу истинности», куда проставляются отметки о всех встретившихся в данной ЛК терминах. Здесь же происходит предварительная проверка ЛК на случай, если уже есть такие молинги, в которых содержатся оба искомых термина.

На итеративном этапе для каждой ЛК происходит сверка с каждой молингой в БЗ по таблицам истинности – есть ли такая-то молинга в ЛК, если нет, то есть ли совпадения между терминами в молинге и терминами в ЛК. Если да, то ЛК дополняется этой молингой и проверяется: достигнут ли результат (оба искомых термина присутствуют в ЛК). Если да, то ЛК отправляется в список результатов, если нет, то в список исходных ЛК для следующей итерации.

На итоговом этапе происходит отбраковка дублирующих друг друга ЛК и вычисления фактора уверенности для каждой из них. На рис. 3 представлен снимок главного окна программы, с примером результата логического вывода.

В зоне результатов поиска выводятся не только ядра молинг, но и записи с постусловиями (если есть), а также факторы уверенности как отдельных молинг, так и ЛК.

Пользователь также имеет возможность доступа к имманентным свойствам исходных текстов – когезии (локальной связности) и когерентности (связности в пределах текста). Т.е. дополнительно разобраться в исходном тексте, части которого ему выдаются. А далее вступает в дело возможности диалого-ассоциативного поиска [6-8]. Пользовать может снова уточнить свой запрос, уже основываясь на предыдущих полученных ответах и продолжить свой поиск, углубляясь в детали или применяя расчеты через выданные постусловия. При этом оставаясь в группе наиболее достоверных по ФУ результатов. Промежуточные

интересующие итоги он может заносить в итоговый файл. На рис. 4 представлен пример использования вышеописанных функций.

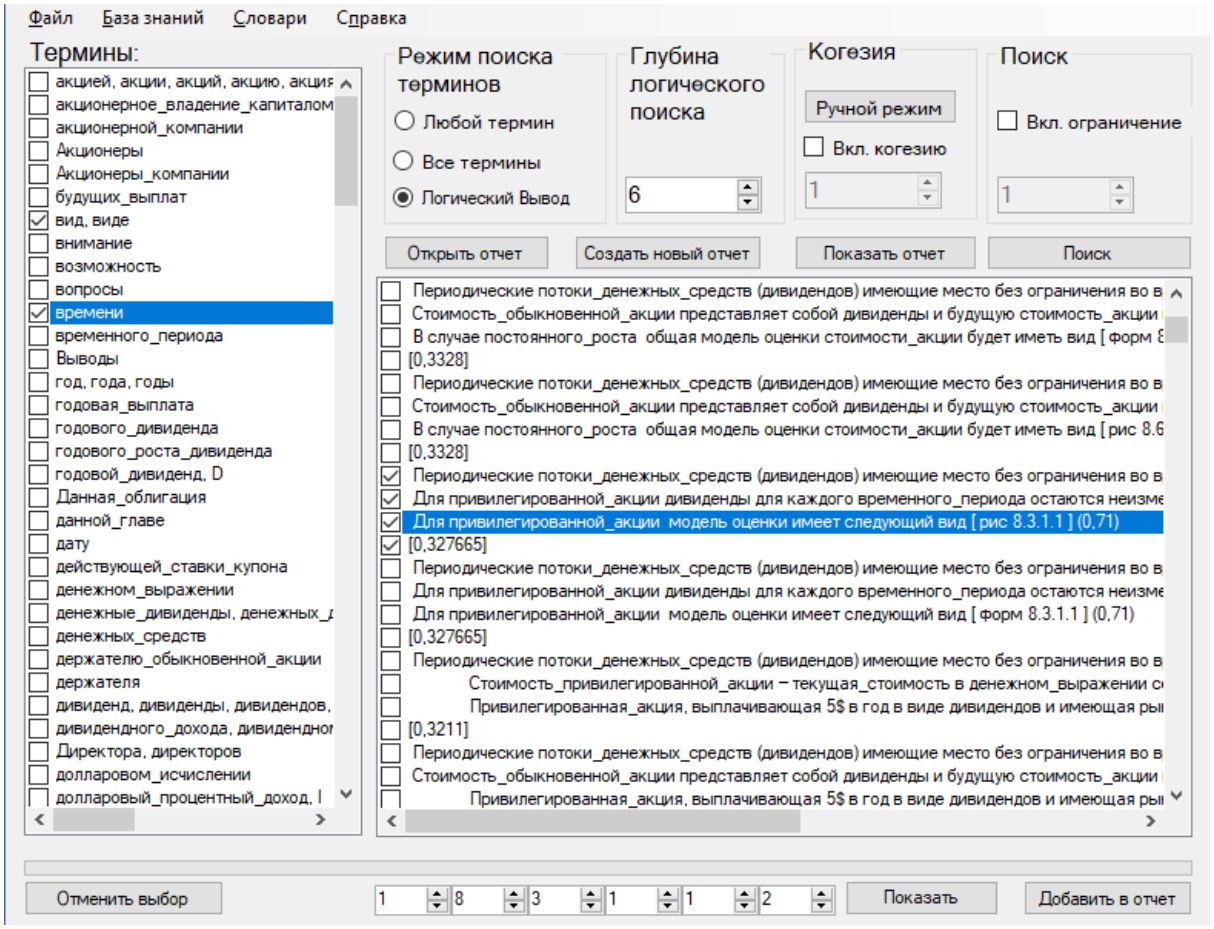


Рис. 3. Основное окно прототипа в режиме логического вывода

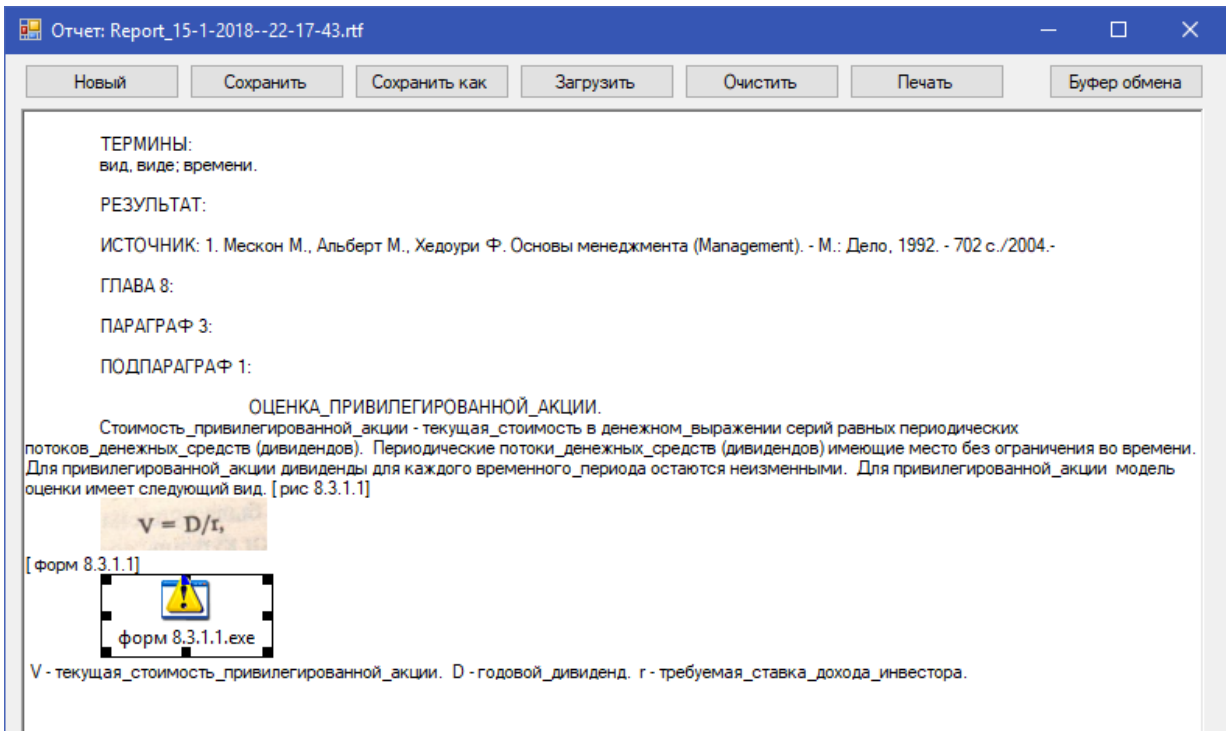


Рис. 4. Пример реконструированного текста в итоговом файле

Как можно заметить, дополнительные материалы, указанные в постусловиях, могут вноситься в отчет как в виде графических элементов, так и в виде запакованных объектов, которые можно запускать в предназначенных для этого сторонних приложениях (для расчетных моделей, аудиозаписей, видеофрагментов и т.п.).

И хотя получаемый текст – совершенно искусственен (совместное творчество компьютера с пользователем в дискурсе), он обладает свойством интертекстуальности, является линейным (но получен нелинейным образом) в основных блоках, и обладает свойством семантической связности. Пользователь фактически сам с помощью элинги конструирует текст, несущий нужное ему содержание с понятным ему смыслом. Это и есть решение, которое находится относительно быстро и соответствует всем требованиям некогда предъявленным к решению известным математиком Пойа [13] – «найти решение задачи - это значит установить связь между … объектами или идеями (... предпосылкой и заключением) … связь мы представляем себе … как наведение моста над глубокой пропастью, разделяющей две идеи, далеко отстоящие друг от друга. … доказательство предстает перед нами как взаимосвязь аргументов, как цепь - … длинная цепь – выводов. Вся цепь …не более прочна, чем ее слабейшее звено, -… естественно представлять, как геометрическую линию, а … связанные объекты - просто как точки; … возникает …, графическое представление взаимосвязи математических выводов».

Элинга помогает разобраться и уточнить особенности решаемой задачи. Г.С. Альтшуллер [14] таким образом высказывался об этом применительно к изобретательским задачам - «правильно сформулированных изобретательских задач не бывает. Если абсолютно правильно сформулировать изобретательскую задачу, она перестанет быть задачей: ее решение сделается очевидным или же будет ясно, что задача не поддается решению при имеющемся уровне науки и техники». И еще «для правильного понимания задачи необходимо ее сначала решить: изобретательские задачи не могут быть сразу поставлены точно. Процесс решения, в сущности, есть процесс корректировки задачи».

Выводы

Задавая вопрос элинге, можно уверенно утверждать, что пользователь разберется в интересующем его вопросе намного лучше. Причем, что крайне важно, в простых проблемах и задачах, число которых в практической деятельности максимально. А это относится к числу недостатков и ограничений многих других ИС, начиная с ЭС. И, одно из главных особенностей, – быстро, поскольку, не надо обращаться вначале – ни в другие книги, ни в другие библиотеки, ни к другим специалистам, ни в другие отделы, ни в другие организации (конечно, при достаточной развитости элинги). А необходимые объемы текстов для создания БЗ эффективных элинг намного меньше и быстрее накапливаются, чем многим – это кажется. Рассмотренный подход для ИС на основе использования ТПНЗ создает новый и весьма эффективный метод работы со знаниями и обеспечивает новые возможности для решения научно-технических задач. Данная технология одновременно внесет важный вклад в решении одной из важнейших современных проблем, – проблемы сатурации (перенасыщения информацией).

Библиографический список

1. Гаврилова, Т.А. Инженерия знаний. Модели и методы/ Т.А.Гаврилова, Д.В.Кудрявцев, Д.И.Муромцев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 324 с.
2. Шенк, Р. Обработка концептуальной информации. – М.Энергия, 1980.-360 с.
3. Совпель И.В. Система автоматического извлечения знаний из текста и ее приложения // Искусственный интеллект. – 2004. - №3, с.668-679
4. 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)

5. Хай, Р. Эпоха когнитивных систем: Принцип построения и работы IBM Watson / IBM, 2013, 15 с. http://www.olap.ru/home.asp?artId=2507
6. Пат. № 2440610 Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой/ Бронфельд, Г.Б.; заявка 21.06.2010; опубл. 20.01.12. Бюл.№2.
7. Бронфельд, Г.Б. Основы искусственного интеллекта : учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014. – 253 с.
8. Бронфельд Г.Б. Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности». - Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Puplishng, 2014. – 236 с.
9. Лукин В.А. Художественный текст: Основы лингвистической теории. Аналитический минимум. - М.: Изд-во «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. Вагин В.Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах/ В.Н. Вагин, Е.Ю.Головина, А.А. Загорянская, М.В.Фомина М.В.– М.:Физматлит, 2004.– 704 с.
12. Бронфельд Г.Б. Логический вывод в интеллектуальной системе на основе базы знаний из молинг//Экономика и менеджмент систем управления, т.22, №4, 2016, с.64-74
13. Пойа Дж. Математическое открытие (Решение задач: основные понятия, изучение и преподавание). - М.: Издательство «Наука», 1976. – 448 с.
14. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач . – Новосибирск: Наука, 1986. - 209 с.

D.I. Kirov, A. V. Khnigina, M. A. Sobolev, G.B. Bronfeld

THE RESEARCH PROTOTYPE OF THE ELINGA

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

Purpose. Discusses the new technology of work with knowledge with a new model of knowledge representation – molingas, using a new approach of creating a knowledge base (KB) - technology for the direct imposition of knowledge (TDIK), and a new approach to online interaction human-computer.

Design/methodology/approach. The technology was developed in the framework of the approaches to creation of expert systems (ES), but each component is implemented differently. The result is a software tool, called elinga, which has unique features compared to traditional ES, which are considered for most is impossible to achieve with the help of ES. To create integrated KB using published sources from a particular domain of scientific and technical sphere. When applying TDIK integrated KB - much less just the amount of source code, there are only molingas with semantically different kernels – sentences from the texts. As a logical inference to obtain the intermediate results in elinga used the abductive inference based on modified rules of modus ponens, applied to KB from molingas. The process of finding solutions is based on the dialog-associative search in the process of discourse human – computer, using the interim results obtained during the work of inference, and output parts of the text. Describes the basic functions and elingas main modes of operation.

Originality/value. Complex technology is original, is protected by two patents , is outlined in three books, published in several dozen print articles for 15 years.

Output (results). The new technology allows to create complex software in the form of elinga potentially begin to replace printed books as the main medium of knowledge with the aim of dramatically accelerating the performance of people with knowledge and a sharp decrease errors when making decisions.

Key words: knowledge; knowledge model; text; molinga; elinga; a direct imposing of knowledge.

УДК 004.89

В.А. Плигос, Г.Б. Бронфельд

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ПРОТОТИП АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматривается демонстрационный прототип аналитической системы управления знаниями. Аналитическая система управления знаниями позволяет организовать быструю доставку необходимой информации в рамках предприятия, извлечение знаний из неструктурированной информации и своевременное обновление базы знаний. Рассматриваются отличия аналитической системы управления знаниями от обычной системы управления знаниями.

Ключевые слова: аналитическая система управления знаниями; знания; информация; молинга; база знаний

Введение

На сегодняшний день мир столкнулся с одной очень серьёзной проблемой – проблемой накопления огромного объема неструктурированной информации [1-3]. Для решения этой проблемы сейчас затрачиваются огромные ресурсы, и результаты показывают, что при должной обработке такой информации бизнес или любая другая сфера жизни людей может резко улучшиться.

Особенно остро эта проблема встает на предприятиях, больших и малых. В таких компаниях часто случается, что рост прекращается из-за того, что нет понимания того, куда нужно двигаться вперед, на чем заострить внимание. Обработка неявной информации часто дает результат, который, возможно, не приходил в голову.

Аналитическая система управления знаниями (АСУЗ) содержит не только средства для решения данной проблемы, но и различные программные комплексы, помогающие контролировать деятельность предприятия [4,5].

АСУЗ предоставляет предприятию удобный интерфейс для работы с информационными ресурсами, в том числе знаниями, со специалистами в различных структурах предприятия, что значимо сокращает время для поиска нужной информации, и, в свою очередь, увеличивает производительность труда.

Описание аналитической системы управления знаниями

Основной задачей АСУЗ является построение такой информационной инфраструктуры предприятия, которая поможет работникам быстро и легко обрабатывать информацию и знания (рис.1). Знания могут быть как явные знания (содержаться в бумажных документах, базах данных, текстовых файлах, электронных документах, сообщениях электронной почты, различных изображениях, видеофрагментах, аудиозаписях) полученные из различных источников, так и неявные знания, хранящиеся в головах специалистов и экспертов. Принципиально, что АСУЗ позволяет эффективно и многократно использовать запасы этих знаний.

Реально управление знаниями представляет собой систематический процесс создания и преобразования индивидуального и группового, научного и практического опыта таким образом, чтобы знания могли быть перенесены в процессы, услуги и продукты, предлагаемые организацией с тем, чтобы увеличивалась их общая стоимость, а соответственно и совокупная продуктивность организации.

Ключом к управлению знаниями является, таким образом, предоставление необходимых знаний нужным людям в пределах группы людей и организации в нужное для эффективной реализации бизнес-процессов время. По сути своей, смысл управления знаниями заключается в том, чтобы помочь людям лучше работать вместе, используя растущие ресурсы знаний и

эффективно управляя ими. Результатом успешно работающей АСУЗ должна стать знающая, самообучающаяся и развивающаяся организация.[3]

Для достижения данной цели, АСУЗ должна преодолеть ряд барьеров:

- барьер различия в знаниях;
- барьер совместной интеллектуальной собственности;
- коммуникационный барьер;
- пространственно-географический барьер.

Требования, предъявляемые к АСУЗ для преодоления данных барьеров:

- обеспечение систематизированного описания, классификации и агрегации знаний;
- обеспечение фиксации и хранения явных и неявных знаний;
- обеспечение накопления и обновления знаний, доступ к ним работников компании со своих рабочих мест;
- обеспечение распространения знаний в соответствии с установленным регламентом (кому, что, когда) и по запросам;
- поддержка широкого спектра средств (среды) для профессионального общения и обмена знаниями между специалистами, экспертами, командами, проектными группами и сообществами по интересам;
- обеспечение поддержки процесса принятия решений;
- обеспечение хранения и обновление профилей компетентности специалистов компании, поддержка процессов экспертизы и консультирования;

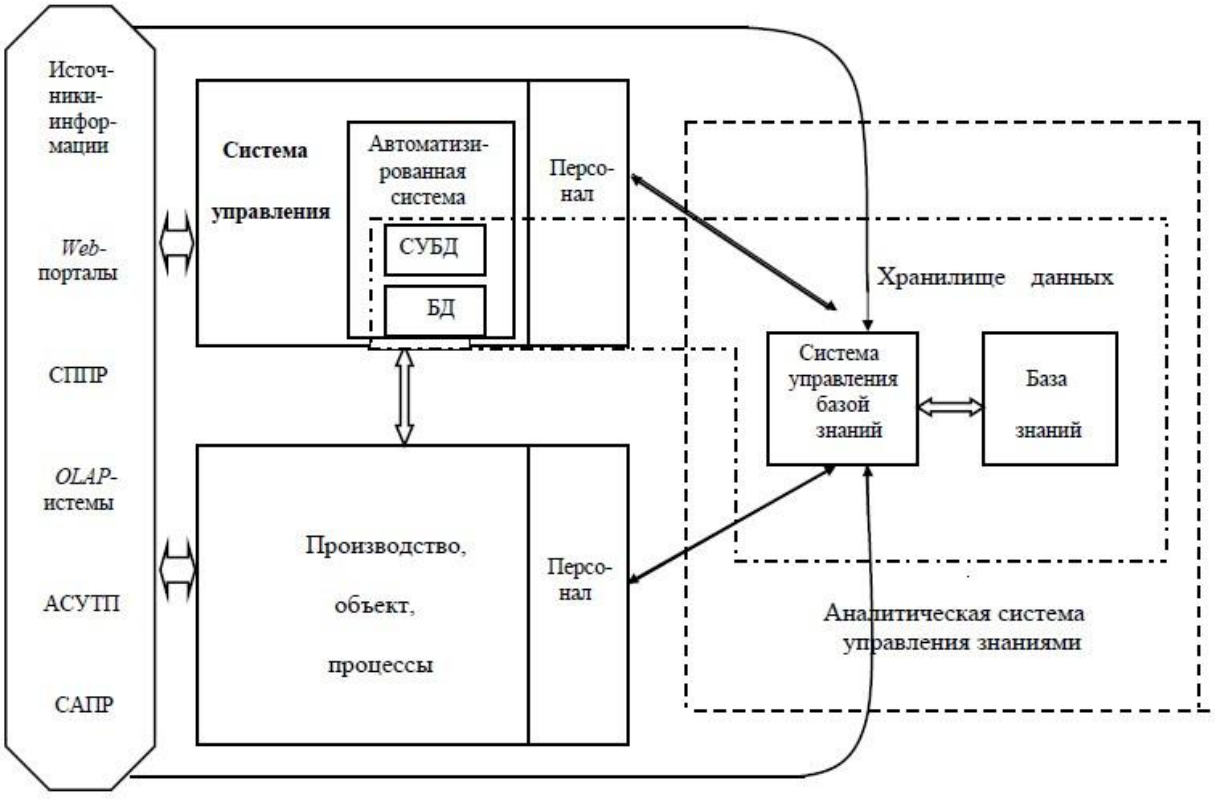


Рис. 1. Структура АСУЗ в организации

Функциональное предназначение АСУЗ:

- систематизация и накопление актуальной информации и знаний;
- обеспечение универсальной доступности сотрудников к коллективной памяти компании, к явным и неявным знаниям;

- обеспечение семантического поиска и фильтрации знаний в корпоративных и мировых (что важно) информационных ресурсах;
- стимулирование сотрудничества высокоэффективных специалистов в процессе генерации идей и принятия решений;
- создание среды для on-line взаимодействия распределенных проектных и бизнес-групп, профессиональных сообществ и экспертов;
- повышение корпоративной культуры в реализации управленческих и бизнес-процессов.

Демонстрационный прототип (рис.2) имеет возможность предоставить средства доступа к таким компонентам предприятия как, - кадры, финансы, маркетинг, информация, зарплата, продажи, закупки, архив

На основе требований можно сказать, что предназначением АСУЗ является увеличение объема и повышение уровня использования знаний организации за счет их эффективного поиска и фильтрации, включения в коллективную память компании профессиональных знаний и опыта, в том числе хранящегося в головах специалистов. То есть АСУЗ должна быть тесно связана со специалистами организации и обеспечивать их всеми видами знаний, как имеющимися в организации, так и за ее пределами с помощью интеллектуального интерфейса к глобальным базам и базе знаний (БЗ) организации. По сути, АСУЗ должна предоставить сотрудникам организации возможность более быстрого и качественного выполнения их работы со знаниями в бизнес-процессах, в которых они участвуют в соответствии со своими обязанностями.

Рис. 2. Ключевые компоненты АСУЗ

- АСУЗ, в своем роде, схожа с обычной системой управления знаниями (СУЗ), но, все же, имеет свои существенные отличия:
- имеет БЗ большую, чем у обычной СУЗ, и специально организованную;
- БЗ пополняется не только из внутренних источников предприятия, но и извне;

при запросах, объем выдаваемой полезной информации в разы больше.

Моделирование знаний происходит при помощи так называемых молинг [4,5]. Молинга - модель знаний, при которой каждое простое предложение текста (сложные делятся на простые) представляется маленькой семантической сетью 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 (как говорят в теории перевода).

Молинги имеют вид (близкий к продукционным моделям, но отличаются принципиально ядром)

$$D; P; Z; K; O; N,$$

где D — множество идентификаторов, с помощью которого молинга выделяется из всего множества молинг. Приводятся все идентификаторы для этой молинги во всех текстах, где встречались одинаковые знания. При выдаче ответа может даже восстанавливаться (по желанию пользователя) близкий к исходному текст из первоисточника за счет наличия идентификаторов. Элемент Р есть условие применимости ядра молинги. Основным элементом молинги является ядро молинги Z – простое предложение. В К молинг указаны последовательность номеров словарей, фиксирующих положение в ядре молинги – слов, в т.ч. терминов, по которым проводится потом логический вывод. В О указываются уровни достоверности молинг, например, в виде факторов уверенности, впервые примененных в ЭС MYCIN. Элемент N описывает постусловия молинги. Они актуализируются в случае, если ядро молинги реализовалось. В качестве них могут выступать расчетные модели, графические образы, таблицы и т.п.

При вводе знаний в виде молинг в БЗ, указываются идентификаторы из какого текста-источника и места в исходном тексте. Повторение знаний , имеющихся в БЗ и полученных ранее из других источников, приводит к повышению достоверности имеющихся знаний (все пометки дублированных знаний из разных источников в виде набора идентификаторов сохраняются). А то чего нет, вводится и увеличивает объем БЗ. Соответственно, при вводе новых знаний – объем БЗ монотонно возрастает. Введение противоположного утверждения, уменьшает достоверность уже введенного, при этом оно само фиксируется. Такой процесс создания БЗ ИС для интеграции знаний и называется технология прямого наложения знаний (ТПНЗ) [4,5]. Ключевая особенность - значительно меньший объем БЗ сверхтекстов по сравнению с другими способами получения БЗ на основе других моделей знаний. А это приводит к значительному ускорению поиска ответа даже для одинаковых методов логического вывода[4-7].

Заключение

Задавая вопрос АСУЗ, можно уверенно утверждать, что пользователь разберется в интересующем его вопросе намного лучше. Причем, что крайне важно, в простых проблемах и задачах, число которых в практической деятельности максимально. А это относится к числу недостатков и ограничений многих других ИС, начиная с ЭС. И, одно из главных особенностей, – быстро, поскольку, не надо обращаться вначале – ни в другие книги, ни в другие библиотеки, ни к другим специалистам, ни в другие отделы, ни в другие организации (конечно, при достаточной развитости элинги). А необходимые объемы текстов для создания БЗ эффективных элинг намного меньше и быстрее накапливаются, чем многим – это кажется. Рассмотренный подход для ИС на основе использования ТПНЗ создает новый и весьма эффективный метод работы со знаниями и обеспечивает новые возможности для решения научно-технических задач. Данная технология одновременно внесет важный вклад в решении одной из важнейших современных проблем, – проблемы сатурации (перенасыщения информацией).

Библиографический список

1. 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.
2. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Изд.дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.

3. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии) / Под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
4. Бронфельд, Г.Б. Основы искусственного интеллекта : учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ им.Р.Е.Алексеева, 2014. – 253 с.
5. Бронфельд Г.Б. Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности». - Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Puplishng, 2014. – 236 с.
6. Вагин В.Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах/ В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская, М.В. Фомина М.В.. – М.:Физматлит, 2004. – 704 с.
7. Бронфельд Г.Б. Логический вывод в интеллектуальной системе на основе базы знаний из молинг// Экономика и менеджмент систем управления, т.22, №4, 2016, с.64-74.

V.A. Pligos, G.B. Bronfeld

THE DEMONSTRATION PROTOTYPE OF THE ANALYTICAL KNOWLEDGE MANAGEMENT SYSTEM FOR ORGANIZATIONS

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

Purpose. A demonstration prototype of an analytical knowledge management system (AKMS) is considered. The analytical knowledge management system allows user organize fast d elivery of necessary information within the enterprise, extract knowledge from unstructured information and real-time update the knowledge base.

Design/methodology/approach. The technology was developed in the framework of the approaches to creation of expert systems, but each component is different. The result is a software tool, called AKMS with other applications and capabilities based on the technology of elinga . The basic model of knowledge is molinga having a core containing a simple sentence, with an additional code descriptions and postconditions. The fuzziness is taken into account the certainty factor, as in MYCIN. The result is a knowledge base (KB) of molingas can be considered as a KB large number of short semantic networks. It molinga allow you to apply the technology for the direct imposition of knowledge. To create integrated KB using published sources from a particular domain of scientific and technical sphere. As postconditions apply graphic images or formulas and models. The result solves the problem of intertextuality, synonyms, metaphors, concepts with different semantic meanings, etc.. As a logical inference (LI) to retrieve intermediate results in elinga used abductive inference on the basis of modified modus ponens rule. The process of finding solutions is based on the dialog-associative search in the process of discourse of human–computer uses the interim results obtained in the work of the LI, and output parts of the text (listed in the KB). The result is a final file, which contains the necessary steps of finding solutions, explanations and definitions, calculations and studies, and in several versions. Everything happens quite quickly and there is no need to appeal to other sources and professionals. Describes the basic functions and AKMS main modes of operation.

Originality/value. Complex technology is original, is protected by two patents , is outlined in three books, published in several dozen print articles for 15 years.

Output (results). The new technology allows to create complex software in the form of AKMS potentially begin to replace printed books as the main medium of knowledge with the aim of dramatically accelerating the performance of people with knowledge and a sharp decrease errors when making decisions.

Key words: analytical knowledge management system; knowledge; information; molinga; knowledge base

УДК 519.8

Е.А. Скоропостижный , Д.В. Баранов, М.А. Буценко, О.С. Депутатов, Г.Б. Бронфельд

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ПЕРЕНАЛАДКАМИ ПРИ РЕШЕНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА «НАДУВНОГО ШАРИКА»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрен подход к постановке задач многокритериальной оптимизации с переналадками оборудования и нелинейными критериями оптимизации. Постановка проблемы восходит к идеям Л. В. Канторовича. Учет в постановке переналадок оборудования усложняет задачу. Описан метод «надувного шарика» (МНШ) для решения поставленной задачи. Алгоритм МНШ основан на итерационном методе. В МНШ включены дополнительный специальный метод закрепления классов, метод максимального элемента и метод ветвей и границ. Изложены некоторые рекомендации для решения широкого класса задач с помощью МНШ.

Ключевые слова: оптимизация; многокритериальность; метод «надувного шарика»; метод максимального элемента; метод ветвей и границ; итеративный метод.

Введение

Огромное количество задач в человеческой деятельности связано с процессами, регулируемыми на основе принятия решений. Контролируемые параметры в этих процессах ставятся так чтобы получить экстремальное значение какого-либо показателя при условии выполнения наложенных ограничений. Искомые показатели могут быть совершенно различны. От формирования и управления портфелем ценных бумаг до работы искусственного интеллекта, раскроя материала на фабриках и конечно же оптимизации производства [1-6]. Правильное решение задачи оптимального распределения плана производства по видам оборудования очень важно, поскольку позволяет получить чистый экономический эффект, не требуя дополнительных затрат.

Нижеизложенный алгоритм позволяет решить задачу максимизации выпуска продукции цехом на основе метода «надувного шарика» (МНШ) [7,8].

Пусть выпуск продукции по цеху G-есть функция производительности i-х агрегатов a_{ij} по j-й номенклатуре, времени работы агрегатов x_{ij}, от количества агрегатов n и от заданного плана выпуска продукции по номенклатуре b_{j0}

$$G = f(a_{ij}, x_{ij}, n, b_{j0}) \tag{1}$$

Математически критерий максимизации выпуска продукции цехом при сохранении пропорциональности плановому заданию записывается в следующем виде:

$$G = \max\{\min_{J} \frac{\sum_{i} a_{ij} x_{ij}}{b_{j0}}\} \tag{2}$$

где J - множество номенклатур продукции. Так, по сути, подобная задача рассматривается у Л.В.Канторовича [1] и демонстрируется, что задача сводится к классу задач линейного программирования с одним максимизируемым критерием и решается известными методами, в частности, изложенными в [2] . Она тоже решается с помощью МНШ [7,8], но постановка задачи (1), (2) может быть представлена в более расширенном виде, имеющим уже многокритериальную форму, причем отдельные критерии могут иметь нелинейный вид, несвязанный между собой. И эта новая постановка задачи также решается с помощью МНШ [7,8] и имеет уже намного больше возможностей, чем стандартное представление в форме линейного программирования.

Постановка задачи

Имеется m агрегатов, выпускающих n видов номенклатур продукции с различными математическими ожиданиями производительности a_{ij}. Задан план выпуска продукта b_{j0} по каждой номенклатуре как начальный и желательное его возможное изменение в процессе поиска наилучшего решения b_{jt}. Переход на выпуск другой номенклатуры продукции вызывает остановку агрегата на время ΔT_{ije}, где $j, e \in 1,2,..n$.

Ставится задача так распределить время работы агрегатов x_{ij} с учетом потерь времени на переналадку, чтобы обеспечить наибольший выход продукта в соответствии с b_{jt} за заданное время z_i .

Постановка задачи является развитием постановки задачи [9] и рассматривается для того же производства.

Критерий (2) можно свести к критерию

$$\max b_{jt} = f_j(b_{j0}, t) \qquad (3)$$

где b_{jt} -величина измененного планового задания при поиске оптимального плана; t-количество итераций при поиске плана.

Можно показать, что при данной постановке задачи и зависимости (1) максимальный выпуск продукции $G_{\max}$ равен

$$G_{\max} = \sum_J b_{jt\max} \qquad (4)$$

Ищем выполнение критерия (3) при ограничениях

$$\sum_{i=1}^{m} a_{ij} x_{ij} \geq b_{jt} \qquad (5)$$

$$\sum_J (x_{ij} - \sum_J \Delta T_{ije}) \leq z_i \qquad (6)$$

Величины a_{ij}, b_{jt}, ΔT_{ije} - положительные числа. Значения x_{ij} также ищутся в виде положительных чисел.

Выражения (3) можно раскрыть следующим образом

$$\left.\begin{array}{l} \max b_{1t} = f_1(b_{10}, t) \\ \max b_{2t} = f_2(b_{20}, t) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \max b_{jt} = f_j(b_{jo}, t) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \max b_{nt} = f_n(b_{n0}, t) \end{array}\right\} \qquad (7)$$

Функция $b_{jt}=f_j(b_{j0},t)$ показывает, как изменяется максимизируемая величина исходного планового задания b_{i0} в ходе поисковых итераций t. Она представляет собой неубывающую и однозначную функцию.

Такую задачу нелинейного вида, да еще с разрывами по времени работы не представляется возможность решить известными стандартными методами линейного и нелинейного программирования [2-4]. Наличие разрывов ΔT не позволяет применить линейное программирование. Для динамического программирования встает ограничение в

виде количества возможных путей выполнения плана производства K пропорциональных с необходимостью подсчета каждый раз всех критериев (7).

$$K \sim z \times m^n \quad (8)$$

Это же ограничение встает перед методом ветвей и границ [10].

В [9] изложен один из возможных методов приближенного решения этой задачи, однако нижеизложенный метод приносит более лучшие результаты.

Метод решения

Исходя из планового задания по номенклатуре b_{j0} задается вариант плана, обеспечивающий условия (5), (6) значительно меньший исходного, чтобы уверенно найти начальное решение для $b_{jнач}$, если исходная система уравнений совместна и правильно записана. И потом по итерациям постепенно приближаемся, изменяя пропорционально $b_{jнач}$, пока не достигнем b_{j0}.После этого в соответствии с некоторой функцией $b_{jt}=f_j(b_{j0},t)$ увеличиваем b_{j0} и снова ищем вариант выполнения плана с учетом опыта первого приближения и т.д. до получения в зависимости от ситуации точного или приближенного решения. Для ускорения процесса поиска решения используем разбиение агрегатов (оценок) по их характеристикам. Введем оценки

$$s_{ij}^{vt} = a_{ij} d_{ij}^{vt} \quad (9)$$

где d_{ij}^{vt} – ресурс переменных x_{ij}^{vt}, определяемый на v – м шаге и t – й итерации. Здесь v = 1, 2, …, W – номер шага поиска подходящего закрепления оценок на t – й итерации. оценки s_{ij}^{vt} будем использовать для разделения на классы *A, B, C, D*. Они могут менять свои классы в процессе расчетов.

Оценкой *A* - класса называем оценку $s_{il}^{vt}, l \in J$, которая единственная имеет $s_{il}^{vt} > 0$ в l – м столбце матрицы [s_{ij}^{vt}].

Оценкой B – класса называем оценку $s_{kj}^{vt}, k \in I,$ которая единственная имеет $s_{kj}^{vt} > 0$ в k – й строке матрицы [s_{ij}^{vt}].

Оценкой C – класса называем оценку $s_{kl}^{vt}, k \in I, l \in J,$ которая имеет величину s_{kl}^{vt}, соответствующую условиям:

$$s_{kl}^{vt} = \max_{i,j}[s_{ij}^{vt}] \quad (10)$$

Оценкой D – класса называем оценку s_{ij}^{vt}, которая имеет величину $s_{ij}^{vt} > 0$ и которая не подходит под предыдущую классификацию и закрепляется по

$$\max \quad s_{ij}^{vt} \quad \text{для} \quad \forall\ j \in J\ . \quad (11)$$

Под закреплением оценки s_{ij}^{vt} понимается определение для данного номера (i, j) d_{ij}^{vt}, s_{kl}^{vt} при $k \neq i, l \neq j$ и вводимых величинах b_j^{vt} для оценки j – х строках неравенств (5). Оценки s_{ij}^{vt} в процессе работы алгоритма могут переходить из одного класса в другой.

Введение оценок C– и D – классов основано на применении идеи максимального элемента для поиска допустимого решения [3].

1. Рассчитываем оценки s_{ij}^{vt} матрицы [s_{ij}^{vt}] для начальных значений t и ν считая в (9) $d_{ij}^{00} = z_i$ для всех $j \in J$. Теперь можем рассматривать, как некие группы подмножества $I_j^{vt} = \{s_{ij}^{vt} : s_{ij}^{vt} > 0, i \in I\}$.

2. Определяем, есть ли в группах оценки A- класса. В случае их наличия определяем величину d_{ij}^{vt} для выполнения плана b_j^{vt}. Оставшийся ресурс времени $z_k^{vt} = z_i - d_{kl}^{vt}$ может быть использован в других группах для данного номера агрегата, но с учетом, что каждый раз при переналадке происходит потеря времени ΔT_{ije}.

3. Определяем, есть ли в подмножествах I_j^{vt} агрегаты B- класса. Их время работы $x_{ij}^{vt} = d_{ij}^{vt}$ закрепляем в данной j-той номенклатуре. Если время агрегата z_i использовано полностью и план по группе выполнен полностью, т.е. выполнено условие (5), то эти агрегаты и группу на данной t-той итерации больше не рассматриваем. Это условие используется для 2, 3 и в дальнейшим для 4,5,6 пунктов.

4. В оставшихся группах ищем агрегат C-класса. В случае его наличия закрепляем агрегат в соответствующей группе, определяем d_{ij}^{vt} и повторяем пункт 2.

5. В случае отсутствия агрегатов C-класса ищем агрегат D-класса, закрепляем его в группе, где s_{ij}^{vt} данного агрегата больше и определяем d_{ij}^{vt}. Далее выполняем пункт 2.

6. В случае выполнения условия (5) по всем j выполняем итерацию поиска решения $t := t+1$. Для этого в соответствии с выражением (7) находим очередное b_j^{vt} и выполним пункты, начиная со 2. В случае, если условие (5) в какой-то момент не выполняется, осуществляем перебор возможных закреплений в группах агрегатов $C-, D-$ классов с учетом предыдущих итераций. Если это не приводит к успеху, улучшить решение на данной итерации невозможно.

7. Поиск решения заканчивается или когда исчерпан запас ресурсов, или достигнуты все максимальные значения заданные системой (7).

Выводы

Предлагаемый метод дает удовлетворительные результаты при больших размерностях j и i. Удобен для решения задач целочисленного программирования

К такой форме задачи с ограничениями (5), (6) и критериальными функциями (7) возможно сведение многих оптимизационных задач с различными видами критериев, в т.ч. в нелинейном виде.

Библиографический список

1. Канторович Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов / Л.В. Канторович. - М.: АН СССР. 1959. – 350 с.
2. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений/ А.А. Грешилов. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Ьаумана, 2014. – 647 с.
3. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Е.А. Берзин; ред. Е.В.Золотов. – М.: «Советское радио», 1974. – 304 с.
4. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения/ Р.Штойер. – М.: Радио и связь, 1992. – 594 с.

5. Бронфельд Г.Б. Решение задачи оптимального раскроя материалов//ОПТИМ-2001: сб. докл. , ЦНИИ ТС, СПб., 2001, с. 9-12
6. Дубровин С.С. Использование методов многокритериальной оптимизации при формировании и управлении портфелем ценных бумаг// Известия Тульского государственного университета Естественные науки. 2010. Вып. 2. С. 186–191
7. Бронфельд Г.Б. Алгоритм решения задачи оптимального распределения плана производства//Труды института.Автоматизация и механизация управления производством. Горький, НИИУавтопром, 1977, вып.2, с.75-83
8. Бронфельд, Г.Б. Основы искусственного интеллекта / Г.Б. Бронфельд. – Н. Новгород, 2014. – 253 с.
9. Алешин А.Я., Самсонов В.Г., Фаянс А.М., Федорук В.Н., Целыковский В.П. Подход к созданию АСУТП производства листа из полистирола// Приборы и системы управления, 1975, №2, с.1-2
10. Корбут А.А. Дискретное программирование/ А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн – М.: Наука, 1969. – 368 с.

E.A. Skoropoztizhny, D. V. Baranov, M. A. Butsenko, O. S. Deputatov, G. B. Bronfeld

STATEMENT OF THE PROBLEM OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION WITH THE CHANGEOVERS EQUIPMENT FOR THE SOLUTION BASED ON THE METHOD OF "BALLOON"

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

Purpose. An approach to problem formulation multi-objective optimization with changeovers equipment and nonlinear optimization criteria.

Design/methodology/approach. Statement of the problem goes back to the ideas of L.V. Kantorovich. Account in the formulation changeovers equipment complicates the task. The described method of "balloon" (MB) to solve the task. MB is a hybrid algorithm based on iterative method. In MB includes additional special method of fastening of classes, method of maximum element, branch-and-bound method.

Originality/value. Within the scope of MB for the solution of multicriteria optimization tasks problem formulation the original and published for the first time in the last 15 years

Output (results): To provide some guidelines for solving a wide class of problems with MB.

Key words: optimization; multicriteria; the technique «balloon»; the method of the maximum element; branch-and-bound method; iterative method

УДК 004.9:324

Л.А. Васильева, Ю.С. Егоров

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ ДАКТИЛЬНЫХ ЗНАКОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена вопросам использования технологии дополненной реальности при распознавании языка жестов с целью расширения возможностей коммуникации глухонемых людей с окружающим миром. Рассматривается возможность применения датчика захвата движения рук LeapMotion для автоматического распознавания знаков дактильного алфавита.

Ключевые слова: дополненная реальность; распознавание образов; обработка данных; дактильный алфавит.

Адаптация людей с проблемами слуха и речи к жизни современного общества является важной задачей, достижению которой могут помочь новые технологии в сфере распознавания жестов. Традиционные визуальные методы распознавания жестов все еще не достаточно точны для использования в реальных приложениях. Одной из причин этому являются ограничения оптических сенсоров, чувствительных к условиям освещения и шумам фона. Для получения высокой надежности распознавания жестов также используются информационные перчатки, которые гораздо надежнее, но имеют существенные недостатки: пользователю приходится носить перчатку, которая иногда требует калибровки, что очень неудобно и делает движения ненатуральными. Также зачастую перчатки очень дорогие, хотя в последнее время и ведутся работы по уменьшению стоимости таких устройств [1].
В результате такой метод распознавания жестов не очень популярен.

Благодаря разработке компанией OcuSpecдатчика захвата движения рук LeapMotion появились новые возможности применения дополненной реальности при распознавании языка жестов.

В языке жестов передача информации во время общения происходит по нескольким каналам: непосредственно через жесты руками, выражение лица, форму губ, положение тела и головы. Жесты руками описываются через положение рук, направление движения, форму и направление кистей рук. Таким образом, возможность определения формы и положения кистей рук является очень важной задачей в контексте распознавания жестового языка, которая на данный момент полностью не решена [1].

Поскольку датчик захвата движения рук LeapMotion позволяет отслеживать движение обеих рук и десяти пальцев с необходимой скоростью и точностью, а также обеспечивает возможность оцифровки полученного результата, становится возможным автоматическое распознавание дактильных знаков вспомогательной системы русского жестового языка.

Стоит отметить, что 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, воссоздаются пальцами рук, т.е. каждое положение пальцев означает некоторую букву, аналогичную буквенному алфавиту; по очертанию многие из них отдалённо напоминают буквы печатного шрифта (например, «о», «м», «г», «ш»).

Общение с помощью дактилологии выглядит следующим образом: говорящий человек воспроизводитбуквы на дактиле, а принимающий наблюдает за движением руки и сопоставляет их с азбукой. Если же зрение человека слишком низкое, чтобы видеть знаки, то он воспринимает их осязательно, прим этом,такая форма общения называется дактильно-контактной (ДКР).

На настоящий моментв мире существует 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.

Дактильный алфавит, несмотря на плюсы, имеет ряд недостатков: нет возможности использовать заглавные буквы, а также знаки разделения слов и предложений (пробелы и знаки пунктуации), кроме того, использование слов, показывающие различные эмоции также ограничено.

Русская дактильная азбука (рис. 1) является вспомогательной системой русского жестового языка, в которой каждому из 30 жестов одной руки (обычно правая рука) соответствует одна буква русского языка. Произношениепроисходитсогласно правилам русской орфографии. Дактилология отличается от обычных жестов, которые обозначают понятие или комплекс понятий.

Дактилирование производится плавно и слитно обращённой к собеседнику кистью правой руки, которая согнута в локте, в соответствии с правилами орфографии, проговаривая дактилируемые слова и смотря на собеседника. Слова разделяются паузами, а фразы – остановками. Кисть при дактилировании перемещается влево. В случае ошибки заново дактилируется слово с начала[2].

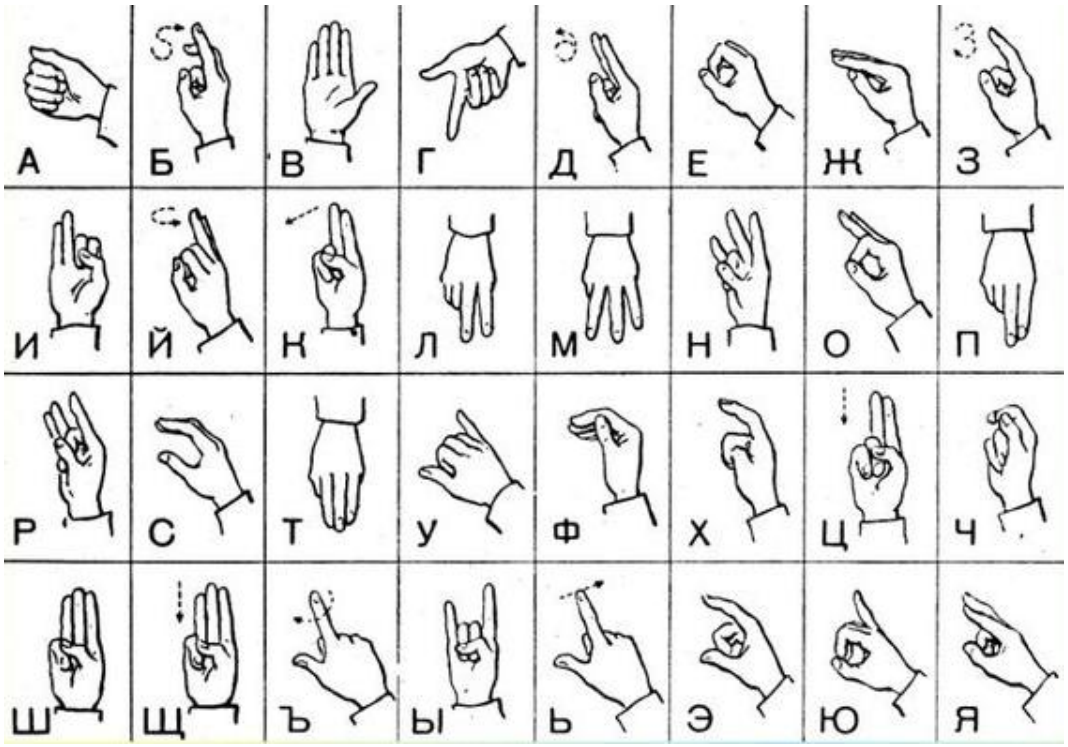


Рис. 1. Русская дактильная азбука [2]

В настоящее время уже существуют программно-технические решения в области распознавания языка жестов:

1. На основе платы IntelEdison создана перчатка, которая принимает сведения от датчиков, закреплённых на ней, обрабатывает их с использованием метода опорных векторов, узнаёт, какой букве соответствует жест, и отправляет то, что получилось, Android-приложению для озвучивания.
2. В Калифорнийском университете Сан-Диего (США) изобрели перчатку, которая превращает знаки языка жестов в текст на экране компьютера или смартфона.

Перчатка состоит из стандартной спортивной перчатки, оснащенной девятью гибкими сенсорами, которые расположены над костяшками пальцев.

3. В Малайзии создан переводчик языка жестов (ASLT). Система обеспечивает возможность обнаружения и распознания движений мышц лица, рук и верхней части туловища человека.

В отличие от описанных решений для автоматического распознавания дактильных знаков предлагается использовать технологию дополненной реальности.

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]. При этом с помощью технических средств в воспринимаемой человеком реальности появляются «дополнительные» элементы (когда виртуальные объекты «монтируются» в его поле восприятия).

Таким образом, система автоматического распознавания дактильных знаков (рис. 2), используя оцифрованные данные с датчика захвата движения рук LeapMotion, позволит модулю обработки данных (МОД) сопоставлять дактилемы со знаками, содержащимися в заранее подготовленных библиотеках,а после сохранения полученного результата в базе данных, выдавать через модуль визуализации данных (МВД) на экран пользователю целые слова и даже предложения на естественном языке.

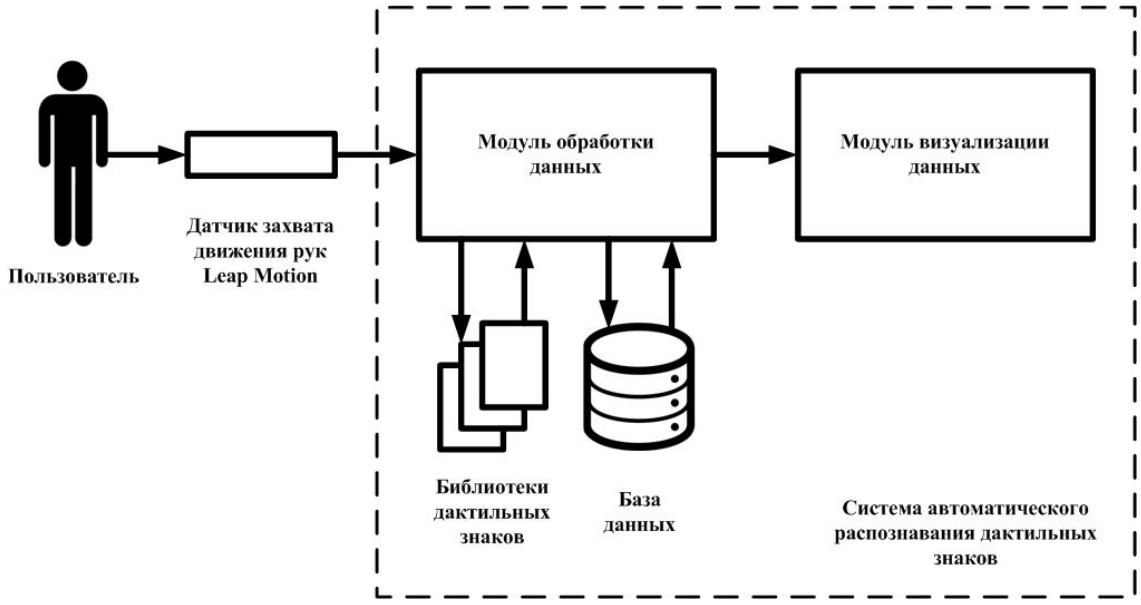


Рис. 2. Система автоматического распознавания дактильных знаков

Предполагается, что такая система должна обладать возможностью самообучения. Однако, самообучение возможно только при наличии в системе аналитической подсистемы с базой знаний, включающей в себя как базу правил, так и базу моделей. На основе начальных знаний будут формироваться начальные модели, которые можно применить для моделирования дактилем.

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

При этом планируетсяиспользовать метод опорных векторов – алгоритм обучения с учителем, который анализирует данные, используемые для классификации и регрессионного анализа. На вход системы подается набор обучающих примеров, каждый из которых принадлежит одной из *n* категорий, затем на основе этих данных строится модель, которая классифицирует новые наборы показателей, относя их к одной из существующих категорий. На

основе обучающих примеров алгоритм находит оптимальную гиперплоскость, что позволяет ему относить к существующим категориям новые примеры.

Разработанные таким образом библиотеки могут содержать дактильные алфавиты различных мировых языков, что позволит решить одну из актуальных проблем, связанных с распознаванием дактильных знаков.

На рисунке 3 показан пример применения датчика захвата движения рук LeapMotion для моделирования знаков русского дактильного алфавита.

Рис. 3. Пример применения датчика захвата движения рук LeapMotion

Автоматическое распознавание знаков русской дактильной азбуки с использованием технологии дополненной реальности позволит расширитьвозможности коммуникации глухонемых людей с окружающим миром.

Библиографический список

1. Дорофеев Н.С., Розалиев В.Л., Орлова Ю.А., Солошенко А.Н. Система распознавания дактильных жестов русского языка глухих // Известия ВолгГТУ. 2013. № 14 (117). С. 42-45.
2. Зайцева Г. Л. Жестовая речь. Дактилология: учеб.для студ. высш. учеб. заведений. – 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., Милов В.Р., Суслов Б.А. Способы аналитической обработки для системы поддержки принятия решений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 2. С. 12-15.

L.A. Vasilyeva, Y.S. Yegorov

FINGERSPELLING RECOGNITION USING AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY

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

The work is devoted to the use of the augmented reality technologies in the fingerspellingrecognition with the purpose of deaf people adaptation. The possibility of using the Leap Motion sensor for automatic recognition of manual alphabet signs is considered.

Keywords: augmented reality; pattern recognition; data processing; fingerspelling.

УДК 623.396

А.Ф. Гаджиев, А.Н. Попов, А.В. Рябов

АЛГОРИТМ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

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

Предложен алгоритм тактовой синхронизации для высокоскоростных телекоммуникационных сетей на основе модернизации метода интегральной аппроксимации апостериорной плотности распределения вероятности.

Ключевые слова: тактовая синхронизация, фазовая автоподстройка частоты, интегральная аппроксимация, фильтрация, синхронизм

Введение

В современных телекоммуникационных системах качество передачи информации во многом зависит от точности тактовой синхронизации. При этом в высокоскоростных сетях передачи информации требования к синхронизации ужесточаются и должны обеспечить минимальное время вхождения в синхронизм при первоначальном включении и минимальное время восстановления синхронного режима работы при его нарушении, а также высокую стабильность состояния синхронизма элементов сети, при непрерывном и автоматическом его поддержании.

Решение задач тактовой синхронизации генераторов в телекоммуникационных сетях, как правило, основывается на построении системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генератора на приемной стороне. При этом, для осуществления ФАПЧ на приемной стороне необходимо оценивать фазу принятого сигнала [1].

Представим сигнал, вырабатываемый опорным генератором (ОГ) на передающей стороне линии связи в виде гармонического колебания

$$S(t,\varphi) = A\sin\left(\omega_0 t + \varphi(t)\right), \quad (1)$$

где $-\pi \le \varphi(t) \le \pi$ – случайная винеровская фаза колебания, задаваемая уравнением [1]:

$$d\varphi(t)/dt = n_\varphi(t); \quad (2)$$

$n_\varphi(t)$ – белый гауссовский шум (БГШ), обусловленный внутренними шумами ОГ, с нулевым средним и корреляционной функцией $M[n_\varphi(t_1)\cdot n_\varphi(t_2)] = (N_\varphi/2)\cdot\delta(t_2 - t_1)$.

На приемной стороне линии связи наблюдается смесь полезного сигнала и шума:

$$\xi(t) = S(t,\varphi) + n_0(t), \quad (3)$$

где $n_0(t)$ – БГШ, обусловленный внешними шумами (помехами), с нулевым средним и корреляционной функцией $M[n_0(t_1)\cdot n_0(t_2)] = (N_0/2)\cdot\delta(t_2 - t_1)$ [1].

Для осуществления ФАПЧ ОГ на приемной стороне, необходимо получить алгоритм оптимальной фильтрации случайной фазы $\varphi(t)$ принятого сигнала. За критерий оптимальности принимаем максимум апостериорной плотности распределения вероятности (АПРВ) случайной фазы сигнала и минимум среднего квадрата ошибки фильтрации. При этом наибольший интерес представляет решение задачи фильтрации фазы принятого сигнала при малых отношениях сигнал/шум.

Поскольку уравнение сообщения (3) нелинейно относительно фазы $\varphi(t)$, необходимо решить задачу нелинейной фильтрации. Точное, в теоретическом плане, решение задачи

нелинейной фильтрации случайной винеровской фазы сигнала, основывается на решении уравнений Стратоновича [1, 2]:

$$\partial\, p(t,\varphi)/\partial t = 0.25 N_{\varphi}\, \partial^2\, p(t,\varphi)/\partial\varphi^2 + \left[F(t,\varphi) - \int_{-\pi}^{\pi} F(t,\varphi)\, p(t,\varphi)\, d\varphi \right] p(t,\varphi); \quad (4)$$

$$F(t,\varphi) = 2N_0^{-1}\left(\xi(t) - S(t,\varphi)\right)^2 \approx 2A\xi(t)N_0^{-1}\sin\left(\omega_0 t + \varphi(t)\right). \quad (5)$$

Однако, точные решения уравнений нелинейной фильтрации можно получить в немногих частных случаях [1, 2]. В связи с этим актуальной остается разработка приближенных решений уравнений нелинейной фильтрации.

Цель данной работы – осуществить сравнительный анализ существующих приближенных методов решения нелинейных уравнений Стратоновича и предложить модернизацию метода интегральной аппроксимации АПРВ, позволяющую повысить точность фильтрации фазы сигнала и уменьшить время вхождения в синхронизм.

Анализ приближенных методов решения нелинейных уравнений фильтрации случайной фазы принятого сигнала

Наибольшее распространение получил синтез алгоритмов нелинейной фильтрации с использованием методов аппроксимации АПРВ $p(t, \varphi)$, некоторой функцией $p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})$ из параметризированного класса $\boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\Psi}$ [1].

Методы аппроксимации АПРВ можно разбить на два класса: локальная и интегральная аппроксимация [1].

При локальной аппроксимации приближенные алгоритмы фильтрации получают на основе аппроксимации точного решения лишь в малой области оценочного значения $\hat{\varphi}(t)$ фильтруемого параметра. Такой подход позволяет в частных случаях получать работоспособные алгоритмы.

Обычно локальная аппроксимация основывается на замене плотности вероятности $p(t, \varphi)$ нормальной плотностью вероятности $p\left(\hat{\varphi}(t)\, R(t)\right)$, где $-\pi < \hat{\varphi}(t) < \pi$, $0 < R(t) < \infty$. Рассмотрим некоторые квазиоптимальные алгоритмы, основанные на таком подходе.

1. Расширенный фильтр Калмана.

Данный квазиоптимальный алгоритм основан на приближенном сведении исходной нелинейной задачи фильтрации к линейной путем разложения нелинейных функций, входящих в уравнения наблюдения и сообщения, в ряд Тейлора в окрестностях оценки $\hat{\varphi}$ [1]. При этом, алгоритм фильтрации винеровской фазы принимает следующий вид:

$$d\hat{\varphi}/dt = 2A\xi(t)R(t)N_0^{-1}\cos\left(\omega_0 t + \hat{\varphi}(t)\right); \quad (6)$$

$$dR(t)/dt = N_{\varphi}/2 - A^2\, R^2(t)N_0^{-1}. \quad (7)$$

2. Локальные методы аппроксимации, основанные на поиске приближенных решений уравнения Стратоновича.

Решение ищется в виде разложения логарифма АПРВ $p(t, \varphi)$ в ряд Тейлора в окрестностях приближенной оценки $\hat{\varphi}$, соответствующей максимуму АПРВ [1]. Уравнение оценки и ошибки фильтрации винеровской фазы радиосигнала в этом случае можно представить в виде:

$$d\hat{\varphi}/dt = 2A\xi(t)R(t)N_0^{-1}\cos\left(\omega_0 t + \hat{\varphi}(t)\right); \quad (8)$$

$$dR(t)/dt = N_{\varphi}/2 - A^2\, R^2(t)\xi(t)N_0^{-1}\sin(\omega_0 t + \widehat{\varphi}(t)). \qquad (9)$$

Основным недостатком локальных методов аппроксимации АПРВ является их применимость только при малых ошибках фильтрации (больших отношениях сигнал/шум), когда требуется получить хорошую аппроксимацию решения основного уравнения фильтрации лишь в небольшой окрестности оценки $\widehat{\varphi}(t)$ фильтруемого параметра. Данный недостаток не позволяет применить данный вид аппроксимации для решения многих практически важных задач [2].

При интегральной аппроксимации приближенные алгоритмы фильтрации получают на основе аппроксимации точного решения $p(t, \varphi)$ некоторой плотностью вероятности $p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})$, выбираемой на основании физических представлений. При этом решение ищется во всей области возможных значений фильтруемого параметра φ по некоторому интегральному критерию, что особенно важно при малых отношениях сигнал/шум [2]. В качестве такого критерия удобно рассматривать минимум меры Кульбака [3], обеспечивающий минимальные потери информации за счет аппроксимации АПРВ. Достоинство данного критерия состоит в подчеркивании «хвостов» распределения и придании им большей значимости. Согласно этому критерию, в аппроксимирующей плотности вероятности параметры $\boldsymbol{\alpha}$ подбираются такими, что они минимизируют интеграл [3]

$$\widehat{\boldsymbol{\alpha}}(t) = \min_{\alpha}{}^{-1}\left\{-\int_{-\infty}^{\infty} p(t, \varphi)\ln\left[p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})/\, p(t, \varphi)\right]d\varphi\right\}. \qquad (10)$$

Необходимое условие минимума для критерия Кульбака [3]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \partial\left[p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})\right]/\partial\boldsymbol{\alpha}\; p(t, \varphi)\ln d\varphi = 0\,. \qquad (11)$$

Тогда общее уравнение для параметров аппроксимирующей плотности вероятности представим в виде:

$$\frac{\partial\boldsymbol{\alpha}}{\partial t} = \frac{\mathrm{M}\left[\mathrm{L}^{+}\left[\dfrac{\partial\ln\{p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})\}}{\partial\boldsymbol{\alpha}}\right]\right] + \mathrm{M}\left[\dfrac{\partial\ln\{p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})\}}{\partial\boldsymbol{\alpha}}\right]\cdot F(t, \varphi)}{\mathrm{M}\left[-\dfrac{\partial^2\ln\{p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})\}}{\partial\boldsymbol{\alpha}\,\partial\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}}\right]}, \qquad (12)$$

где M[·] – математическое ожидание; $\mathrm{L}^{+}[\cdot]$ – оператор, обратно сопряженный оператору Фоккера-Планка-Колмогорова [3].

Рассмотрим два известных вида интегральной аппроксимации.

1. Аппроксимирующая плотность вероятности ищется в классе нормальных плотностей вероятности $p(\widehat{\varphi}(t)\, R(t))$ [2, 4]:

$$p(\widehat{\varphi}(t)\, R(t)) = 1/\sqrt{2\pi\, R(t)}\exp\left\{-(\varphi(t) - \widehat{\varphi}(t))^2/2\, R(t)\right\}. \qquad (13)$$

В этом случае алгоритм фильтрации винеровской фазы принимает вид [2]:

$$d\,\widehat{\varphi}/d\,t = 2A\xi(t)R(t)N_0^{-1}\exp\{-R(t)/2\}\cos(\omega_0 t + \widehat{\varphi}(t))\,; \qquad (14)$$

$$dR(t)/dt = N_\varphi/2 - 2AR^2(t)\xi(t)N_0^{-1}\exp\{-R(t)/2\}\sin(\omega_0 t + \widehat{\varphi}(t)). \quad (15)$$

2. Аппроксимация Т-распределением [2]:

$$p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha}) = 1/\sqrt{2\pi I_0(\Lambda)}\exp\{\Lambda\cos(\varphi - m_\varphi(t))\}, \quad (16)$$

где $I_0(\Lambda)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента; $\boldsymbol{\alpha} = \{m_\varphi(t), \Lambda(t)\}$ – параметры распределения, $\Lambda \geq 0$; $\varphi \in [m_\varphi - \pi, m_\varphi + \pi]$.

Данная плотность вероятности периодично с периодом 2π, стремится к нормальному закону $p(m_\varphi, 1/\Lambda)$ при больших Λ, при Λ стремящимся к нулю она переходит в равномерную плотность вероятности.

Тогда алгоритм фильтрации случайной винеровской фазы можно найти в виде [2]:

$$d\ m_\varphi(t)/d\,t = 2A\xi(t)N_0^{-1}/\Lambda(t)\cos(\omega_0 t + m_\varphi(t)); \quad (17)$$

$$d\Lambda(t)/dt = -N_\varphi/4\ f_1(\Lambda) + 2A\xi(t)N_0^{-1}\sin(\omega_0 t + m_\varphi(t)), \quad (18)$$

где
$$1/\Lambda(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(\varphi - m_\varphi(t))^2\, p(t, \varphi, \boldsymbol{\alpha})d\varphi; \quad (19)$$

$$f_1(\Lambda) = I_1(\Lambda)/I_0(\Lambda)\left(1 - I_1(\Lambda)/(\Lambda(t)I_0(\Lambda)) - [I_1(\Lambda)/I_0(\Lambda)]^2\right)^{-1}; \quad (20)$$

$I_1(\Lambda)$ – модифицированная функция Бесселя первого порядка от мнимого аргумента.

Анализ зависимости дисперсий ошибки фильтрации для рассмотренных выше алгоритмов от отношения сигнал/шум

$$q = 4A^2/(N_\varphi \cdot N_0) \quad (21)$$

показывает, что при больших отношениях сигнал/шум все алгоритмы имеют точность близкую к потенциальной.

При малых отношениях сигнал/шум точность алгоритмов фильтрации, реализованных на рассмотренных выше методах аппроксимации, значительно ниже потенциальной. Наиболее точный алгоритм фильтрации, из рассмотренных выше, позволяет получить интегральная *Т*-аппроксимация (17), (18) [2]. Однако, такой алгоритм является громоздким и трудно реализуемым на практике. Наихудшая точность в области малых отношений сигнал – шум у квазиоптимального локального алгоритма [2].

При отношениях сигнал/шум стремящихся к нулю, в соответствии с принятым критерием (в отсутствии полезного сигнала приведенная ошибка всех алгоритмов распределена равномерно в интервале $(-\pi, \pi)$), значение рассматриваемых дисперсий стремится к пределу

$$\lim_{q\to 0} M\{[\varphi - \widehat{\varphi}(t)]^2\} = \pi^2/3. \quad (22)$$

Не вполне удовлетворяют рассмотренные выше алгоритмы и по такой характеристике, как время вхождения в синхронизм, что имеет большое значение при проектировании систем ФАПЧ.

Таким образом, анализ рассмотренных выше алгоритмов показывает, что они не в полной мере удовлетворяют решению поставленной задачи.

Модернизация метода интегральной аппроксимации апостериорной плотности распределения вероятности

Для решения задачи фильтрации фазы принятого колебания при малых отношениях сигнал/шум целесообразно использовать модернизированную интегральную аппроксимацию на основе использования гауссовского распределения.

Представим дисперсию ошибки фильтрации $R(t)$ истинной АПРВ $p(t, \varphi)$ случайной винеровской фазы принятого сигнала в виде:

$$1/R(t) = 1/R1(t) + 3/\pi^2, \tag{23}$$

где $R1(t)$ – составляющая дисперсии ошибки фильтрации аппроксимирующей АПРВ без учета постоянной составляющей.

Будем искать аппроксимирующую АПРВ в семействе нормальных плотностей вероятности типа (13) с учетом представления (23):

$$p(\varphi, m(t)\, G1(t)) = \sqrt{G1(t)/2\pi}\, \exp\left\{-G1(t)\left(\varphi - m_\varphi(t)\right)^2/2\right\}; \tag{24}$$

$$G1(t) = 1/R1(t) = G(t) - 3/\pi^2; \tag{25}$$

где $0 \le G1(t) \le \infty$.

Тогда на основе введенных функций (24) и (25), найдем приближенный алгоритм фильтрации фазы $\varphi(t)$ принятого сигнала:

$$d\, m_\varphi(t)/d\, t = 2A\xi(t)N_0^{-1}/\left(G(t) - 3/\pi^2\right)\cos\left(\omega_0 t + \widehat{\varphi}(t)\right); \tag{26}$$

$$dG(t)/dt = -N_\varphi/2\left(G(t) - 3/\pi^2\right)^2 + 2A\xi(t)N_0^{-1}\sin\left(\omega_0 t + \widehat{\varphi}(t)\right) \tag{27}$$

На рисунке 1 приведены зависимости дисперсии $R(t) = d^2$ стационарной ошибки фильтрации случайной винеровской фазы от отношения сигнал/шум q, полученные на основе имитационного моделирования алгоритмов (4), (7), (18) и (27).

При этом функция d^2 соответствует точному решению (4); функция ${d_1}^2$ – расширенному фильтру Калмана (7); функция ${d_2}^2$ – Т-аппроксимации (18); функция ${d_3}^2$ – модернизированной интегральной аппроксимации (28). Функции d^2 и ${d_3}^2$ совпадают.

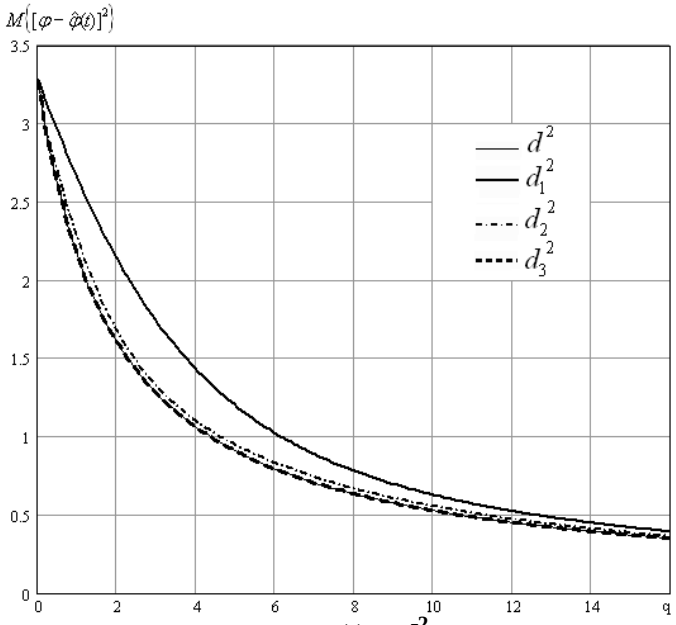


Рис. 1. Графики зависимости дисперсии $R(t) = d^2$ стационарной ошибки фильтрации винеровской фазы колебания от отношения сигнал/шум q

Как видно из результатов моделирования предложенная модернизированная интегральная аппроксимация АПРВ на основе использования нормального закона распределения вероятности, позволяет получить алгоритм фильтрации случайной фазы $\varphi(t)$ принятого колебания, совпадающий с точным решением. Это говорит об оптимальности полученного алгоритма (26), (27) для решения задачи фильтрации случайной винеровской фазы радиоколебания.

Выводы

Таким образом, предложена модернизация метода интегральной аппроксимации апостериорной плотности вероятности случайной фазы принятого сигнала, учитывающая границы распределения и предельное значение приведенной ошибки фильтрации.

Разработанные на основе полученной аппроксимации алгоритмы фильтрации случайной фазы принятого сигнала, удовлетворяющие критерию оптимальности, как при больших, так и при малых соотношениях сигнал/шум. Данные алгоритмы позволяют реализовать систему фазовой автоподстройки частоты генераторов, отличающуюся высокой точностью тактовой синхронизации и малым временем вхождения в синхронизм, что является актуальным при построении высокоскоростных телекоммуникационных сетей.

Библиографический список

1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь. 1991. 608с.

2. Харисов В.Н., Федоров А.И. Синтез алгоритмов нелинейной фильтрации на основе интегральной аппроксимации апостериорной плотности вероятности // Научно-методические материалы по статистической радиотехнике. М.: ВВИА им. Жуковского. 1985. С.161-166.

3. Справочник по специальным функциям / Под ред. М.А. Абрамовича и И. Стиган. Пер. с англ. Под ред. В.А.Диткина и Л.Н. Кармизиной. М.: Наука. 1979. 830с.

A.F. Gadgiev, A.N. Popov, A.V. Ryabov

CLOCK SYNCHRONIZATION ALGORITHM FOR HIGH-SPEED TELECOMMUNICATIONS NETWORKS

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

An algorithm for clock synchronization for high-speed telecommunications networks through the modernization method of integral approximation posteriori probability density distribution.

Key words: clock synchronization, phase-locked loop, integral approximation, filtering, synchronism.

УДК 621.391

А.Ю. Гуляев

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ С АДАПТИРУЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ В СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ 5G

ООО "МЕРА НН"

Настоящая статья рассматривает основные этапы развития сетей сотовой связи.
Анализируются основные проблемы и пути их решения. В работе представлен алгоритм использования динамической многопозиционной *M*-QAM модуляции с защитой целостности информации методами мягкого декодирования.

Ключевые слова: сеть сотовой связи, GSM, UMTS, LTE, эволюция сетей, 5G, OFDM, помехоустойчивое кодирование, коды с переменными параметрами

Уже к середине 20-х годов XXI века, человечество будет широко использовать такие технологии и сервисы как виртуальная реальность, дополненная реальность, тактильный интернет, беспилотное вождение транспорта и многое другое затрагивающее все сферы нашего общества. Это станет возможным благодаря интенсивному развитию сетей сотовой связи.

В 1981 году шведская компания «Ericsson» запустила в эксплуатацию первую в мире сеть сотовой связи на основе стандарта NMT-450 (*Nordic Mobile Telephone – Скандинавская мобильная телефония*), использующая аналоговую модуляцию радиосигнала по стандарту NMT и предназначенная для передачи только голосового трафика. В этой технологии, позднее названой поколением сотовой связи 1G, использовались частоты выше 150 МГц, а скорость передачи информации составляла 2,4 Кбит/с.

Спустя 10 лет на смену первому поколению пришёл новый стандарт GSM (*Global System for Mobile Communications - Глобальная система мобильной связи*). Первая в мире сеть GSM была построена в 1991 году в Финляндии и действует до сих пор в 212 странах. Такое распространение стандарта позволило организовать международный роуминг между операторами сотовой связи, что стало главным отличием от поколения 1G. В основе данной технологии лежат два принципа разделения каналов TDMA (*Time Division Multiple Access - множественный доступ с временным разделением*) основанный на временном разделении доступа и FDMA (*Frequency Division Multiple Access — множественный доступ с разделением каналов по частоте*) основанный на частотном разделении каналов в зависимости от используемого типа мультиплексирования, где применяется GMSK-модуляция с величиной нормированной полосы BT - 0,3, где B - ширина полосы фильтра по уровню минус 3 дБ, T - длительность одного бита цифрового сообщения. Данный стандарт работает в 4 частотных диапазонах, зависящих от региона использования: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц и позволяет передавать данные со скоростью до 64 Кб/с. Но появление новых технологий, сервисов и развитие всего интернета в целом привели к потребности перенести все это в область беспроводных устройств, что повлекло за собой появление GPRS (*General Packet Radio Service - услуги пакетной передачи данных общего пользования*). Благодаря изменению модуляции на восьмипозиционную фазовую манипуляцию была внедрена технология EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution – увеличенная скорость передачи данных*) увеличивающая скорость до 474 Кб/с.

Применяющиеся в стандарте GSM технологии перестали удовлетворять быстро растущее число пользователей сетей связи по скорости передачи данных, что стимулировало развитие систем третьего поколения 3G. Главной задачей стояло обеспечить легкую миграцию с сетей второго поколения. Для этого, стандарт, называемый UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System - Универсальная Мобильная Телекоммуникационная Система*), стал основным выбором для операторов GSM. В основе данного стандарта применяется технология

WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access -широкополосный множественный доступ с кодовым разделением*). Это технология радиоинтерфейса, использующая широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов, использующий две широкие полосы радиочастот по 5 МГц, работающий в диапазоне 1900-2100 МГц. Технология оптимизирована для предоставления высокоскоростных мультимедийных услуг типа видео, доступа в интернет и видеоконференций. Она обеспечивает скорости доступа вплоть до 2 Мбит/с на коротких расстояниях и 384 Кбит/с на больших с полной мобильностью. Дальнейшее развитие привело к появлению технологии HSDPA (High Speed Downlink Packet Access - *высокоскоростная пакетная передача данных от базовой станции к мобильному телефону*), которая наряду с HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access - высокоскоростная пакетная передачи данных в направлении "от абонента"*) входит в семейство технологий высокоскоростной передачи данных HSPA (*High Speed Packet Access - высокоскоростная пакетная передача данных*). Здесь применяется новый метод модуляции 16-QAM. Благодаря этому способу модуляции скорость передачи информации возросла в 3 раза. Однако, в отличие от GPRS/EDGE, данный вид модуляции, это не единственное важное изменение. Наряду с новым методом модуляции сигнала HSDPA предусматривает также использование скоростной системы автоматических перезапросов HARQ (*Hybrid automatic repeat request - Гибридный автоматический запрос повторения*). Этот механизм отвечает за автоматический перезапрос потерянных или испорченных ошибками пакетов. Использование широкополосного доступа привело к главному недостатку сетей связи, использующих W-CDMA: неэкономичная эксплуатация спектра и необходимость освобождения уже занятых под другие службы частот.

Стандарты третьего поколения вполне соответствуют запросам абонентов в настоящее время. Однако, объемы передаваемой информации в телекоммуникационных сетях стремительно растут. Чтобы удовлетворить потребности пользователей по скорости передачи данных и набору услуг хотя бы на 20 лет вперед необходим новый стандарт, уже четвертого поколения. В январе 2008 г. международное объединение 3GPP (*Third Generation Partnership Project - консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии*), разрабатывающее перспективные стандарты мобильной связи, утвердило LTE (*Long-Term Evolution - долговременное развитие*) в качестве следующего после UMTS стандарта широкополосной сети мобильной связи. Целью разработки LTE было увеличение пропускной способности и скорости с использованием нового метода цифровой обработки сигналов и модуляции, которые были разработаны на рубеже тысячелетий. Ещё одной целью было реконструировать и упростить архитектуру сетей, основанных на IP, значительно уменьшив задержки при передаче данных по сравнению с архитектурой 3G сетей.

Сеть LTE строится из двух важнейших компонентов*:* сети радиодоступа и базовой сети SAE (*System Architecture Evolution - Эволюция системной архитектуры*). SAE является эволюционным продолжением пакетной сети GPRS, но привносящая глобальные изменения. Во-первых, сеть стала целиком основана на IP (*AIPN - All IP Network - IP сети*). Во-вторых, произошло упрощение архитектуры сети. Для обеспечения необходимой функциональности в рамках LTE, в структуре SAE, слой управления сдвигается от базовой сети к сети радиодоступа. Управляющие узлы RNC (*Radio Network Controller — контроллер радиосети*) удаляются и управление радиочастотным ресурсом передается базовым станциям. Новый тип базовых станций получил название eNodeB или eNB.

Глобальные изменения произошли и в сети радиодоступа. Радиоинтерфейс сети LTE стал поддерживать оба метода дуплексного разнесения каналов: частотный FDD и временной TDD. Функционирование сетей LTE может осуществляться в частотных диапазонах с различной шириной. Сигналы нисходящего (от базовой станции к мобильному устройству) и восходящего (от мобильного устройства к базовой станции) направлений могут занимать полосы от 1,4 до 20 МГц в зависимости от количества активных ресурсных блоков. Передача информации в восходящем и нисходящем направлениях организована в кадрах, длительность

которых равна 10 мс. Кадры подразделяются на более мелкие временные структуры - слоты. В режиме с частотным разнесением FDD кадр делится на 20 слотов, нумеруемые от нулевого до девятнадцатого, каждый из которых имеет длительность 0,5 мс. В режиме FDD временной ресурс в пределах кадра разделен пополам для передачи в противоположных направлениях. Физические каналы в режиме FDD в противоположных направлениях имеют обязательный дуплексный разнос. Режим временного разнесения каналов TDD имеет асинхронную природу. Передача данных в режиме TDD происходит одновременно в обоих направлениях в одном диапазоне частот.

В LTE в канале от базовой станции к мобильному устройству, используется модуляция OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов*). Технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида $S_k(t) = A_k \cdot \sin [2\pi (f_0 + k\Delta f)]$, расположенных с определенным шагом по частоте Δf. Один OFDM-символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области OFDM-символ включает поле данных (полезная информация) и так называемый циклический префикс CP (*Cyclic Prefix – циклический префикс*) - повторно передаваемый фрагмент конца предыдущего символа. Назначение префикса - борьба с межсимвольной интерференцией в приемнике вследствие многолучевого распространения сигнала. Отраженный сигнал, приходящий с задержкой, попадает в зону префикса и не накладывается на полезный сигнал. В LTE принят стандартный шаг между поднесущими Δf = 15 кГц, что соответствует длительности OFDM - символа 66,7 мкс.

В восходящем канале, где излучаемая мощность значительно ниже, чем в нисходящем, крайне важно задействовать энергоэффективный метод передачи информации с целью увеличения зоны покрытия, снижения стоимости терминального устройства и потребляемой им мощности. Для восходящего канала LTE была выбрана одночастотная технология передачи информации в виде OFDM с дисперсией по закону дискретного преобразования Фурье (другое название - SC-FDMA).

Еще одной отличительной особенностью LTE является использование многоантенной передачи информации MIMO (*Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход*), в которой предусмотрены два метода передачи: разнесенная и многопоточная (с предварительным кодированием), частным случаем которой является формирование узкого радиолуча. Здесь, разнесенная передача основана на методе пространственно-частотного блочного кодирования, дополненного разнесением по времени со сдвигом частоты при использовании четырех антенн. Разнесенная передача применяется в основном на общих нисходящих каналах, в которых нельзя использовать функцию диспетчеризации в зависимости от состояния канала связи (*channel-dependent scheduling*). Однако разнесенную передачу можно задействовать для пересылки пользовательских данных – например, трафика IP телефонии.

В настоящее время LTE является передовым стандартом, но для реализации будущих технологий этого уже недостаточно, поэтому активно ведутся работы по созданию нового стандарта для технологии передачи данных 5G. Альянс мобильных сетей следующего поколения уже определил следующие требования, которым должны соответствовать стандарты 5G:

1. Скорость передачи данных десятки Мбит/с для десятков тысяч пользователей одновременно;
2. Скорость передачи данных 100 Мбит/с в условиях мегаполисов;
3. Скорость передачи данных 1 Гбит/с одновременно для многих пользователей на одном этаже;
4. Одновременное подключение несколько сот тысяч беспроводных датчиков;
5. Более высокая спектральная эффективность по сравнению с 4G;

6. Улучшение охвата;
7. Повышение эффективности передачи сигнала;
8. Значительное снижение задержки по сравнению с LTE.

Рост скорости передачи информации требует увеличения пропускной способности каналов связи. Известно, что существует два пути увеличения пропускной способности канала связи – это увеличение средней мощности сигнала и расширение полосы частот, занимаемой сигналом. Увеличение мощности сигнала для мобильной связи ограничивается стандартами на допустимые уровни электромагнитного излучения и массогабаритными параметрами передатчиков и источников питания носимых абонентских приемо-передатчиков – аккумуляторов. Кроме того, увеличение средней мощности сигнала абонентского терминала сотовой связи ограничивается из-за негативных влияний электромагнитного излучения на этих частотах на человеческий организм и по этой причине не превышает 1 Вт. Поэтому основной путь для увеличения скорости информационного обмена в сетях мобильной связи состоит в расширение полосы частот, выделяемой для информационного обмена. Расширение полосы частот, является главным условием для создания нового поколения мобильной связи 5G. Но выделение новых частот в существующем диапазоне до 5 ГГц проблематично по причине перегруженности всех основных полос, поэтому рассматривается вариант перехода в диапазон более высоких частот, вплоть до 90 ГГц.

Главным достоинством ММД является возможность использования широкой полосы частот, но есть и серьезные недостатки, сдерживающие развитие телекоммуникаций в этом диапазоне, а именно:

- сильное затухание миллиметровых волн при распространении;
- уровень принимаемого сигнала существенно зависит от влияния гидрометеоров (капли дождя, снег, град, туман) и от присутствия в атмосфере твердых неоднородностей (листва деревьев, стаи птиц, пыль);
- высокая степень влияния на уровень принимаемого сигнала закрывающих трассу препятствий;
- наличие зон сильного ослабления сигнала на некоторых частотах из-за ослабления сигналов ММД частот молекулами кислорода и парами воды.

В настоящий момент различными ведущими компаниями предлагается большой ассортимент применения различный технологий таких как не ортогональные сигнальные конструкции. Для решения проблем связанных с многолучевым характером распространения полезного сигнала приводящего к длинным замираниям, а также проявлениям эффекта Доплера, в данной работе предлагается алгоритм использование динамической *M*-QAM модуляции, с защитой целостности информации методами помехоустойчивого кодирования совместно с методами мягкого декодирования, в частности декодирования стираний описанный [1,2].

Выводы

В работе демонстрируется приспосабливаемость системы к состоянию канала, путем адаптации крекирующей способности кода (с целью минимизации избыточности), и размерности поля GF(Q), для обеспечениея заданного уровня целостности информации при передаче по ненадежному каналу при приемлемой вычислительной сложности. Система применима как к новейшим методам и технологиям 5 поколения мобильных сетей так и в виде надстройкой к уже повсмеметно используемым стандартам UMTS и LTE.

Библиографический список

1. Семашко А.В. Защита целостности информации кодами с переменными параметрами**.** «Электросвязь» №11 2012 г., с.36-38.
2. Семашко А.В. Декодирование стираний кодами с переменными параметрами для ионосферных каналов связи. «Информационно-измерительные и управляющие системы» № 7, т.11, 2013, с. 85-90.
3. Abdelaziz Soulimani and Hatim Chergui. Performance Analysis of M-QAM Multihop Relaying over mmWave Weibull Fading Channels - IEEE Transactions Wireless Communications, Nov. 2016
4. Yunlong Cai, Zhijin Qin, Fangyu Cui, Geoffrey Ye Li, and Julie A. McCann. Modulation and Multiple Access for 5G Networks - IEEE Transactions Wireless Communications, Feb. 2017
5. Электронный ресурс. http://wikipedia.com/

A.Y. Gulyaev

APPLICATION OF CORRECTIVE CODES WITH ADAPTABLE PARAMETERS IN CELLULAR SYSTEMS 5G

LTD «Mera NN»

This article examines the main stages of the development of cellular communication networks. The main problems and ways of their solution are analyzed. The paper presents an algorithm for using dynamic multi-position M-QAM modulation with protection of information integrity by soft decoding methods.

Key words: cellular communication network, GSM, UMTS, LTE, evolution of networks, 5G, OFDM, noise-immune coding, codes with variable parameters.

УДК 004.414

Н.Г. Дмитриева

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ФОРМАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается применения анализа формальных понятий как метода концептуального моделирования требований при управлении системной архитектурой предприятия.

Ключевые слова: концептуальное моделирование, концептуальная модель, анализ формальных понятий, *FCA*, решетка понятий, импликации.

В основе проектирования и управления информационными системами (ИС) лежит моделирование предметной области. Под моделью предметной области понимается формализация, обеспечивающая однозначное описание структуры предметной области.

Построение концептуальной модели, может рассматриваться, как начальный этап описания предметной области. При этом определяются важные для анализируемой предметной области понятия, а также отношения между этими понятиями [1]. Концептуальная модель относится к более высокому уровню абстракции описания требований к структуре и обработке информации чем модели и схемы баз данных.

При анализе предметной области принято выделять три этапа:

- анализ информационных потребностей и формирование требований;
- определение информационных объектов и связей между ними;
- конструирование концептуальной модели предметной области.

Этап анализа информационных потребностей и формирования требований включает:

- определение перечня задач по извлечению, обработке, хранению, передаче и представлению информации;
- определение требований к составу, структуре, формам представления информации;
- прогнозирование возможных изменений информационных ресурсов как в количественном, так и в содержательном плане.

Построение спецификации требований, осуществляемое путем последовательного анализа отношений взаимосвязи между концептами предметной области, является основой для всего процесса разработки информационного обеспечения и используется на разных его этапах.

Структура документа-спецификации, описывающего требования к информационным объектам, набор используемых в нем типов требований и их отношения зависят от выбранной для проекта модели требований. Ее выбор определяется этапом и моделью жизненного цикла информационного обеспечения, зрелостью процессов согласно модели зрелости процессов в компании, навыками разработчиков, требованиями к стандартизации программного продукта и процессу его создания. Часто использование только одной модели с ограниченным набором типов требований недостаточно для выполнения свойств требований, а значит, обеспечения качества спецификации. Так в *CASE* технологиях [2] для формализации знаний, необходимых для определения требований к проектируемым элементам ИС, могут использоваться промежуточные концептуальные модели требований, расширяющие функциональность процесса управления требованиями. Их назначение заключается в том, чтобы извлекать из текстов требований на естественном языке именованные сущности и отношения между ними путем построения концептуальных графов. Извлеченные из текстов требований знания используются разработчиком при построении *CASE* моделей сущность-связь для установки объектов и отношений и при построении *UML* диаграмм для определения объектов и их атрибутов.

Другой концептуальной моделью извлечения и представления знаний из данных контекста является решетка понятий [3]. Понятия, составляющие основу описания предметной области, организуются в иерархию. При этом граф решетки не является деревом, что характерно для графов многих концептуальных моделей, а имеет структуру решетки (рис.1).

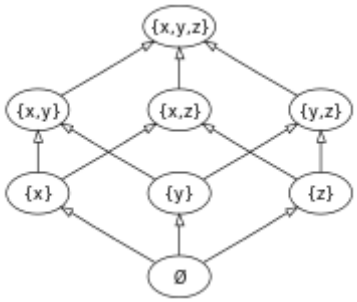


Рис.1 Решетка подмножеств (*x, y, z*), упорядоченная по «подмножествам»

Это позволяет представлять знания, выражающиеся понятиями, характеризующимися меньшей и большей общностью (подобием), меньшими и большими объемом и содержанием.

Формальный контекст является источником данных для построения содержащихся в нем понятий. Как и сам контекст, понятие является формальным объектом. Существующая на каждом контексте система понятий, образующая решетку понятий, отражает основные взаимосвязи между данными, содержащимися в текстах, на которых построен формальный контекст. При построении контекста и решетки понятий происходит фильтрация несущественных элементов текста, и полученная в итоге концептуальная структура отражает реальные, возможно, неочевидные, скрытые взаимосвязи между понятиями.

Формальный контекст и решетка понятий являются моделями, используемыми в направлении *Data Mining*, известном как анализ формальных понятий (АФП) [4]. Построение формального контекста и решеток понятий с использованием текстовых описаний требует выявления на них отношений «объект-атрибут» и является субъективным аспектом формирования контекста. Формально объекты независимы от исследователя предметной области, тогда как свойства - это результат продуцирования субъектом гипотез предметной области на основе его текущих целевых установок, имеющейся совокупности априорных знаний и ресурсных возможностей [5].

Формальный контекст *K* = (*G, M, I*) задает связь между множеством объектов *G* и множеством принадлежащих им атрибутов *M*. Эти множества частично упорядочены некоторыми отношениями. Связь определяется отношением $I \subseteq G \times M$, которое представляет собой набор кортежей $\langle g, m\rangle \in I$. Ему соответствует бинарная матрица контекста с ненулевыми элементами, фиксирующими факты принадлежности атрибута $m_j \in M$ объекту $g_i \in G$. Связи между объектами и атрибутами определяются следующим образом. Для подмножеств $A \subseteq G$ и $B \subseteq M$ объектов и атрибутов задаются отображения (функции) A': $A \to B$ и B': $B \to A$ со следующими свойствами: A': = { $m \in M \,|\, \langle g, m\rangle \in I$ для всех $g \in A$ } и B': = { $g \in G \,|\, \langle g, m\rangle \in I$ для всех $m \in B$ }. Пара множеств (A, B), таких, что $A' = B$, $B' = A$ называется формальным понятием контекста *K*.

Множества A и B замкнуты в силу композиции отображений: $A'' = A$, $B'' = B$. Множество A образует объем формального понятия (A, B), а множество B - его содержание. Отношения частичного порядка на множествах *G* и *M* индуцируют отношение частичного порядка $\leq$ на множестве понятий.

Если для понятий (A_1, B_1) и (A_2, B_2) $A_1 \subseteq A_2$, что эквивалентно $B_2 \subseteq B_1$, то (A_1, B_1)$\leq$(A_2, B_2). В этом случае логично считать понятие (A_1, B_1) менее общим, чем понятие (A_2, B_2). Согласно основной теореме анализа формальных понятий [6], частично упорядоченное по вложению объемов множество формальных понятий контекста *K* образует математический объект – решетку, которая называется решетка понятий.

Решетка понятий может быть визуализирована в виде графического объекта, отражающего иерархию взаимосвязей понятий, и служащего средством навигации среди объектов – понятий.

Инструментом извлечения знаний на решетках понятий являются методы *Data Mining*, использующие модели в виде импликаций, функциональных зависимостей и ассоциативных правил [7].

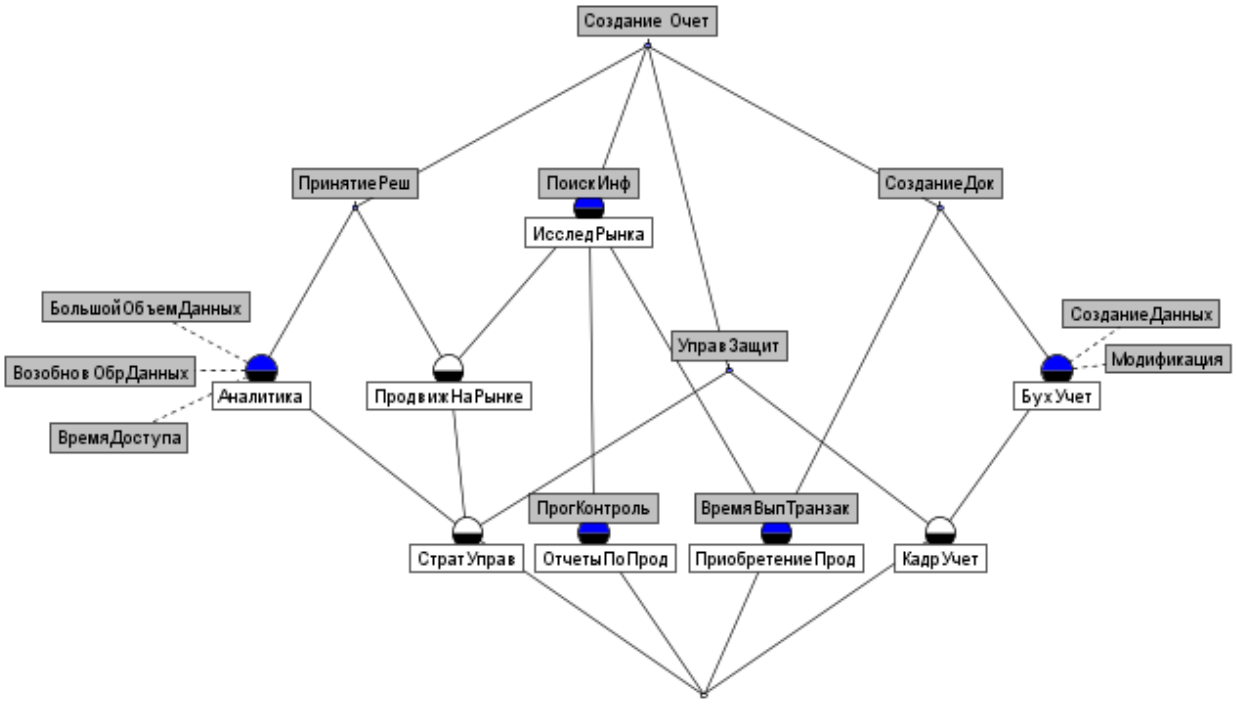
Отношение порядка на множестве формальных понятий позволяет находить зависимости на признаках. Импликации $X \to Y$ на подмножествах признаков $X, Y \subseteq M$ имеют место, если $X' \subseteq Y'$, т.е. каждый объект, обладающий всеми признаками из множества *X*, также обладает всеми признаками из множества *Y*. В этом случае формальное понятие, содержащее *X*, находится непосредственно ниже понятия, содержащего признаки *Y* в концептуальной решетке. Каждая решетка понятий порождает систему импликаций, которая позволяет исследовать взаимосвязи между понятиями. Такие зависимости образуют набор импликаций формального контекста. Некоторые объекты могут обладать определенными свойствами только при наличии других свойств более высокого уровня. Это позволяет выделить свойства более низкого уровня в отдельный контекст, связанный с главным контекстом через определяющее свойство более высокого уровня. В него попадут только объекты, обладающие определяющим свойством. С другой стороны, некоторые объекты могут обладать дополнительными свойствами, не присущими другим объектам. В этом случае составляется вложенный контекст для данных объектов. В подчиненных контекстах тоже могут возникать подобные свойства. В результате может быть построена иерархия контекстов, которую можно назвать гиперконтекстом [8].

Таким образом, в результате применения метода анализа формальных понятий получается модель предметной области в виде списка формальных понятий, списка импликаций и концептуальной решетки формального контекста.

Этапы построения концептуальной модели предметной области формируют артефакты пользователя и разработчика информационного обеспечения. Для связи этих артефактов можно использовать структуру модели, объединяющую информационные сервисы и их параметры (функциональные требования пользователей с функциональной структурой их реализации и требованиями к качеству обслуживания), построенную с помощью метода АФП. Полученная концептуальная модель, представленная решеткой понятий, является источником информации для описания состава информационной услуги (ИТ-услуги). Навигация по решетке понятий позволяет получить своеобразные макро-требования и более детальные требования пользователей к информационному обеспечению. Широта поиска задается определенным уровнем решетки, глубина – количеством уровней решетки, используемых при поиске требований.

В рассматриваемом примере, входные данные для построения решетки понятий представляются в виде таблицы «объект-свойство», которая описывает взаимосвязь между объектами – информационными сервисами пользователей, определяющими функции информационных систем и их атрибутами – задачами обработки данных и технологическими признаками.

Для построения решетки понятий (рис.2) использовано инструментальное средство *Concept Explorer* [9].



Ри

с.2 Решетка понятий

Решетка понятий представляет собой диаграмму Хассе, т.е. граф покрытия отношения «быть более общим понятием». Каждому узлу диаграммы соответствует одно формальное понятие вида (X,Y), где X – множество информационных сервисов, играющих в данном случае роль объектов, Y – множество типовых операций обработки данных и технологических требований, играющих в данном случае роль признаков..

Узел помечается именем объекта и его признаков, если он является первым, где встречается данный объект (при движении снизу вверх по диаграмме) или признак (придвижении сверху вниз), соответственно. Имя объекта указывается в нижней части соответствующего формального понятия, имя атрибута – в верхней части. Выделив любой узел решетки, можно проследить объекты и признаки, соответствующие понятию в этом узле (объекты «накапливаются» снизу-вверх, признаки – сверху-вниз).

Заключение:

- концептуальная решетка формальных понятий позволяет выделить для множества объектов X (информационных сервисов) множество их общих признаков Y (задач обработки данных и их технологических характеристик) и таким образом охарактеризовать сходство этих объектов;
- реализованные в *Concept Explorer* методы вычисления наборов импликаций позволяют проанализировать отношения между требованиями пользователей к информационному обеспечению для решения следующих практических задач: обеспечения свойства полноты спецификаций требований, оценки влияния изменений информационных объектов, понимания степени влияния отдельных информационных элементов на предоставление ИТ-услуги.

Список литературы

1. Грекул В.И. Проектирование информационных систем: Курс лекций/ В.И. Грекул, Г.Н. Денищенко, И.П. Коровкин. – М.: Интернет университет информационных технологий. 2005. – 304 с.
2. Bogatyrev M., Nuriahmetov V. Application of Conceptual Structures in Requirements Modeling. In: *Proc. of the International Workshop on Concept Discovery in Unstructured Data (CDUD 2011) at the Thirteenth International Conference on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing - RSFDGrC 2011*. Moscow, Russia, 2011. P. 11–19.
3. Биркгоф Г., Барти Т. Современная прикладная алгебра. М.: Мир, 1976. // [Электронный ресурс] Web-сайт. URL: http://www.ikfia.ysn.ru/images/doc/algebra/BirkgofBarti1976ru.pdf (Дата обращения: 29.15.2018).
4. Ganter, Bernhard; Stumme, Gerd; Wille, Rudolf, eds. (2005), *FormalConcept Analysis: Foundations and Applications*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, No. 3626, Springer-Verlag. Berlin. 2003.
5. Самойлов Д.Е., Смирнов С.В. Субъективные аспекты формирования и обработки данных в анализе формальных понятий. Сборник материалов Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии». 2016.- с.1038 - 1043.// [Электронный ресурс] Web-сайт. URL: https://drive.google.com/drive/folders/0B8BC4Ez4xDTAMTlNdGRVcHg2R1U (Дата обращения: 30.01.2018).
6. *Formal Concept Analysis: Foundations and Applications*. Eds. Bernhard G., Stumme G., Wille R. №. 3626. Springer-Verlag, 2005. (Lecture Notes in Computer Science / Lecture Notes in Artificial Intelligence).
7. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Third Edition. Morgan Kaufman, 2012.
8. Таран Т.А., Сирота С.В. Инструментальная среда создания интеллектуальных обучающих систем//Математические машины и системы. - 2004. - № 1. - с. 58 - 68.
9. Serhiy A. Yevtushenko. System of data analysis "Concept Explorer". (In Russian). Proceedings of the 7th national conference on Artificial Intelligence KII-2000, p. 127-134, Russia, 2000. // [Электронный ресурс] Web-сайт. URL: http://www.comp.dit.ie/pbrowne/compfund2/UserGuide.pdf (Дата обращения: 30.01.2018).

N.G. Dmitrieva

CONCEPTUAL SIMULATION OF REQUIREMENTS BY THE METHOD OF ANALYSIS OF FORMAL CONCEPTS

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

Discusses application of methods of formal concept analysis in the technology of formalize knowledge for constructing requirements models.

Keywords: conceptual modeling, conceptual model, formal concept analysis, concept lattices, implication.

УДК 004.056

Ю.С. Егоров

ПОДХОД К КОНЦЕПТУАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАРТ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается подход к проектированию информационных систем на основе гибких методологий разработки программного обеспечения. Описываются решения, позволяющие организовать процесс разработки, сочетая преимущества современных гибких методов и классической каскадной модели жизненного цикла программного обеспечения.

Ключевые слова: жизненный цикл; программное обеспечение; информационная система; поддержка принятия решений; валидация.

В настоящее время разработка программного обеспечения (ПО) регламентируется в основном ГОСТами 19-й и, в случае создания автоматизированных систем, 34-й серии. Эти стандарты определяют перечень этапов, последовательность и порядок их выполнения, формы отчетных документов и т.п. Указанные ГОСТы в части, касающейся разработки ПО, являются устаревшими и не отвечают современным тенденциям в ИТ-отрасли.

Практикой разработки классическая каскадная модель признана неэффективной ввиду недостаточной гибкости, обусловливающей низкую способность реагирования на изменения требований к информационной системе (ИС), что, как правило, приводит к срывам сроков проекта [1]. В связи с этим возникает противоречие между современным технологическим уровнем проектирования ИС и устаревшими требованиями нормативных документов и государственных стандартов.

Интеграция современных гибких методов проектирования ИС на этапах каскадной модели жизненного цикла разработки ПО, а также интеллектуальная поддержка процессов принятия решений, позволит как усовершенствовать методические подходы, так и повысить эффективность процесса разработки, что обеспечит возможность получения на выходе качественного ПО, соответствующего всем заданным требованиям (верификация), а также ожиданиям заинтересованных лиц (валидация).

Гибкие методы разработки (так называемые agile-методы) позволяют устранить ряд недостатков классического каскадного метода (метода водопада), заключающихся в недостаточной гибкости и формальном управлении проектами в ущерб срокам, стоимости и качеству. Недостаточная гибкость процесса разработки обусловливает неспособность реагировать на возникающие изменения требований к ИС и может в конечном итоге привести к превышению бюджета, срыву сроков и невостребованности программного продукта [9]. Причинами таких изменений могут быть корректировка требований к ПО, ошибки, допущенные при формировании требований, изменения в самой предметной области и т.д. При этом отмечается [2-4], что изменение функциональных требований к ПО в общем случае практически неизбежно, является необходимым условием валидации, а также принимается как один из принципов гибкой методологии в [5].

Популярным гибким методом является Scrum [6]. Его основные принципы позволяют предоставлять Заказчику работоспособное ПО с новыми возможностями в фиксированные и достаточно короткие итерации, называемые спринтами (sprints). При этом сбор требований, проектирование, разработка ПО и его демонстрация Заказчику могут выполняться в каждой такой интеграции. Однако согласно классическому каскадному методу в общем случае все этапы выполняются последовательно [9].

Внедрение же гибких методов связано с изменением основных технологических и организационных процессов разработки ПО, способов взаимодействия с Заказчиком, планирования и контроля разработки и т.д. При этом оно обеспечивает постепенную итерационную реализацию проекта с постоянной обратной связью от конечного пользователя.

Проект развивается небольшими итерациями, в рамках каждой из которых в общем случае реализуется относительно небольшое приращение функционала системы.

Формирования и управление требованиями являются важными составными частями процесса проектирования информационных систем. Гибкая методология разработки ориентируется на динамическое формирование требований, что обеспечивает возможность заинтересованным лицам по результатам каждой итерации формулировать новые требования. Однако динамическое формирование требований усложняет процесс управления ими, снижает предсказуемость процесса разработки и затрудняет планирование работы. В некоторых случаях новые требования противоречат уже реализованным, что нарушает архитектуру разработанного ранее ПО и может привести к изменению объема работы, сроков реализации проекта или его стоимости. Проект, как правило, выполняется по заранее согласованному и утвержденному техническому заданию (ТЗ), а сроки и стоимость работы зачастую жестко определяются договорными обязательствами. Таким образом, возникает противоречие, между необходимостью динамически изменять требования и выполнять четко заданный в ТЗ перечень задач, решение которых должно обеспечить разрабатываемое ПО, ограничивая тем самым возможность изменения объема работы [9].

Способом управления объемом работы по реализации функциональных требований, предъявляемых к ПО может стать система поддержки принятия решений, которая позволит конкретизировать и детализировать требования, описать порядок их реализации (порядок решения задач), используемые алгоритмы, форматы данных, определить формы входных и выходных документов и пр. Уточнение и конкретизация функциональных требований позволит варьировать трудоемкость выполнения ТЗ.

Известным подходом к формированию требований является разработка вариантов использования (ВИ) [2]. ВИ утверждают поведение ИС при обработке запросов пользователя и, по сути, являются простыми текстовыми описаниями последовательности взаимодействия пользователя с ИС. При необходимости в их описание можно добавить диаграммы на формальных языках, например, UML и IDEF, схемы, рисунки и прочие материалы. Однако, как показывает практика применения гибких методов, наибольшую ценность представляют именно текстовые описания ВИ [2].

Трудоемкость разработки, последующего согласования и утверждения задач ТЗ сокращается в случае применения гибких методов разработки ПО.

При классическом выполнении постановки задач разрабатываются и утверждаются до начала непосредственной реализации ПО, что затягивает их разработку и усложняет формулировки, так как эксперты стремятся включить больше пользовательских и нефункциональных требований, а также требований, которые выходят за границы ИС. Поэтому в течение реализации проекта большая часть требований теряет актуальность, требует существенной корректировки или просто отклоняется [9].

В итерационном подходе по результатам демонстрации разработанного ПО Заказчику актуальность сформированных требований и их корректность переопределяется заново, а трудоемкость разработки постановок задач, их согласования и утверждения Заказчиком сокращается.

Тем не менее, наличие формально заданных в ТЗ функциональных требований к ПО, с одной стороны, и требований, определенных в виде описания ВИ, с другой, обусловливают необходимость обеспечения их трассировки и непротиворечивости [9]. Разработанные ВИ не должны противоречить формальным требованиям ТЗ, а должны уточнять, детализировать и конкретизировать их.

Таким образом, представляется целесообразной реализация дополнительного инструмента, позволяющего отслеживать соответствие реализуемых функциональных требований (прецедентов) формальным задачам, сформулированным в ТЗ. Это обеспечит трассировку требований и их непротиворечивость.

Упростить формирование и структурирование требований, а также обеспечить их соответствие формальным задачам ТЗ позволяет формирование карт воздействий (Impact Mapping) [7] и карт историй (Story Mapping) [8].

На рисунке 1 представлен фрагмент схемы, разработанной с использованием Impact Mapping для интеллектуальной информационной системы комплексного мониторинга состояния магистрального газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» (ИИС КМСГ СХВ) [10].

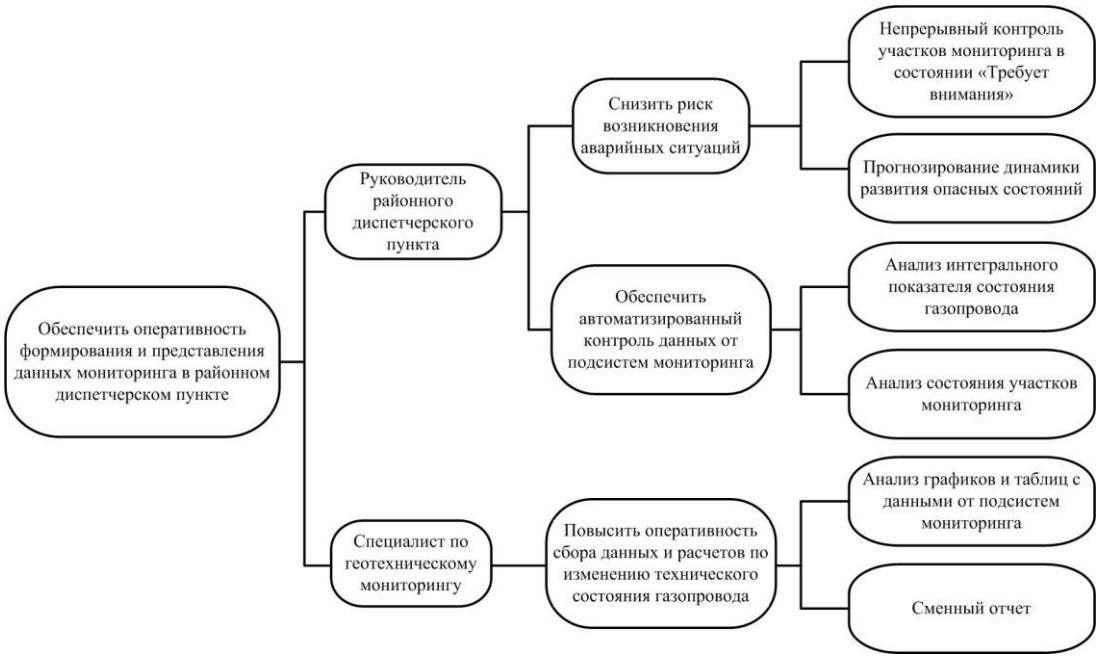


Рис. 1. Фрагмент карты воздействий (Impact Mapping) ИИС КМСГ СХВ

В Impact Mapping требования к ПО рассматриваются в контексте бизнес-целей, при этом акцент делается на тех изменениях деятельности конечных пользователей, которые должна обеспечить ИС для их достижения.

На рисунке 1 основной целью автоматизации является обеспечение оперативности формирования и представления данных мониторинга в районном диспетчерском пункте. Эта цель может быть достигнута изменением деятельности двух специалистов: специалиста по геотехническому мониторингу и его руководителя. Изменение деятельности первого заключается в повышении оперативности сбора данных и расчетов по изменению технического состояния газопровода, а также в обеспечении автоматизированного контроля получаемых данных. Повышение оперативности сбора данных и расчетов может быть обеспечено за счет автоматизированного сбора данных от подсистем мониторинга магистрального газопровода и автоматизации расчета интегрального показателя состояния на каждом участке мониторинга [10]. Аналогичным образом можно интерпретировать всю карту воздействий.

Реализация предложенных аналитических задач [10] в ИИС КМСГ СХВ позволило расширить ее функциональные возможности, повысить эффективность функционирования объектов газотранспортной системы, а также способствовало обеспечению надежной и безопасной эксплуатации линейной части и оборудования газотранспортной сети.

Таким образом, выстраивание логической цепочки от целей через пользователей системы до конкретных функциональных требований, описываемых в виде пользовательских историй, прецедентов или вариантов использования, обеспечивает визуализацию решения актуальной задачи их трассировки.

Другими не менее важными аспектами проектирования ИС являются планирование и отслеживание выполнения работы. Одним из недостатков гибких методов является

недостаточная формализация планирования, снижающая предсказуемость выполнения проекта, в то время как действующие ГОСТы, напротив, предписывают разрабатывать планирующие документы, например, единый сквозной план создания изделия, сетевой план-график и т.д. Помимо формальных требований стандартов, эксперты в предметной области и их руководители зачастую требуют разработки и согласования планирующих документов с целью организации своей деятельности [9].

Упростить задачу планирования гибкой разработки также позволяет инструмент Impact Mapping, облегчая процесс приоритизации требований за счет визуализации их влияния на достижение поставленных бизнес-целей и сценариев применения ИС. Кроме того, при необходимости бизнес-цели, достижение которых обеспечивается реализацией соответствующих функциональных требований, могут быть отображены в виде вех или приведены как дополнительные описания итераций в журнале пожеланий проекта (Product Backlog). Аналогичным образом в нем могут быть отображены формальные задачи, определенные в ТЗ на ИС [9]. Сочетание agile-методов разработки ПО с классической каскадной моделью позволяет согласовать принципы гибкой методологии с действующими государственными стандартами, способствуя тем самым разрешению противоречия между современным уровнем разработки ИС и устаревшими требованиями нормативных документов, а также обеспечивая возможность эффективной организации процесса проектирования ИС.

Библиографический список

1. Фатрелл Р., Шафер Д., Шафер Л. Управление программными проектами. Достижение оптимального качества при минимуме затрат. М.: Вильямс, 2003. 1136 с.
2. Коберн А. Современные методы описания функциональных требований к системам. М.: Лори, 2012. 263 с.
3. Расмуссон Д. Гибкое управление IT-проектами. Как мастера Agile делают выдающееся ПО. СПб: Питер, 2012. 272 с.
4. Кон М. Scrum: гибкая разработка ПО. М.: Вильямс, 2011. 576 с.
5. Manifesto for Agile Software Development. URL: http://www.agilemanifesto.org (дата обращения: 20.12.2015).
6. Сазерленд Дж. Scrum. Революционный метод управления проектами. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. 288 с.
7. Adzic G. Impact Mapping: Making a Big Impact with Software Products and Projects. Leanpub, 2014, 133 p.
8. Patton J. User Story Mapping. Discover the Whole Story, Build the Right Product. O'Reilly Media, Inc, 2014, 278 p.
9. Карпов А.В., Карпов В.В. Особенности применения современных методов разработки программного обеспечения защищенных автоматизированных систем // Программные продукты и системы. 2016. № 1 (113). С. 5-12.
10. Милов В.Р., Баранов В.Г., Егоров Ю.С., Севрюков А.А., Алексеев В.В., Милов Д.В., Шиберт Р.Л. Поддержка принятия решений при мониторинге технического состояния магистральных газопроводов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. № 3. С. 37-42.

Y.S. Yegorov

APPROACH TO THE CONCEPTUAL DESIGN OF INFORMATION SYSTEMS BASED ON THE IMPACT MAPPING

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

The paper considers an approach to the design of information systems based on the impact mapping. Solutions are presented for combining the advantages of modern agile methods and the classical waterfall model of the software life cycle.

Keywords: life cycle; software; information system; decision-making support; validation.

УДК 004.048

А.Б. Зуев, М.А. Буценко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ, ХРАНИМЫХ ПО «ЗАКОНУ ЯРОВОЙ» (№374-ФЗ)

Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается проблема, сложившаяся вследствие соблюдения закона №374-ФЗ и связанная с применением технологии «больших данных» для обнаружения лиц, занимающихся незаконным оборотом наркотиков. Описана методика сбора и исследования данных, предложена наиболее эффективная модель анализа сообщений пользователей, позволяющая с наибольшей вероятностью определять подозрительную активность.

Ключевые слова: большие данные, машинное обучение, классификация текстов, закон Яровой

С 1 июля 2018 вступают в силу поправки в антитеррористическое законодательство, известные как пакет Яровой. Закон обязывает операторов связи и интернет-компании хранить в течение полугода текстовые сообщения, голосовую информацию, изображения, звуки и видео абонентов. По оценке экспертов института «Гипросвязь» потребуется хранить 157,5 эксабайт (1 Эб равен 1 млрд Гб) информации.

Обработка огромных объемов данных позволяет обеспечить доступ к качественно новым знаниям и возможностям. Уже сейчас отраслевой спектр применения больших данных весьма широк: финансовая отрасль, розничная торговля, телеком, обеспечение безопасности и другие.

В рамках исследования была поставлена задача исследовать сообщения пользователей и предложить наиболее эффективную модель анализа данных, которая позволит выявлять подозрительные публикации. В качестве инструмента для обработки данных используются методы классификации текста с помощью машинного обучения.

Наиболее успешные алгоритмы машинного обучения – это те, которые автоматизируют процессы принятия решения путем обобщения известных примеров, такие методы известны как обучение с учителем. Разработчик предоставляет алгоритму пары объект-ответ, а алгоритм находит способ получения ответа по объекту, который ранее ему был неизвестен.

Создание набора с объектами и ответами является трудоемким процессом, который осуществляется вручную. В качестве источника данных использовался форум, посвященный наркотическим веществам. Выборка состояла из 1924 сообщения, средняя длина составила 177,5 символа. В ходе ручной классификации выделено 532 сообщения с упоминанием наркотических веществ и 1392 сообщения без упоминания. На основе этих данных в дальнейшем будет построена модель машинного обучения, которая предскажет, относится ли новое сообщение к тематике запрещенных веществ.

Для того чтобы впоследствии применить модель к новому набору данных, необходимо убедиться в том, что все работает корректно и ее прогнозам можно доверять. Делается это путем разбиения собранных данных на две части. Одна часть данных используется для построения модели машинного обучения и называется обучающими данными, остальные данные будут использоваться для оценки ее качества и называются тестовыми данными. Хорошим правилом является использованием в качестве тестового набора 25% собранных данных.

На рис. 1 представлена общая схема процесса классификации.

Рис.1 Этапы процесса классификации текста

Эффективное использование набора данных для машинного обучения предполагает их предварительную обработку и очистку. Она включает в себя приведение текста к нижнему регистру, удаление знаков препинания и функциональных слов (семантически нейтральных слов, таких как союзы, предлоги и пр.).

Далее следует индексация документов – это построение некоторой числовой модели текста, которая переводит текст в удобное для дальнейшей обработки представление.

Один из самых эффективных и широко используемых способов подготовки текста для машинного обучения – это представление текстовой информации в виде «мешка слов» (Bag of Words). Получение представления «мешок слов» включает следующие три этапа: токенизация (документ разбивается на слова, которые называются токенами); построение словаря (собирается и пронумеровывается словарь всех слов, которые появляются в любом из документов); создание разреженной матрицы (для каждого документа подсчитывается, как часто каждое из слов, занесенное в словарь, встречается в документе). Данный метод хорошо иллюстрируется рисунком:

Рис.2 Обработка «Мешок слов»

Алгоритм имеет недостаток, а именно: теряется порядок слов в тексте, это значит, что тексты «i have no cows» и «no, i have cows» будут идентичными после векторизации, хотя и противоположными по смыслу. К счастью, существует способ, позволяющий учитывать контекст, фиксируя не только частоты одиночных токенов, но и пары, тройки токенов, которые появляются рядом друг с другом. Такие последовательности известны как n-граммы (n-grams).

Следующий подход вместо исключения несущественных признаков (терминов) масштабирует признаки в зависимости от степени их информацтивности. Одним из наиболее распространенных способов такого масштабирования является метод TF-IDF (term frequency-inverse document frequencey). Идея заключается в том, чтобы присвоить больший вес термину, который часто встречается в конкретном документе, но при этом редко встречается в остальных документах. Однако в текущем исследовании использование подхода не требуется ввиду малого числа специфических слов и малого размера выборки. При использовании TF-IDF

развивается значительный эффект недообучения, т.е. ощущается недостаток данных, необходимых для корректного обучения.

После того, как исходные данные подготовлены можно приступать к построению реальной модели машинного обучения. Методы классификации подразделяются на вероятностные (метод Байеса), метрические (метод ближайших k-соседей), логические (метод деревьев решений). В рамках данного исследования рассмотрим несколько популярных алгоритмов и выберем наиболее эффективный для решения поставленной задачи.

Метод Байеса относится к вероятностным методам классификации, основан на теореме Байеса и предполагает, что наличие какого-либо признака в классе не связано с наличием какого-либо другого признака. К преимуществам метода относятся быстрая и легкая классификация. Из недостатков следует отметить ошибки прогнозирования при отсутствии значения категорийного признака в обучающей выборке.

Метод k-ближайших соседей относится к метрическим методам классификации. Алгоритм рассматривает ближайшего соседа – точку (элемент) обучающего набора, ближе всего расположенную к точке, для которой мы хотим получить прогноз. Прогнозом является ответ, уже известный для данной точки обучающего набора. Этот метод дает приемлемое качество классификации без использования большого количества настроек, однако, не эффективен, когда речь идет о наборах данных с большим количеством признаков.

Метод деревьев решений относится к логическим методам классификации. По сути построение дерева решений означает построение последовательности правил «если … то…», которая приводит нас к истинному ответу максимально коротким путем. К преимуществам метода относится относительно простая программа реализации алгоритма, однако алгоритм работает неустойчиво по отношению к выбросам в исходных данных.

Метод опорных векторов является линейным методом классификации. В ходе обучения SVM вычисляет важность каждой точки обучающих данных с точки зрения определения решающей границы между двумя классами. Обычно лишь часть точек обучающего набора важна для определения границы принятия решений: точки, которые лежат на границе между классами. Они называются опорными векторами. Чтобы получить прогноз для новой точки, измеряется расстояние до каждого опорного вектора.

Ниже приведены результаты проверки правильности каждой модели для ранее подготовленного тестового набора данных. Анализ данных производится на языке Python с помощью использования библиотеки для машинного обучения scikit-learn.

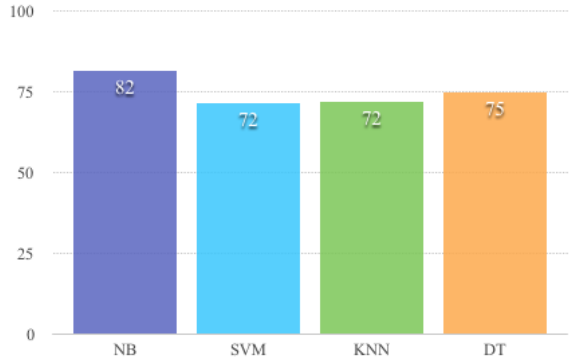


Рис.3 График точности классификаций

Выводы

Как показало исследование, наиболее оптимальным методом для анализа сообщений пользователей, в которых упоминаются наркотические вещества является метод Байеса. Метод относится к алгоритмам машинного обучения с учителем и позволяет с вероятностью 82% правильно классифицировать публикацию. Добиться более высокой точности можно при использовании большего количества обучающих данных. Кроме того, алгоритмы чувствительны к типу входной информации, поэтому необходимо с особой тщательностью отнестись к подбору и первоначальной подготовке тестовых данных. Так же для достижения хорошего качества работы во многих алгоритмах важное значение имеет тонкая настройка параметров.

Библиографический список

1. Андреас Мюллер Введение в машинное обучение с помощью Python / Андреас Мюллер, Сара Гвидо // Вильямс, 2017.– 480 с.
2. Батура Т.В. Методы автоматической классификации текстов / Батура Т.В. // Программные продукты и системы / Software Systems.– 2017.– №1.– 85-99 с.

A.B. Zuev, M.A. Butsenko

STUDY ON THE IMPLEMENTATION OF THE BIG DATA TECHNOLOGIES FOR THE ANALYSIS OF THE DATA STORED ACCORDING TO THE YAROVAYA LAW (№374-FL)

Nizhny Novgorod state technical universuty n. a. R.E. Alexeyev

This study addresses the problem which appeared due to the Federal Act №374 and which is connected with the big data technologies used for detecting persons involved in illegal drug trafficking. The study describes the method of collecting and analysing the data, offers the most efficient way of analysing the users' messages which helps to detect the suspicious activity with the highest level of probability.

Key words: big data, machine learning, text classification, the Yarovaya law

УДК 656.7.052

А.В. Кулаков, А.В. Семашко

ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ БЛОКЧЕЙН НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯАЛГОРИТМА ДОКАЗАТЕЛЬСТВА РАБОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Рассмотрена проблемаобеспечения безопастности и целостности данных при использовании системы блоков транзакций. Приведено обоснование целесообразности использования блоков транзакций при создании распределенной базы данных. Проведено описание алгоритмов обеспечения консенсуса.

Ключевые слова: блокчейн, цепочка блоков транзакций,контрольная хэш-сумма, SHA-256,консенсус, доказательство работы, вычислитеьный узел.

Блокчейн – является журналом с фактами, который реплицируется на несколько вычислительных станций, которые объединены в сеть равноправных узлов (PearToPear). Фактами может являться что угодно, от финансовых операций, передачи прав и до подписания контента. Таким образом при помощи блокчейна можно безопасно распространять и обрабатывать данные между несколькими узлами через недоверенную сеть. В качестве данных может быть все что угодно, но наиболее интересным вариантом представления данных является передача информации, которая требует наличия третьей стороны, котрая будет подтверждать транзакцию. Примерами такой информации являются деньги (требуют участия банка), права на собственность (требуют участия нотариуса), договор на заем и т.д. Помимо модели использования системы Блокчейн в виде хранилища фактов, можно так же исполнять программы. Определенные реализации Блокчейн позволяют каждому факту содержать мини-программу. Такие программы реплицируются вместе с фактом, и каждый узел выполняет их, получая факт. Эта идея сопряжения блокчейна с реальным миром при помощи заранее запрограммированных условий и их передачи всем узлам называется умный контракт[1],[2].. Контракт – это обещание, которое стороны подписывают, чтобы закрепить его юридически. Умный контракт – это то же самое, только закрепление происходит «технически», а не «юридически». Благодаря этому отпадает необходимость в нотариусе или любом другом полномочном лице, признаваемом обеими сторонами. В сущности, блокчейн устраняет необходимость в участии третьего доверенного лица.

Пользователи сети — анонимны, и их называемют узлами. Все коммуникации внутри сети используют криптографию, чтобы надежно идентифицировать отправителя и получателя.

Блокчейн можно рассматривать как (слабо)синхронизированную базу данных реплицируемую столько же раз, сколько узлов в сети, или как суперкомпьютер, образованный комплексом всех вычислительных устройств, входящих в него узлов. Блокчейн базируется натрёх понятиях: P2P сети, асимметричная криптография и распределенный консенсус, основанный на решении математической задачи. Когда узел хочет добавить факт в журнал, в сети формируется консенсус, чтобы определить, где этот факт должен появиться в журнале. Консенсус является блоком.

Факты, хранящиеся в блокчейне, не могут быть утеряны. Они остаются там навсегда, реплицируясь на каждый узел. Блокчейн не просто хранит конечное состояние, он хранит и все предыдущие состояния. Поэтому каждый может проверить правильность конечного состояния, пересчитывая факты с самого начала.

Технология Блокчейн является децентрализованной сетью с равноправными узлами. В отличие от обычных распределенных баз данных, в блокчейне почти всегда отсутствует центральный администратор, который конфигурирует узлы сети, поэтому получается, что архитектура блокчейна не просто распределена, но децентрализована. Такие сети далеко не

новые. Как пример, можно привестиBitTorrent, которая является это PearToPear сетью. Но вместо обмена файлами, пользователи сети Блокчейн обмениваются фактами. P2P-сетям, как и прочим распределенным системам, приходится решать очень сложную проблему информатики: разрешение конфликтов - согласование. Реляционные БД предлагают ссылочную целостность, но такой особенности нет в распределенной системе. Если два несовместимых факта прибывают в одно и тоже время, система должна иметь правила для определения того, какой факт считать истинным.

В задаче двойного расходования, если два несовместимых факта появятся в сети, то победит тот, который будет записан первым [1,2,5,7].

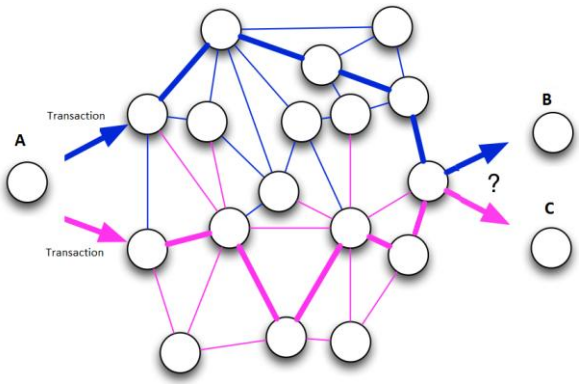


Рис. 1 Пример задачи двойного расходования

В среде PearToPear сетей, два факта, которые были отправленны примерно в одинаковое время могут прибыть в разном порядке на удаленные узлы. Гарантия целостности в P2P сети, обеспечивает способ согласования порядка фактов –система консенсуса.Алгоритм, котрый использует технология Блокчейн – консенсус, основанный на доказательстве выполнения работы (proof-of-work/PoW), использующий блоки.

Блоки – это способ, упорядочивания фактов в сети с недоверенными узлами. Факты группируются в блоки, и есть только одна цепочка блоков, реплицируемая по всей сети. Каждый блок ссылается на предыдущий блок. Таким образом, если факт H находится в блоке 21, и факт G в блоке 22, то факт G рассматривается всей сетью как следующий за фактом H. Перед фоомированием блока, факты находятся в списке ожидающих, не подтвержденых[6],[7],[8].

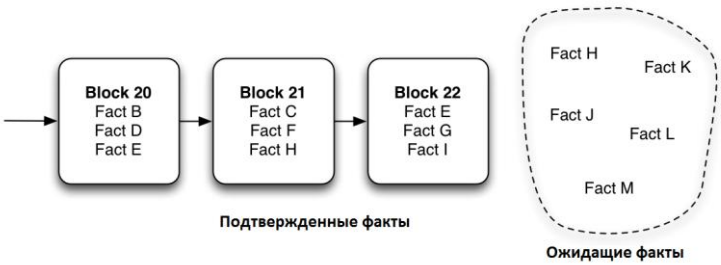


Рис. 2 Формирования блоков из неподтвержденных фактов

В любой блокчейн-сети передаются два основных типа сообщений–транзакции и блоки. Блоками можно назвать списки транзакций. Транзакции формируются участниками системы и их алгоритм консенсуса не касается: для того чтобы инициировать, например, передачу прав собственности на акции, никакого соглашения не надо, достаточно знать правильный ключ. Блоки являются основным результатом работы алгоритма консенсуса и определяют, в каком порядке транзакции будут включены в журнал транзакций.

Можно обойтись без блоков, включая транзакции в журнал по отдельности, но применение блоков экономят объем передаваемого трафика и вычислительные ресурсы узлов сети и со слишком частыми блоками работа блокчейна становится нестабильной.
Можно выделить следующие типы узлов сети Блокчейн:

- Блоки в сети узлами консенсуса.
- Узлы аудита - они не принимают участия в процессе консенсуса. Узлы аудита умают у себя полную копию блокчейна и регулярно проверяют работу узлов консенсуса, а так жераспределяют нагрузку по сети.
- Узлы клиенты не имеют полной версии блокчейна, содержат те данные, которые важны для узла.

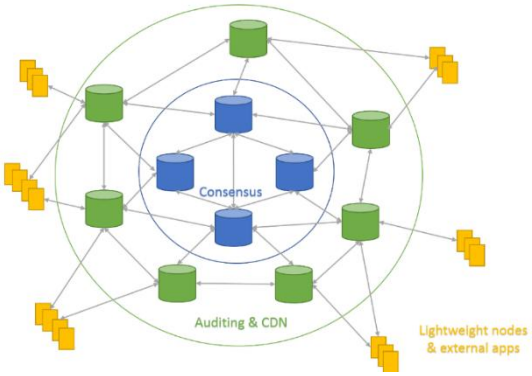


Рис 3 Роли узлов в блокчейн-сети

Таким образом, вычислительные узлы (узлы консенсуса) в цепочке транзаций создают новые локальные блоки с неподтвержденными фактами. Узлы участвуют в гонке вычислений, для того, чтобы их локальный блок стал следующим блоком в цепи для всех участников сети, путем решения математической задачи по вычислению хеш-суммы. Узел опубликовывает его локальный блок, если он вычисляет верную сумму, и все факты в этом блоке становятся подтвержденными. После этого все участники сти информируются о создании нового блока. Происходит проверка остальними узлами в правильности этого блока и впоследствии вего занесении к их копии блокчейна. Дальше происходитпостроение новыхблоков с новыми неподтвержденными фактами. Нахождение случайного ключа для проверки блока достаточно маловероятно. Это делает Блокчейн сеть безопасной (кроме тех случаев, когда у зломышленника в распоряжении больше 51% выислительных ресурсов сети). Сложность решения математической задачи всегда корректируются, чтобы новые блоки публиковались в цепь через фиксированный интервал времени. Каждую секунду, каждый вычислительный узел тестирует огромное количество случайных строк, для того чтобы сформировать новый блок[8].

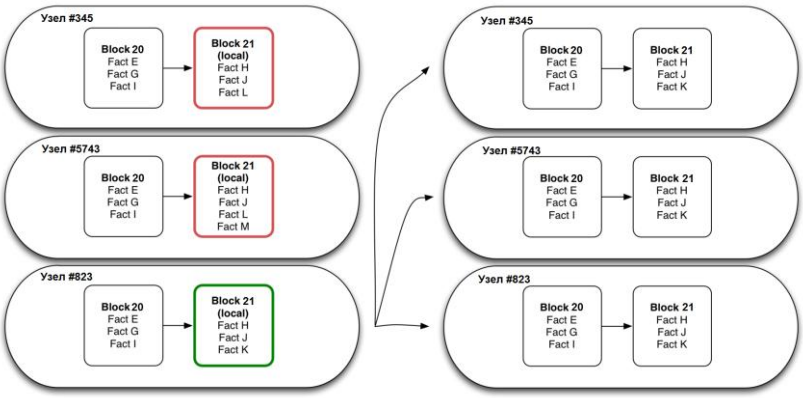


Рис. 4 Формирование новых локальных блоков узлами

Предлагается более подробно остановиться на алгоритмах консенсуса. Задача распределенного консенсуса не специфична для блокчейна и имеет хорошо проверенные решения для многих других распределенных систем. Блокчейны от предыдущих наработок отличаются условиями работы сети. В обычных алгоритмах консенсуса у узлов сети есть «личности», выражаемые через цифровые подписи или сходные криптоальтернативы, а сам список узлов известен заранее или меняется редко, но предсказуемо. В Блокчейне все наоборот.Соответствующий алгоритм консенсуса получил вполне академическое название – консенсус Накамото. Сатоши предложил «подписывать» каждый создаваемый блок доказательством работы, сложность которого зависит от общей вычислительной сложности сети биткойна[5].

Участники сети не только заранее неизвестны, но и могут свободно подключаться или отключаться от сети. При этом блокчейн, являясь децентрализованной системой, имеет свойство объективности (для определения текущей версии журнала транзакций не нужно доверие неким авторитетным источникам – корень доверия находится в самом блокчейне). Было предложено множество различных алгоритмов, среди которых выделяются алгоритмы на основе доказательства работы (proof-of-work).

При использовании этих алгоритмов, в случае доказательства работы хеш сообщения, объединенного со специальным полем, должен быть меньше определенного значения (или начинаться с определенного числа нулевых битов). Специальное поле не несет смысла для самого сообщения – это поле перебирается автором доказательства, пока не будет найдено подходящее значение. PoW отражает тот факт, что для нахождения специального поля, надо совершить вычислительную работу, ожидаемое количество которой измеримо. Например, если нужно, чтобы первые 16 бит хеша равнялись нулю, то в среднем нужно перебрать 65536 значений специального поля[8].

Доказательство работы похоже на цифровые подписи – оно обеспечивает целостность сообщения, так как вероятность того, что одино и то же специальное поле подойдет для различных сообщений, очень мала. Доказательства также легко проверяются –достаточно провести лишь одну операцию хэширования. В отличие от подписей, создание доказательства работы не требует знания секретов, но требует больше вычислительных ресурсов. Например, в

приведенном выше примере на создание доказательства работы для сообщения передаваемого сообщения из одного слова, сложностью 16 бит требуется около часа вычислений на обычном персональном компьютере, однако проверяется это доказательство практически мгновенно.

Выводы:

- Нет выделенного сервера. Хранение и обработка информации происходит вычислительными мощностями распределённых узлов
- Каждый узел в сети имеет пулл всех транзакций в сети, что исключает возможность изменения и подлога информации. Таким образом каждый узел в сети имеет представление обо всех операциях
- консенсуса.
  Алгоритм, который использует технология Блокчейн – консенсус, основанный на доказательстве выполнения работы (PoW), использующий блоки. Таким образом, гарантию целостности в Блокчейн сети, обеспечивает способ согласования порядка фактов – консенсус.
- Консенсус решает главную проблему анонимных сетей — атаки Сибиллы, в которых злоумышленник создает большой пуллподдельных узлов, чтобы перекрыть получившимся большинством мнение честных пользователей.
- Чтобы обладать мнением в консенсусе Накамото, нужно обладать реальной вычислительной мощностью, которую нельзя подделать, и которая не требует никакой дополнительной аутентификации – она сама по себе привязывает узлы к реальному миру.
- Доказательство нельзя подделать и «перенести» на другие блоки. Таким образом, выислительные узлы не могут воровать доказательства друг у друга.
- Доказательства нельзя высчитать заранее– в каждый блок входит ссылка на предыдущий, поэтому начать работать над доказательством можно только после появления предыдущего блока в сети.
- При увеличении вычислительной мощности узлов сети растет и сложность математической задачи– сейчас сложность одного доказательства составляет около 70

Библиографический список

1. Andreas M. Antonopoulos. 7. The Blockchain // Mastering Bitcoin. — O'Reilly Media, Inc., 2014. — ISBN 978-1-4493-7404-4
2. Bitcoin system [Электронныйресурс] // Frequently Asked Questions. URL: https://bitcoin.org/en/faq (дата обращения: 15.02.2017).
3. National Instiute of Standarts and Technology [Электронныйресурс] // Computer Security Division. URL: http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips180-2/fips180-2.pdf (дата обращения: 15.02.2017).
4. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. Под ред. В.Ф. Шаньгина. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2001. - 376 с.: ил.
5. Хабрахабр [Электронный ресурс] // Алгоритм формирования Блокчейна./URL:https://habrahabr.ru/company/dcoin/blog/249779/(дата обращения: 15.08.2017).
6. Хэш Цепочки Технологии Hasq./ — Олег Мазонка, Влад Попов. 2014. [Электронный ресурс] // URL: http://jrxv.net/x/16/Hasq_Hash_Chains_RU.pdf(дата обращения: 15.02.2017).
7. BitsMedia [Электронный ресурс] // Атака double-spending в системе Bitcoin.// URL: https://bits.media/double-spending(дата обращения: 11.10.2017).
8. Хабрахабр [Электронный ресурс] // Объяснение блокчейна для веб-разработчиков./ URL:https://habrahabr.ru/post/323128/(дата обращения: 20.07.2017).

A.V. Kulakov, A.V. Semashko

INFORMATIONSECURITYASPECTSIN BLOKCHEINNETWORKS WITHUSE OF THE PROOF OF THE EVIDENCE OF WORK ALGORITHM INVESTIGATION

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

This paper considers the problem of security needs and data integrity by using transactions blocks system. The feasibility of using transaction blocks when creating a distributed database is justified. A description of the consensus plots is given.

Keywords: block chain, block chain transactions, control hash-sum, cryptographic function, SHA-256, consensus, proof-of-work, computing node.

УДК 656.7.052

А.В. Семашко, А.В. Кулаков

КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ ХЕШ-ФУНКЦИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Рассмотрена проблема обеспечения безопастности и целостности данных при использовании системы блоков транзакций. Приведено описание применения криптографических хеш-функций при создании распределенной базы данных.

Ключевые слова: блокчейн, цепочка блоков транзакций, контрольная хэш-сумма, криптографическая функция, заголовок и список транзакций, древовидное хэширование, SHA-256, распределённое хранение.

Криптография — это основа системы блокчейна, которая во многом обеспечивает работу всей системы. Внутренняя структура блокчейна предполагает, что доверие между участниками этой сети базируется на формализованных математических принципах. Применение криптографиипредлагает обеспечение высокого уровня безопасности, которыйбазируется на прозрачности и проверяемости всех операций в сети блокчейна, что обеспечивает неизменность журнала транзакций, вопросов связанных с аутентификацией и контролем доступа к сети и данным в блокчейне в целом. И это все в противовесе стандартному методу, который лишь изолирует, ограничивает видимость системы.В нашем материале мы рассмотримхеш-функциии, цифровые подписи и ключи. Криптографической хеш-функцией является любая хеш-функция, являющаяся криптостойкой, то есть она должна удовлетворять ряду требований, специфичных для криптографических приложений [1-11].

Хеширование – это процесс преобразования массива данных произвольной длины на входе в выходную строку фиксированной длины, что и является хешем. Таким образом, хэш-функция принимает на вход строку с проивольным количеством знаков, а на выход выдаёт строку, в которой выводиться сообщение с заранее строго определенным числом символов.Смысл в том, что входные данные могут быть действительно огромными по объему. Алгоритм хеширования мы можем выбрать исходя из потребностей и от задач, которые поставлены [8,9,12].Наибольшее распространение применение хешей получило создание своего рода «fingerprint» файлов. Хэш подтверждает, что в файл не были внесены изменения или он вовсе был удален автором.

Механизмы хэшейв системе блокчейн используются для того, чтобы представить состояния всей цепочки транзакций в данный момент. На вход хэш-функции поступает полное состояние блокчейна (все транзакции, которые были совершены до текущего времени), а результирующий хеш представляет собой текущее актуальное состояние. Таким образом любой участник может удостовериться, что состояние блокчейна остается неизменным. Изначально хеш рассчитывается для первичного, так называемого Genesis-блока. Транзакции в своем оригинальном порядке внутри блока, используются для вычисления хеша Genesis-блока.Таким образом при появлении нового блока, который начинается строиться после формирования предыдущего, в качестве входных данных для определения его хэша, используются хэш предыдущего блока и информация о собственных транзакциях нового блока.

Каждый хэш нового блока указывает на хэш предыдущего – это и является схемой формирования цепочки блоков транзакций. Ни одна транзакция в истории транзакций не может быть изменена, так как даже если хоть одна запись транзакций поменяется, то так же поменяется и хеш блока, в котором она записана, и соответственно поменяются хеши последующих блоков.

Определить любую фальсификацию данных в блокчейне довольно легко, потому что вы можете просто произвести сравнение ХЕШей. Пользователю системы нужно всего 256 бит, чтобы определить состояние неизменности блокчейна бесконечной длины. На сегодняшний

день в подавляющей доле хеш-функций которые применяются, являются алгоритмы MD5, SHA-256

Хэш-функции имеются практически в любом языке программирования. Криптографические хэш-функции можно выделить, как отдельную подкатегорию хэш-функций. К функциям, обычно применяемым в хэш-таблицах, предъявляются намного меньшие требования, чем к криптографическим. Хэш-функции в системах блоков транзакцийдают гарантию «необратимости» всей цепочки операций. Причина в том, что каждый вновь построенный блок транзакций ссылается на хэш предыдущего блока в общем реестре. Хеш блока зависит от всех транзакций вмещенных в блоке. Транзакции хеш-функции передаются не последовательно, а собираются в одно хэш-значение при помощи двоичного дерева с хэшами, называемое деревом Меркла. То есть хэши используются как замена указателей в обычных структурах данных, таких как связанные списки, двоичные деревья. Из-за использования хешей общее состояние блокчейна — все выполненные транзакции за все время и их яеткая последовательность — можно выразить всего лишь единственным числом: хешем нового блока. Благодаря этому, неизменность хеша одного блока гарантирует неизменность всего блокчейна. Хеш одинаковой длины получается засчет разбиения входного сообщения на блоки единого размера и их последовательной обработки при помощи односторонней функцией сжатия[6]. Данная функция сжатия преобразовывает входное сообщение с фиксированной длиной в более короткое выходное сообщение, но уже обязательно с фиксированной длиной. При использовании хеш-функции Меркла-Дамгарда входное сообщение разбивается на блоки и функция работает с ними по очереди с помощью функции сжатия, каждый раз принимая входной блок с выходным от предыдущего прохода. На Рис. 1 односторонняя функция сжатия, которой обозначен желтый квадрат, преобразует два входных блока (MessageBlock) фиксированной длины в выходной блок того же размера, что и входные. Алгоритм начинает с начального значения — вектора инициализации (на рисунке — IV). Вектором инициализации является фиксированное значение. Для каждого блока сообщения, функция сжатия f принимает результат предыдущего раунда и блок сообщения, и приводит промежуточный результат. Блок, следующий последним, дополняется нулями, если в этом есть необходимость. Также, добавляется блок с информацией о длине полного сообщения (подробный пример приведен ниже).Для упрочнения хеша, последний результат иногда пропускают через функцию финализации (finalisation function). Функция финализации может использоваться для уменьшения размера выходного хеша, сжатием результата последней функции f в хеш более маленького размера, или чтобы гарантировать лучшее смешивание битов и усилить влияние небольшого изменения входного сообщения на хеш (Лавинный эффект, avalanche effect). Функция финализации часто строится с использованием функции сжатия[5].

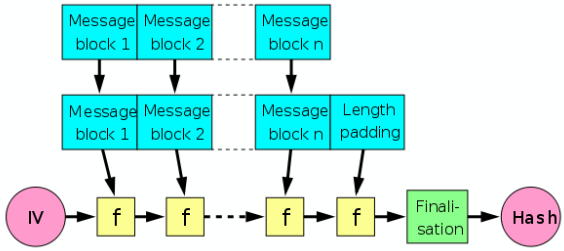


Рис. 1. Построение хеша Меркла-Дамграда

В цепочке блоков транзакций использование хеш-деревьев обусловлено соображениями обеспечения производительности, так как деревья предоставляют возможность существования так называемых «легких клиентов», которые обрабатывают лишь малую часть транзакций из системы блокчейна. Свойствами, которыми обладает хэш таковы, что невозможно из вычисленного результата получить входные данные. Но в то же время, имея те же данные на входе, и зная способ вычисления, всегда можно вычислить хэш повторно - и это краеугольный камень криптографии и сети блокчейн.

Предлагаю перейти к принципам построения хеш-функций. Чаще всего в основе построения хеш-функций лежит итеративно-последовательная схема. Корнем данного алгоритма является использование *сжимающей функции* — преобразование *k* входных бит в *n* выходных бит, *n* — разрядность хеш-функции, *k* — произвольное число, но большее *n*. Важно помнить, что сжимающая функция должна удовлетворять криптографическим условиям устойчивости[8],[10].

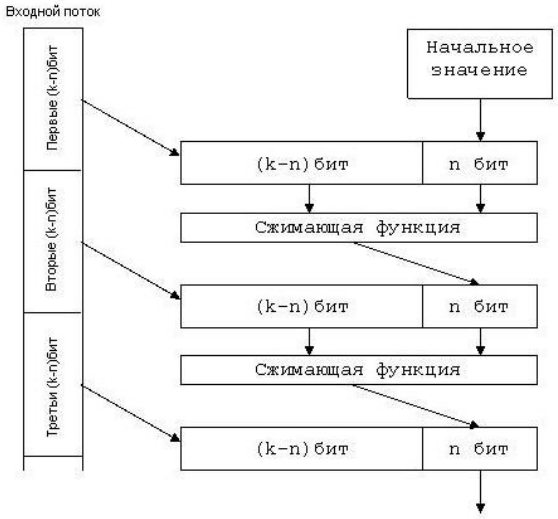


Рис. 2. Последовательная схема

Входной поток должен разбиваться на блоки по $(k - n)$ бит. В алгоритме используется врЕменная переменная, занимающая размер в *n* бит. В качестве начального значения переменной берётся число, которое известно для всех. Каждый последующий блок с данными объединяется с выходным значением сжимающей функции, которое было получено на предыдущей итерации. Значением хеш-функции являются выходные *n* бит последней итерации. Каждый бит выходного значения хеш-функции зависит от всего входного потока данных, а так же и начального значения. Лавинный эффект достигается таким образом.

Во время проектирования хеш-функций на основе итеративной схемы возникает проблема, связанная с размером входного потока данных. Дело в том, что размер входного потока данных должен быть кратен $(k - n)$. Обычно перед началом алгоритма данные расширяются неким, заранее известным, способом. Помимо однопроходных алгоритмов, существуют многопроходные алгоритмы, в которых ещё больше усиливается лавинный эффект. В этом случае данные сначала повторяются, а потом расширяются до требуемых нам размеров.

В системах блоков транзакцй и широкое применение нашли хеш-функции, которые классифицируются семейством *SHA-2*. Они как раз и построены на основе структуры Меркла, которая рассмотрены выше. Исходное сообщение после дополнения разбивается на равные блоки, каждый блок в свою очередь — на шестнадцать слов. Алгоритм пропускает каждый блок сообщения через цикл с 80 или 64 итерациями[13]. На каждой итерации два слова преобразуются, функцию преобразования задают остальные слова. При этом результаты обработки каждого блока суммируются и сумма является значением хеш-функции. Но в то же время, инициализация внутреннего состояния производится результатом обработки предыдущего блока. Именно поэтому независимо обрабатывать блоки и складывать результаты нельзя.

Что касается операций, которые используются в алгоритме, то можно выделить конкатенацию, сложение, побитовое «И»,исключающее «ИЛИ»,логический сдвиг вправо, циклический сдвиг вправо.

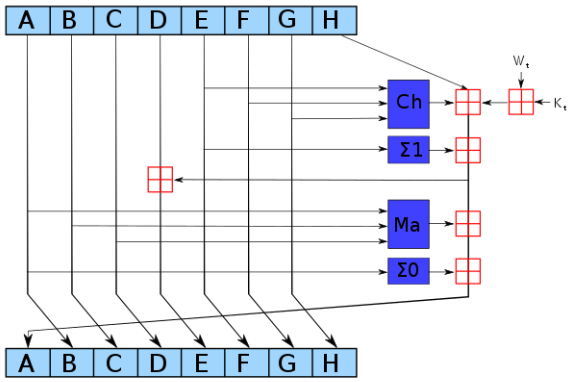


Рис. 3. Схема одной итерации алгоритмов SHA-2

Предлагается обратиться ко второй криптографической примитиве, наряду с хеш-функций, которые участвуют в качестве строительных блоков для построения цепочек - Цифровым подписям (ЦП).

Цифровые подписи в блокчейнах базируются на криптографии с открытым ключом(RSA). В ней используются два ключа. Первым является закрытый ключ, который нужен для формирования ЦП и хранится в конфеденциальности. Вторым является открытый ключ, который используется для проверки ЭП. Открытый ключ вычисляется на основе закрытого ключа, а вот обратное преобразование требует невозможного на практике объема вычислений, сравнимого с перебором[14].

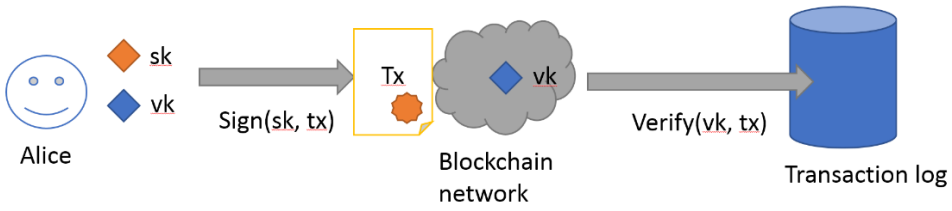


Рис. 4. Схема проверки подлинности ключа

Блокчейн использует цифровые подписи для аутентификации и обеспечения целостности транзакций (и иногда блоков). Особенность блокчейна состоит в том, что информация об аутентификации интегрирована в каждую транзакцию, а не отделена от логики, поэтому блокчейн считается более защищенным. В обычной системе можно взломать или административно обойти механизм аутентификации и провести манипуляции с backend, а в блокчейне сделать этого не получится по определению.

Выводы:

- Хеш-функция может принимать строку с любым количеством битов, а на выходе в результате алгоритмов сжатия получать строку со строго определенным числом символов.
- В системах блокчейн нашли широкое применение хеш-функции семейства *SHA-2,* которые построены на основе структуры Меркла – Дамгарда.
- В общем случае в основе построения хеш-функции лежит итеративная последовательная схема базисом алгоритма является сжимающая функция.
- Наличие системы публичных и персональных ключей, которые создают цифровую подпись. Цифровая подпусь уникальная для каждой операции и не может использоваться повторно, так как она генерируется из публичного ключа и содержимого сообщения.
- Никто не может изменить сообщение, т.к. эти изменения сделают подпись недействительной.

Библиографический список

1. Andreas M. Antonopoulos. 7. The Blockchain // Mastering Bitcoin. — O'Reilly Media, Inc., 2014. — ISBN 978-1-4493-7404-4
2. Bitcoin system [Электронныйресурс] // Frequently Asked Questions. URL: https://bitcoin.org/en/faq (дата обращения: 15.02.2017).
3. Melanie Swan. Blockchain: Blueprint for a New Economy. — O'Reilly Media, Inc., 2015. — 152 p. — ISBN 978-1-4919-2047-3
4. National Instiute of Standarts and Technology [Электронныйресурс] // Computer Security Division. URL: http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips180-2/fips180-2.pdf (дата обращения: 15.02.2017).
5. Damgard I. A Design Principle for Hash Functions: 9th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, California, USA, August 20-24, 1989,— ISBN 978-0-387-97317-3 — ISSN 0302-9743 — doi:10.1007/0-387-34805-0_39
6. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. Под ред. В.Ф. Шаньгина. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 2001. - 376 с.: ил.
7. Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. — 2008. — 9 с
8. Брюс Шнайер. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. — М.: Триумф, 2002. — ISBN 5-89392-055-4
9. Лапонина О.Р. Криптографические основы безопасности. — М.: Интернет-университет информационных технологий - ИНТУИТ.ру, 2004. — С. 320. — ISBN 5-9556-00020-5.
10. Нильс Фергюсон, Брюс Шнайер. Практическая криптография = PracticalCryptography: DesigningandImplementingSecureCryptographicSystems. — М. : Диалектика, 2004. — 432 с. — 3000 экз. — ISBN 5-8459-0733-0, ISBN 0-4712-2357-3
11. Хабрахабр [Электронный ресурс] // Алгоритм формирования Блокчейна./:. сост. DcoinURL:https://habrahabr.ru/company/dcoin/blog/249779/(дата обращения: 15.02.2017).
12. Хэш Цепочки Технологии Hasq./ — Олег Мазонка, Влад Попов. 2014. [Электронный ресурс] // URL: http://jrxv.net/x/16/Hasq_Hash_Chains_RU.pdf(дата обращения: 15.02.2017).
13. Florian Mendel, Norbert Pramstaller. Analysis of Step-Reduced SHA-256. — Institute for Applied Information Processing and Communications (IAIK) Graz University of Technology, Austria
14. Саломаа А. Криптография с открытым ключом. — М.: Мир, 1995. — 318 с. — ISBN 5-03-001991-X.

A.V. Kulakov, A.V. Semashko

ASPECTS OF ENSURANCE THE INTEGRITY OF INFORMATION USING BLOCK CHAIN TRANSACTIONS RESEARCH

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

This paper considers the problem of security needs and data integrity by using transactions blocks system. Presented the rationale for the use of the transaction block chains to create a distributed database. Conducted description of using cryptographic hash-functions while in the transaction block chain system.

Keywords: block chain, block chain transactions, control hash-sum, cryptographic function, header and a list of transactions, tree hashing, SHA-256, distributed storage

УДК 004.3:685.1

Д.М. Клочкова, А.Р. Семенова, Ю.С. Егоров

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена разработке комплекса управления устройством телеприсутствия, предназначенного для дистанционного проведения поисково-разведывательных работ в опасных для человека условиях. Устройство оснащено видеокамерой и лазерным дальномером, которые служат для навигации и сбора информации об исследуемом пространстве. Управление осуществляется с использованием мобильного приложения.

Ключевые слова: аппаратные средства; программные средства; телеприсутствие; мобильное приложение; поисково-разведывательные работы.

Телеприсутствие (telepresence) – это набор технологий, позволяющих человеку получить впечатление пребывания в месте отличном от его физического местонахождения. Подобный эффект достигается за счет двустороннего обмена информацией между человеком и специальным устройством (телеуправляемый робот или устройство телеприсутствия). Пользователь является оператором устройства и получает сенсорную информацию (видео, звук и т.п.) из точки, удаленной от него посредством различных датчиков, установленных на неподвижной или подвижной платформе. Например, человек получает изображение с камеры и микрофона устройства и вступает в общение или иные виды взаимодействия с удаленным объектом: отдает команды для перемещения устройства, обращается к аудитории через встроенные динамики, демонстрирует себя или какую-то информацию через дисплей удаленной платформы. Так у пользователя возникает иллюзия, что он видит место, в котором он физически не находится, при этом он может перемещаться по нему и взаимодействовать с находящимися там объектами [1].

Устройство телеприсутствия (RDP, Remote Presence Device) – это устройство, позволяющее оператору наблюдать за событиями в удалённом месте и так или иначе (информационно или физически) влиять на них, в частном случае под таким устройством понимается робот [2].

Система телеприсутствия должна включать в себя возможность манипулировать объектами, находящимися в удаленной среде. Это может быть реализовано различными способами. Самый простой – контроль над перемещением устройства. Так же возможны более сложные варианты, например, движения рук и пальцев можно считывать с помощью специальных перчаток, а тела – с помощью костюма. Устройство воспроизводит эти действия, а чем точнее воспроизводятся движения, тем больше эффект погружения.

Для обеспечения полного эффекта присутствия нужно воздействовать на все органы чувств человека, такие как зрение, осязание, обоняние и т.д. Кроме того, пользователю необходимо предоставить возможность воздействовать на удаленное пространство всеми привычными способами.

Ограничения технологии:

- достаточно высокая стоимость оборудования;
- необходимость наличия высокоскоростных каналов (от одного до несколько десятков Мбит/с), способных обеспечить многоканальную передачу данных на большие расстояния.

Одной из актуальных областей применения устройств телеприсутствия являются поисково-разведывательные работы. Робота можно отправить на опасные для жизни и здоровья человека территории, например, в заминированные области, а также места катастроф, что позволяет изучить опасную зону или провести в ней необходимые работы без непосредственного присутствия человека.

Робот-разведчик должен иметь необходимые устройства для сбора данных и навигации. Оператор, как правило, использует для этого установленные на роботе видеокамеры. Так же камера может использоваться для обнаружения и распознавания минно-взрывных заграждений.

Навигация робота может быть осложнена в темное время суток или в помещении. Научно-разведывательный робот может использовать фонарь, но для военного робота это может стать критически важным недостатком. Разрешить эту проблему можно разными способами. К примеру, может использоваться лазерный дальномер для построения примерной карты пространства, чтобы ориентироваться по ней.

Таким образом, устройство телеприсутствия должно включать в свой состав, как аппаратную часть, так и соответствующее встроенное программное обеспечение. Кроме того, потребуется разработка мобильного приложения для дистанционного управления.

Для инженерной реализации программно-аппаратного комплекса был выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 со встроенным Wi-Fi модулем и видеокамерой. Технические характеристики платы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики компонентов платы Raspberry Pi 3.

Компонент	**Характеристики**
Процессор	Broadcom BCM2837, 4× ARM Cortex-A53, 1.2GHz
Графический процессор	Broadcom VideoCore IV
Оперативная память	1GB LPDDR2 (900 MHz)
Поддерживаемый сетевой стандарт и его характеристики	802.11n wireless, 2.4-5.0 GHz, 300 Мбит/с
Постоянная память	microSD
Bluetooth	Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy
Разъемы	HDMI, 3.5mm analogue audio-video jack, 4× USB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI)
Камера	5mp, 1080 P 720 P

На плате Raspberry Pi установлены: микропроцессор, оперативная память, системы ввода-вывода и другие модули, необходимые для функционирования программно-аппаратного комплекса. Raspberry Pi работает в основном под управлением операционных систем, основанных на Linux ядре [3].

Для реализации программы управления поисково-разведывательным устройством телеприсутствия был использован язык C# [4]. Приложение имеет класс «Controller» для каждого физического устройства в отдельности, а также класс «MainController», который координирует действия всех установленных на роботе устройств. Так же предусмотрены классы, которые отвечают за обеспечение связи робота с устройством дистанционного управления.

На рисунке 1 представлена диаграмма классов программы управления поисково-разведывательным устройством телеприсутствия.

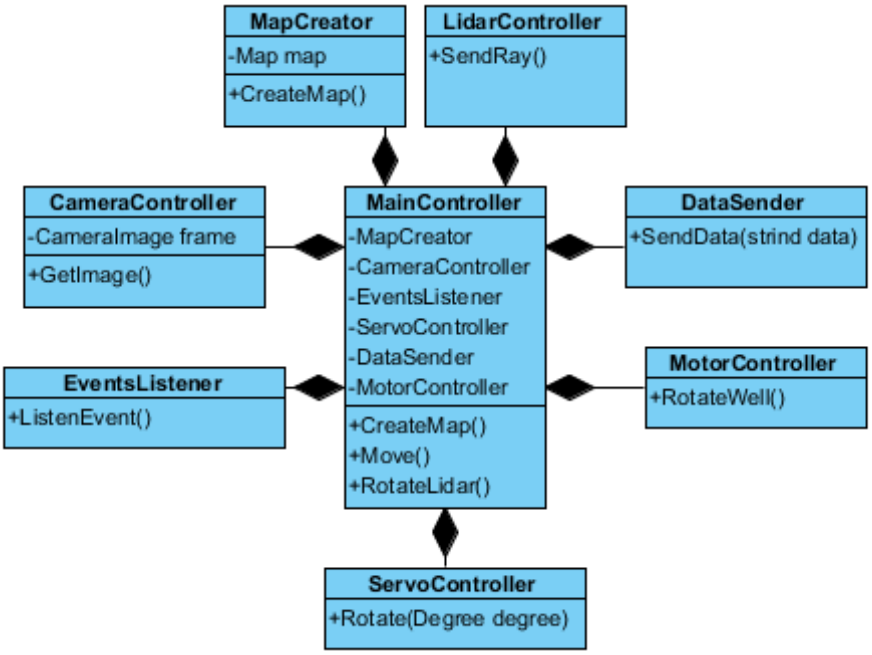


Рис 1. Диаграмма классов программы управления поисково-разведывательным устройством телеприсутствия

Для управления роботом разработано мобильное приложение. На рисунке 2 представлены экранные формы графического интерфейса пользователя.

а) б)

Рис. 2. Экранные формы грфического интерфейса пользователя мобильного приложения управления устройством телеприсутствия: а) вкладка отображения информации получаемой от камеры; б) вкладка отображения карты построенной по данным лидара

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

1. Конопки для управления движением устройства.
2. Область отображения информации, поступающей от камеры.
3. Кнопки для переключения вкладок приложения.
4. Область отображения данных, поступающих от лидара.

Мобильное приложение должно позволять оператору определять местоположение робота, отображая информацию, полученную с камеры. Так же приложение, получая данные от лидара, должно визуализировать их в виде карты, по которой можно ориентироваться в темное время суток или в неосвещенном помещении.

Мобильное приложение разрабатывалось с помощью межплатформенной среды разработки Unity.

Для разработки мобильного приложения был использован паттерн проектирования «Модель-Представление-Контроллер» (MVC, Model-View-Controller), который представляет собой схему разделения данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента: модель, представление и контроллер, что обеспечивается вохможность независимой модификации каждого компонента [5].

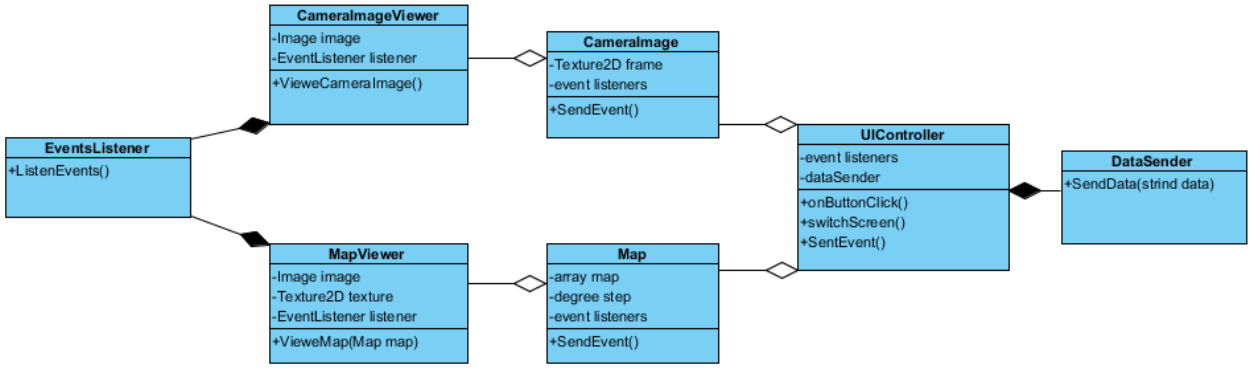


Рис 3. Диаграмма классов мобильного приложения управлением устройством телеприсутствия

В качестве заключения стоит отметить, что существующие робототехнические системы способны проводить развёртывание станций, подготовку помещений и внешней среды, монтировать силовые установки и прочие конструкции без непосредственного присутствия человека в опасных для жизни условиях. Использование устройств телеприсутствия позволит повысить эффективность человеческой деятельности в различных областях, как в мирное, так и военное время, снизить расходы на эксплуатацию инфраструктуры, повысить безопасность работы оператора.

Библиографический список

1. Елисеев И.А. Телеприсутствие во всей красе // Сети. 2009. № 11. Режим доступа: https://www.osp.ru/nets/2009/11/10779084.
2. Ira M. Weinstein. The Benefits of a Telepresence Platform // Wainhouse Research. 2008. 8 p.
3. Ричардсон М., Уоллес Ш. Заводим Rasberri Pi. Пер. с англ. – М.: Амперка, 2013 – 230 с.
4. Шилдт, Герберт. Полный справочник по C#. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 752 с.
5. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб.: Питер, 2015. – 368 с.

D.M. Klochkova, A.R. Semenova, Y.S. Yegorov

DEVELOPMENT OF REMOTE PRESENCE DEVICE MANAGEMENT SYSTEM

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

The work is devoted to the development of the remote presence device management system. The device is intended for remote carrying out of prospecting and exploration works in life-threatening conditions. The device is equipped with a video camera and a laser rangefinder, which serve to navigate and collect information about the study space. Management is carried out using a mobile application.

Keywords: hardware; software; telepresence; mobile app; prospecting and exploration work.

УДК 004:378.1

Ю.С. Егоров, М.В. Калашникова, Д.А. Чупров

МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПОРТФОЛИО ОБУЧАЮЩЕГОСЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «Кибернетика»

В работе рассматривается актуальная задача формирования в рамках информационно-образовательной среды образовательной организации электронного портфолио обучающегося, обеспечивающего сохранение работ обучающегося, рецензий и оценок на эти работы со стороны любых участников образовательного процесса.

Ключевые слова: мониторинг; образование; портфолио; программное обеспечение; информационная система.

В соответствии с письмом Минобрнауки «О федеральных государственных образовательных стандартах» новые федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО) содержат общесистемные требования к реализации программ бакалавриата (специалитета) и магистратуры, которые предусматривают создание информационно-образовательной среды организации.

Такая информационно-образовательная среда должна обеспечивать возможность формирования электронного портфолио обучающегося, в том числе сохранение работ обучающегося, рецензий и оценок на эти работы со стороны любых участников образовательного процесса.

В настоящее время организации образования столкнулись, с одной стороны, с необходимостью внедрения готового решения, а с другой стороны – с отсутствием на рынке информационных систем, полностью удовлетворяющих требованиям ФГОС ВО.

Таким образом, требование о необходимости создания электронной информационно-образовательной среды образовательного учреждения предопределяет необходимость разработки электронного портфолио обучающегося.

Электронное портфолио предназначено для того, чтобы стимулировать активное и сознательное отношение самого обучающегося к процессу и результатам обучения, осуществлять самооценку достигнутых результатов.

Поскольку электронное портфолио отражает общественную деятельность и интеллектуальную сферу обучающегося, то процесс создания портфолио будет способствовать повышению самооценки, развитию мотивации к непрерывному обучению.

Электронное портфолио содержит разделы, посвященные планированию будущих этапов обучения в соответствии с общей направленностью непрерывного образования, что делает его рабочим инструментом, позволяющим обучающемуся эффективно контролировать, планировать и оценивать собственные образовательные достижения.

Мониторинг показателей результативности является одной из основных задач автоматической интерпретации поступающей информации. Для обеспечения эффективного представления и обработки данных, а также их агрегатов предлагается в графическом интерфейсе пользователя электронного портфолио обучающегося использовать два измерения «Организационная структура» и «Время».

Измерение «Организационная структура», понимаемое в обобщенном смысле, соответствует иерархической структуре организации, состоящей из подразделений различных уровней вплоть до сотрудников и обучающихся.

Измерение «Время», настраивается и конфигурируется для обработки типовых запросов по представлению и агрегированию данных, полученных, например, за календарный год;

учебный год; за месяц; за день. Кроме того, обеспечивается обработка запроса с указанием дат начала и окончания произвольного периода анализа.

Достигнутый уровень обучающегося можно охарактеризовать совокупностью сформированных показателей результативности его интеллектуальной деятельности (так называемых мер).

В качестве основных вариантов двумерного (табличного) представления данных предусматриваются следующие виды:

- Показатели-Подразделения (за выбранный период времени): формируется распределение достигнутых результатов обучающимися по выбранному уровню организационной иерархии системы по всем возможным показателям за выбранный период времени;
- Показатели-Время (для выбранного обучающегося): представляется динамика изменения показателей во времени (например, по дням в пределах месяца, по месяцам в пределах года и т.п.) для выбранного подразделения;
- Подразделения-Время (для выбранного показателя): формируется распределение достигнутых результатов во времени всеми подразделениями по выбранному показателю.

Таким образом, электронное портфолио должно стать одним из средств накопления индивидуальных результатов образования (особенно компетентностных составляющих этих результатов) и отражать все достижения обучающегося (учебные, внеучебные, профессиональные), удостоверять фактические достижения и выступать как доказательное средство достигнутых результатов.

Программное обеспечение информационной системы «Электронное портфолио обучающегося» должно обладать следующими основными функциональными возможностями:

- рецензирование и оценка работы обучающихся со стороны любых участников образовательного процесса;
- накопление подтверждающих документов, выступающих как доказательство достигнутых результатов;
- контроль, планирование и оценка обучающимся собственных образовательных достижений.

Предполагается наличие следующих ролей пользователей:

- Гость – просматривает достигнутые результаты в свободном доступе по предварительному запросу, в качестве «Гостя» могут выступать родители и родственники обучающихся, настоящие и будущие работодатели, а также иные заинтересованные лица.
- Обучающийся – формирует собственное расписание занятий, вводит подтверждающие материалы (заполняет портфолио), взаимодействует с преподавателями.
- Преподаватель – формирует собственное расписание занятий, загружает учебные материалы, создает учебные группы, оценивает работы обучающихся, взаимодействует с обучающимися.
- Управляющий – формирует учебные курсы, вводит списки преподавателей и обучающихся, осуществляет мониторинг успеваемости и эффективности образовательного процесса в целом.
- Системный администратор – ведет базу данных и подтверждающих материалов, управляет правами пользователей.

Для наглядности на рисунке 1 представлен графический интерфейс пользователя для роли «Обучающийся», вкладка «Портфолио».

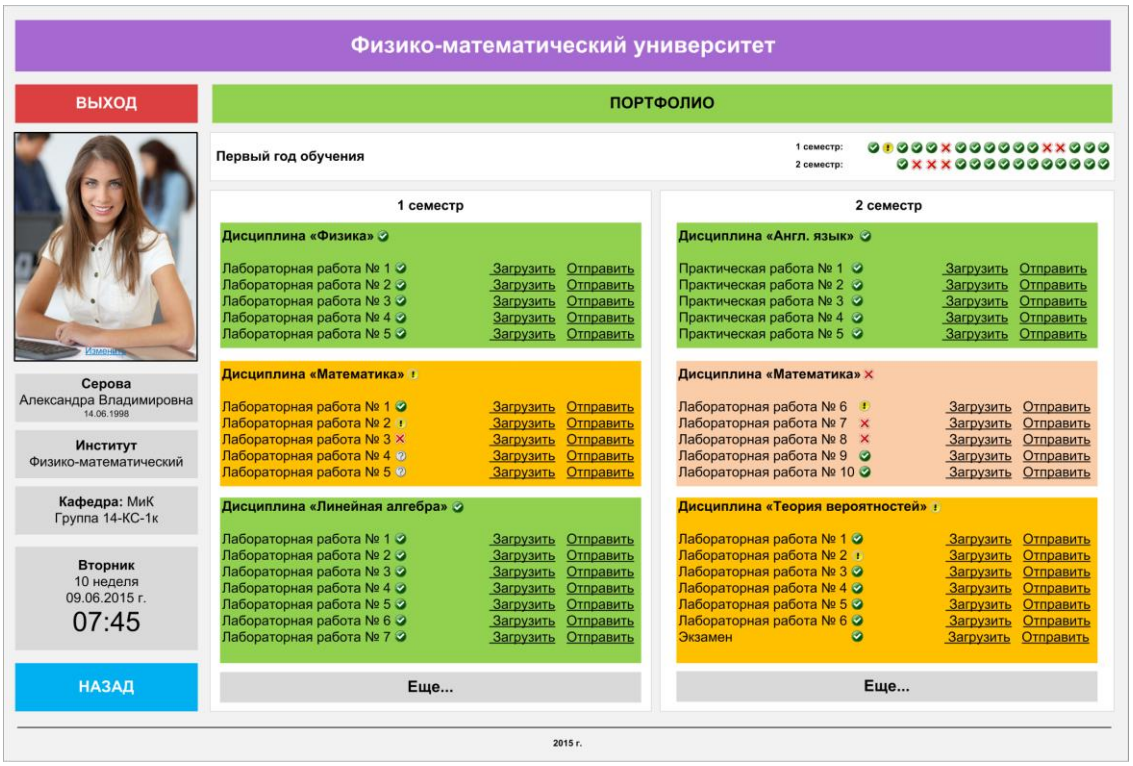


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя информационной системы «Электронное портфолио обучающегося»

К основным техническим характеристикам информационной системы относятся:

- распределенный ввод и накопление данных (база данных);
- ввод, хранение и представление подтверждающих документов (система хранения документов и материалов);
- привязка пользователей к организационной структуре учебного заведения;
- расчет значений показателей по подразделениям и обучающимся за различные интервалы времени;
- оперативный анализ динамики показателей результативности;
- контроль достижения запланированных показателей на выбранный момент времени (база данных, аналитическая подсистема);
- автоматизированное формирование аналитических отчетов;
- настраиваемая визуализация форм и графиков для представления результатов.

Для инженерной реализации был выбран язык PHP – скриптовый язык общего назначения, интенсивно применяемый для разработки веб-приложений.

В архитектуре информационной системы можно выделить следующие основные компоненты:

1. Модуль визуализации. Представляет собой графический интерфейс пользователя с гибкими возможностями настройки. Модуль необходим для выполнения основных действий с системой, добавления публикаций с подтверждающими материалами.
2. База данных (БД). Часть системы, необходимая для хранения следующих данных:
   - пользователи системы;
   - подразделения;
   - типы публикаций;
   - типы атрибутов;
   - типы пользователей;
   - и т.д.

3. Хранилище документов (ХД). Часть системы, необходимая для хранения подтверждающих материалов.
4. Модуль обработки данных. Модуль необходим для обращения к ХД и БД с использованием соответствующих запросов с целью обработки данных при формировании статистики, а также для мониторинга результативности обучения.
5. Модуль анализа данных. Предназначен для обеспечения функций мониторинга эффективности образовательной деятельности.

В первую очередь предлагаемое решение ориентировано на высшую школу, однако, потенциально информационная система может быть внедрена в средние учебные заведения, школы, частные образовательные и консалтинговые организации, а также возможно использование системы единичными пользователями.

Применительно к организациям, занимающимся научной деятельностью, электронное портфолио может стать одним из средств накопления индивидуальных результатов научно-исследовательской деятельности: публикации статей в научных журналах, монографий, тезисов и материалов конференций, патентов, свидетельств о регистрации программ ЭВМ и пр.

Показатели результативности обучающегося рассматриваются как критерий оценки успешности его обучения. Модуль анализа данных в информационной системе «Электронное портфолио обучающегося» позволит значительно упростить и ускорить процесс анализа эффективности деятельности обучающегося.

Отдельный интерес представляет опция отображения «план/факт», которая позволит руководителям и ответственным сотрудникам сопоставлять фактически достигнутые результаты по выбранному показателю с плановыми значениями. Определение уставок на критические отклонения от графика будет способствовать повышению эффективности контроля за результативностью обучения и предоставить инструмент для поддержки принятия управленческих решений, включая оценку возможности достижения целевых значений показателей к установленным срокам.

Электронное портфолио должно быть интегрировано в информационно-образовательную среду образовательной организации как инструмент поддержки образовательного процесса, отвечающий стандартам нового поколения и являющийся неотъемлемой частью программы обучения в вузе.

Библиографический список

1. Баранов В.Г., Милов В.Р., Егоров Ю.С., Дубов М.С., Смирнова А.А. Информационно-аналитическая система мониторинга результативности интеллектуальной деятельности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. № 11. С. 12-18.
2. Варламова Л.Д. Электронное портфолио в профессионально-личностном становлении будущих инженеров // Информатика и образование. 2009. №3. С. 120.
3. Громова А.А., Егоров Ю.С. Разработка информационной системы «Электронное портфолио» // Сборник трудов XV Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (БТН-2016). Н. Новгород: НГТУ, 2016. С. 94.
4. Егоров Ю.С., Громова А.А., Смирнова А.А. Электронное портфолио как форма контроля и оценки достижений учащихся // Материалы XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2016). Н. Новгород: НГТУ, 2016. С. 181.
5. Пинская М.А. Место портфолио в современном образовании // Оценка качества образования. 2008. № 2. С. 56.
6. Федотова Е., Новикова Т.Г., Прутченков А.С. Зарубежный опыт использования портфолио // Методист. 2005. № 5. С.27.

Y.S. Yegorov, M.V. Kalashnikova, D.A. Chuprov

ELECTRONIC PORTFOLIO APPLICATION IN MONITORING EFFECTIVENESS OF EDUCATION

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Kibernetika LLC

The paper considers the formation of an electronic portfolio of the student. Portfolio should preserve the work of the student, reviews and evaluations on these works by any participants in the educational process.

Keywords: monitoring; education; portfolio; software; information system.

УДК 621.391

Т.П. Куракова, Л.Д. Массонжи, А.Г. Самойлов

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Рассмотрено математическое описание замираний сигналов миллиметрового диапазона частот, осваиваемого для нового поколения подвижной связи 5G. Показано, что интерференционные замирания сигналов миллиметрового диапазона можно описать четырехпараметрическим распределением плотности вероятностей. Даны рекомендации по моделированию четырехпараметрического распределения плотности вероятностей замираний в радиоканалах подвижной связи.

Ключевые слова: замирания, отражение сигналов, передаточная функция радиоканала, миллиметровые волны, многолучевость.

Введение

Наличие многочисленных отраженных от подстилающей поверхности и от местных предметов сигналов миллиметрового диапазона (ММД) приводит к многолучевости и интерференции радиоволн на входе приемника системы связи ММД. Многолучевые радиоканалы с отражениями, эффективно использующиеся в большинстве высокоскоростных телекоммуникационных сетей радиосвязи, имеют нестационарные параметры, что обусловлено зависимостью их свойств от множества сложных физических явлений, одновременно воздействующих на передаточную функцию радиоканала. Для описания прохождения радиосигналов через такие каналы можно применить аппарат многомерного статистического анализа, но это значительно усложняет математические модели и делает их малопригодными для решения конкретных задач.

Распространённым допущением, позволяющим существенно упростить математические модели каналов с переотражениями и рассеянием, является многократно экспериментально подтвержденное предположение о локальной стационарности поведения передаточных функций радиоканалов, а значит и замираний сигналов при их распространении. Огромный научный труд исследователей всего мира позволил создать математические модели для основных видов замираний при распространении радиосигналов через многолучевые КВ, УКВ и СВЧ радиоканалы и экспериментально подтвердить на раличных трассах связи их адекватность реальным замираниям сигналов. Но для радиоканалов ММД такая задача пока не решена, поэтому целью настоящей работы является создание математического описания интерференционных замираний в многолучевых радиоканалах ММД для подвижной связи нового поколения 5G.

Отражения сигналов ММД при распространении по радиоканалам связи

При использовании систем ММД в высокоскоростных сетях связи уровень принимаемого сигнала определяется суммой сигналов, проходящего по прямому оптически видимому пути и отраженных от подстилающей поверхности и от местных предметов, как показано на рис. 1. В известных методиках проектирования систем связи ММД влияние отраженных сигналов на характеристики систем связи учитывают путем выделения при расчетах определенного энергетического запаса на интерференционные замирания из-за многолучевости. При этом исходят из того, что процесс распространения сигналов в течении нескольких десятков секунд стационарный и замирания можно описать законами распределения вероятностей и автокорреляционными функциями. Наиболее часто используют релеевский закон распределения вероятностей изменения амплитуды и фазы сигнала, как более удобный для математического моделирования и аналитических выводов. Однако опыт

исследований и эксплуатации систем коротковолновой и дальней тропосферной радиосвязи показал, что релеевские замирания сигналов, вызванные многолучевостью, на практике встречаются не чаще чем в 70 % времени сеансов связи [1,2]. В остальное время сеансов связи наблюдаются другие распределения вероятностей флуктуаций амплитуды и фазы передаваемых по радиоканалам сигналов [3,4].

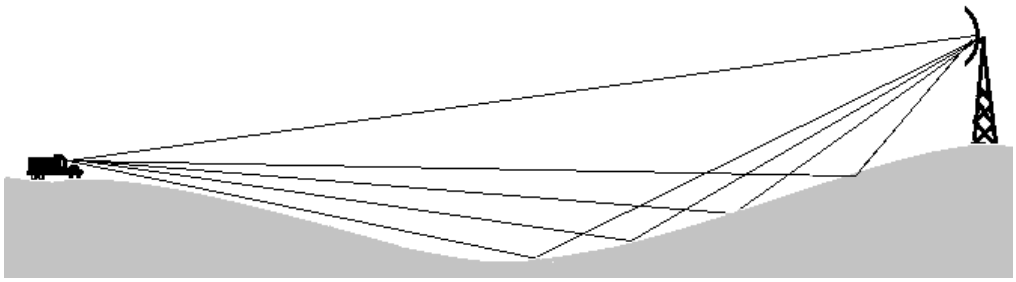


Рис. 1. Многолучевое распространение сигналов при радиосвязи

В миллиметровом диапазоне радиоволн для отражения сигналов достаточно соизмеримых с длинной волны размеров отражающей поверхности, то есть поверхности в несколько квадратных миллиметров. При подвижной радиосвязи отражающими элементами чаще всего является покрытия автодорог, тротуаров и стены зданий. Существующие нормы покрытий автодорог требуют организации шероховатости для повышения сопротивления покрытия скольжению [5]. Шероховатость покрытия характеризуется средней глубиной впадин и средней глубиной выступов и размеры этих параметров покрытия доходят до 3-6 мм [5], что позволяет описать покрытие как множество точек отражения сигналов ММД. Величина этого множества определяется размерами площади отражения сигналов.

При радиосвязи подвижных абонентов на подстилающей поверхности можно выделить площадь отражения сигналов ММД протяженностью a_1+a_2, как показано на рис. 2.

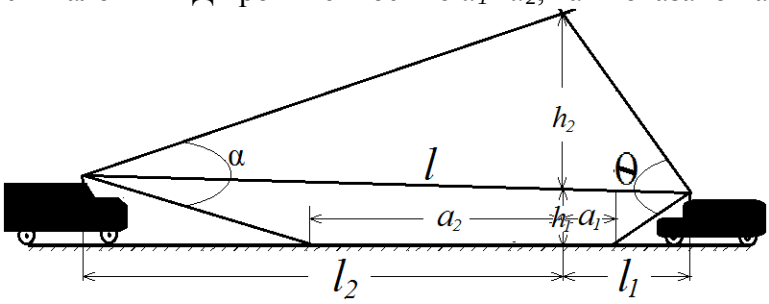


Рис.2. Радиосвязь подвижных абонентов

Для ровной подстилающей поверхности площадь отражения сигналов имеет форму совмещенных параболических сегментов, показанную на рис.3.

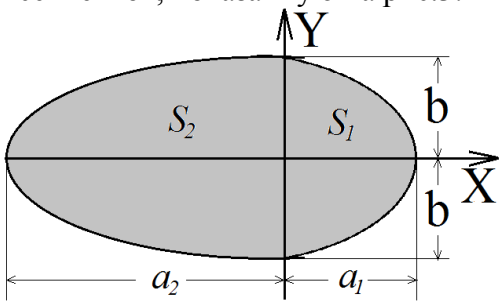


Рис. 3. Площадь отражения сигналов ММД от подстилающей поверхности

При приближении абонентов затухание сигналов ММД на сокращающейся трассе уменьшается, что ведет к росту уровня принимаемого сигнала. Однако расстояния *a* и b тоже

сокращаются, площадь отражения при этом уменьшается, а количество отражателей и средняя энергия отраженных сигналов уменьшается. Из рис.1 видно, что при сближении абонентов увеличиваются углы падения радиоволн на подстилающую поверхность, что тоже уменьшает среднюю энергию отраженных сигналов. На основании этого при ровной подстилающей поверхности возможен компромисс между ростом уровня принимаемых отраженных сигналов при сближении абонентов и уменьшением средней энергии суммарного отраженного сигнала.

Описание интерференционных замираний в радиоканалах ММД

Параметры параболических сегментов:

$$b = \sqrt{h_2^2 - h_1^2}; \qquad a_1 = l_1 - h_1 ctg\frac{\theta}{2}; \qquad a_2 = l_2 - h_1 ctg\frac{\alpha_2}{2}.$$

Площади, занятые параболическими сегментами:

$$S_1 = \frac{4}{3} b a_1; \qquad S_2 = \frac{4}{3} b a_2.$$

Общая площадь отражения сигналов ММД от подстилающей поверхности определится как:

$$S = S_1 + S_2 = \frac{4}{3}[l_1 + l_2 - h_1(ctg\frac{\theta_1}{2} + ctg\frac{\alpha}{2})]\sqrt{\left(\frac{(l_1 + l_2)tg\frac{\theta}{2}tg\frac{\alpha}{2}}{tg\frac{\theta}{2} + tg\frac{\alpha}{2}}\right)^2 - h_1^2}.$$

В миллиметровом диапазоне на подстилающей поверхности *S* образуется множество ***A*** отражателей сигналов, формирующих отраженные сигналы ММД со случайными амплитудами и случайными фазами. Если использовать комплексное представление передаточной функции канала с переменными параметрами, то можно записать перендаточную функцию отраженных сигналов ММД как:

$$\dot{H}(A) = He^{i\varphi} = \sum_{i=1}^{M} H_i \cos\varphi_i + j\sum_{i=1}^{M} H_i \sin\varphi_i = X + jY,$$

где $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ - модуль передаточной функции; $\varphi = arctg(Y/X)$ - аргумент передаточной функции; *M* - количество отраженных от подстилающей поверхности сигналов; H_i, φ_i - модули и аргументы передаточной функции *i*-го отражателя, распределенные по случайным законам.

В силу центральной предельной теоремы при $M \to \infty$ величины $X = \sum_{i=1}^{M} H_i \cos\varphi_i$, $Y = j\sum_{i=1}^{M} H_i \sin\varphi_i$ распределены нормально, независимо от законов распределения H_i, φ_i. Это дает возможность определить статистику модуля передаточной функции найдя характеристические функции величин X^2, Y^2, затем величины *H* и выполнив обратное преобразование Фурье получим описанное в работах [2,4] четырехпараметрическое дифференциальное распределения модуля передаточной функции канала отраженных сигналов в виде

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y}\exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2\sigma_y^2 + m_y^2\sigma_x^2}{2\sigma_x^2\sigma_y^2}\right) \cdot$$

$$\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{S=0}^{\infty}\frac{(2k+2S-1)!(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2S}\sigma_x^{2S}}{k!(2S)!2^k \sigma_y^{2k+4S} m_x^{k+S}} H^{k+S} I_{k+S}\left(\frac{m_x}{\sigma_x^2}H\right),$$

где $I_{k+s}(z)$ - модифицированная функция Бесселя порядка k+s; $\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ - параметры четырехпараметрического распределения.

Фаза принимаемого сигнала ММВ также флуктуирует по четырехпараметрическому закону, зависящему от параметров $\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ [6]

$$\omega(\varphi) = [\sigma_X\sigma_Y \exp(m_X^2/2\sigma_X^2 - m_Y^2/2\sigma_Y^2)/2\pi(\sigma_Y^2\cos^2\varphi + \sigma_X^2\sin^2\varphi)]\{1 + L\sqrt{\pi}\exp(L^2)[1+\Phi(\sqrt{2}L)]\},$$

где $\Phi(\cdot)$ – интеграл вероятности; $L = (m_X\sigma_Y^2\cos\varphi + m_Y\sigma_X^2\sin\varphi)/\sigma_X\sigma_Y\sqrt{\sigma_Y^2\cos^2\varphi + \sigma_X^2\sin^2\varphi}$.

При определенных значениях параметров σ_x, m_x, m_y, σ_y выражение четырехпараметрического закона распределения вероятностей упрощается и как частные случаи становятся возможны различные законы распределения вероятностей замираний: релеевский ($m_x = m_y = 0$, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$); обобщенно – релеевский (райсовское) ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $m_x = 0$, $m_y \neq 0$); усеченно – нормальный ($m_x = m_y = 0$, σ_x или $\sigma_y = 0$).

Зависимости параметров четырехпараметрического закона от характеристик трассы можно определить аналитически для точечной модели рассеивающих отражателей [7], а также методами статистического анализа экспериментальных записей замираний сигналов ММД на различных трассах.

Имитация интерференционных замираний в каналах ММД

Метод моделирования интерференционных замираний в канале ММД можно предложить путем представления замирающего сигнала на выходе канала в виде суммы ортогональных составляющих:

$$S_{вых}(t) = H(t)U(t)\cos[\omega t + \theta(t) + \varphi(t)] =$$
$$= [X(t) + m_x]U(t)\cos[\omega t + \varphi(t)] + [Y(t) + m_y]U(t)\sin[\omega t + \varphi(t)],$$

где $S(t) = U(t)\cos[\omega t + \varphi(t)]$ – исследуемый сигнал;

$\widehat{S}(t) = U(t)\sin[\omega t + \varphi(t)]$ –комплексно-сопряженный сигнал;

$X(t)$, $Y(t)$ – независимые нормальные случайные процессы;

$H(t) = \sqrt{[X(t) + m_x]^2 + [Y(t) + m_y]^2}$ – модуль коэффициента передачи канала;

$\theta(t) = arctg\{[Y(t) + m_y]/[X(t) + m_x]\}$ – его аргумент.

Случайный процесс $S_{вых}(t)$ не сложно получить путем перемножения и затем суммирования квадратурных составляющих входного сигнала и ортогональных компонент коэффициента передачи.

Библиографический список

1. Jakeman, E. Non-Gaussian models for the statistics of scattered waves / Jakeman E., Tough R.J.A. // Advances in Physics, 1988, v.37 (5). - pp. 471-529.
2. Самойлов, А.Г. Имитаторы многолучевых радиоканалов / А.Г. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. - 2003, №4. - С.32-36.
3. Илюшин, Я.А. Замирания КВ радиосигналов при ионосферном распространении радиоволн / Я.А. Илюшин //. - М.: Изд. физического факультета МГУ, 2009. - 34 с.
4. Жоау, А. Оценка замираний сигнала на линиях спутниковой связи / А. Жоау, А.Г. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. - 2014, №2. - С.19-25.
5. Технические указания по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью. ВСН 38-90. - М.: Транспорт, 1990. [Электронный ресурс], URL https://znaytovar.ru/gost/2/VSN_3890_Texnicheskie_ ukazaniy.html (дата обращения 16.12.17).
6. Кловский, Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам / Д.Д. Кловский // М.: Связь, 1969. – 375 с.
7. Галкин, А.П., Моделирование каналов систем связи / А.П. Галкин, А.Н. Лапин, А.Г. Самойлов // М.: Связь, 1979.- 96 с.

T.P. Kurakova, L.D. Massongi, A.G. Samoylov

INTERFERENCE ALARM OF SIGNALS OF MILLIMETER WAVE RANGE

Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs

A mathematical description of signal fading in the millimeter frequency range, developed for the new generation of mobile communication 5G, is considered. It is shown that interference fading of millimeter wave signals can be described by a four-parameter distribution of the probability density. Recommendations for modeling of a four-parameter distribution of the probability density of fading in radio channels of mobile communication are given.

Key words: fading, reflection of signals, radio channel function, millimeter waves, multipath.

УДК 656.7.052

П.В. Кирьянова, В.С. Сюваткин

МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ НАД ПЕРЕГРУЗКАМИ В МАРШРУТИЗАТОРАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В основе модернизации лежит идея введения дополнительного алгоритма контроля над перегрузками. В статье предлагается новая экспериментально полученная формула для расчета количества пакетов в буферах сетевых хостов. Используя эту формулу, обновленный протокол позволяет получить более равномерную скорость передачи пакетов и избежать частой перегрузки буфера.

Ключевые слова: протокол TCP, контроль перегрузок, буфер сетевых хостов, обновленный протокол

В глобальных сетях передачи данных, включая Интернет сети, для оптиммизации и повышения производительности атуальны проблемы управления потоком данных. Для управления потоком данных широко используется протокол TCP, который наряду с положительными качествами имеет ряд недостатков, приводящих к потерям пакетов и существенной неоднородности скорости поступления и обработки пакетов в маршрутизаторах. Используются некоторые разновидности моделей управления потоком, отличающихся чувствительностью либо к задержкам по времени (RTT), либо к потерям пакетов при обработке очереди в промежуточных маршрутизаторах.

Особенностью передачи пакетных данных является возникновение ситуации перегрузки работы маршрутизатора по мере нарастания потока поступающих пакетов. протокол TCP и многие его разновидности в ситуациях прегрузки резко снижает скорость передачи пакетов на сегменте сети. Устраняется перегрузка и управление потоком начинает снова наращивать скорость передачи до следующей перегрузки. В целом поток носит очень неоднородный, пульсирующий характер. И такой сценарий может происходить сотни раз в секунду. По мере приближения к состоянию перегрузки протоколы управления предусматривают и возможность потери пакетов с последующей процедурой повторной передачи потерянных пакетов.

Целью работы является повышение производительности промежуточных маршрутизаторов за счет уменьшения пульсаций скоростей поступления и обработки пакетов данных. В данной работе предпринято усовершенствование алгоритма управления потоком с целью обеспечения большей устойчивости к случайным потерям и повышения эффективности пропускной способности в промежуточных маршрутизаторах.

Эффективность пропускной способности маршрутизатора определяется количеством пакетов, находящихся в буфере и разницей скоростей поступления и обработки пакетов.

Из литературы [1-3] известна и используется на практике коммутации пакетов формула оценки количества пакетов, находящихся в буфере:

$$Q = (V_{\text{ожидаемая}} - V_{\text{реальная}}) \ ,$$

которую удобно записать в другом виде:

$$Q = W \frac{RTT_{\text{реал}} - RTT_{\text{мин}}}{RTT_{\text{реал}}} \ , \qquad (1)$$

где - W – текущий размер окна передаваемых данных; RTT - время, прошедшее с момента передачи пакета до получения подтверждения на его получение соответственно для реального (текущего) и минимально возможного времени.

С помощью этой формулы реализация TCP Vegas определяет параметр diff, который является основным при определении изменения размера окна передаваемых данных (параметр

cwnd – значение окна перегрузки) и, следовательно, является основным механизмом регулирования скорости передаваемых данных.

Однако, практические наблюдения и моделирование в среде NS – 2 показали, что расчет количества пакетов, находящихся в промежуточных буферах, по формуле (1) не всегда верен. Это объясняется тем, что реальный трафик является смесью мультисервисных пакетов с различными требованиями на допустимые времена задержек и потери пакетов. Из-за этого и конечной скорости обработки пакетов в промежуточных маршрутизаторах возникают перегрузки и сильные изменения скорости потока в целом. Протокол TCP предполагает резкое уменьшение скорости потока при возникновении перегрузки и последующее новое нарастание скорости. Такое управление потоком приводит к весьма частым и глубоким изменениям скорости передачи. Передача носит резкопульсирующий характер, в следствии чего возникает перегрузка буферов промежуточных узлов (мршрутизаторов, вид которой показан на рис.1.

В данной работе получена другая формула расчета количества пакетов в буферах:

$$Q = \frac{RTT_{\text{var}}}{RTT_{\text{реал}}} W \ , \qquad (2)$$

где – $RTT_{\text{реал}}$ измеряемое текущее время с момента отправки пакета до момента прихода на него подтверждения; W – текущий размер окна; RTT_{var} – отклонение от сглаженного значения параметра $RTT_{\text{реал}}$.

Отличием является то, что отклонение значения $RTT_{\text{реал}}$ производится не от минимального значения RTT, а от сглаженного значения RTT_{var}. Это позволяет уменьшить разницу между максимальной и минимальной скоростями поступления и обработки пакетов. Это обеспечивает более усредненную скорость передачи пакетов и повышает производительность маршрутизаторов. На рис. 1 и 2 показаны графики поведения количества пакетов в буфере, поступающих из смежных потоков от различных источников, полученные моделированием в среде NS – 2, полученных с использованием общепринятой формулы (1) и полученной формулы (2), соответственно.

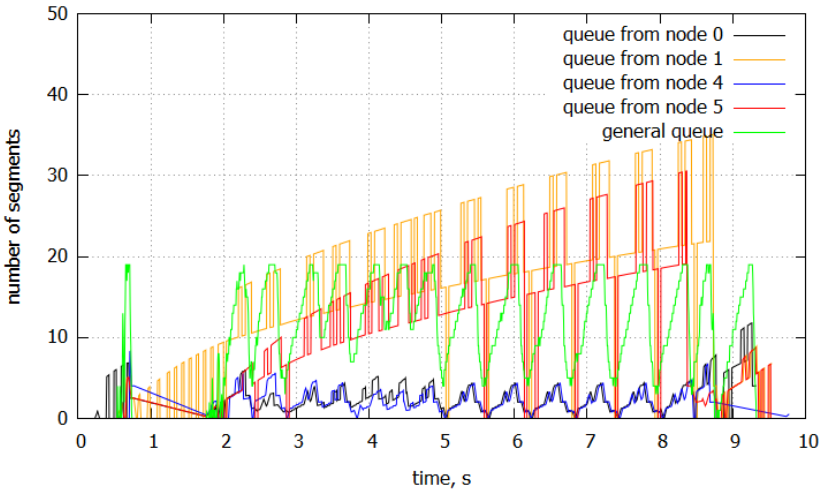


Рис. 1. – Количество пакетов, находящихся в буфере промежуточного узла, рассчитанное по формуле (1)

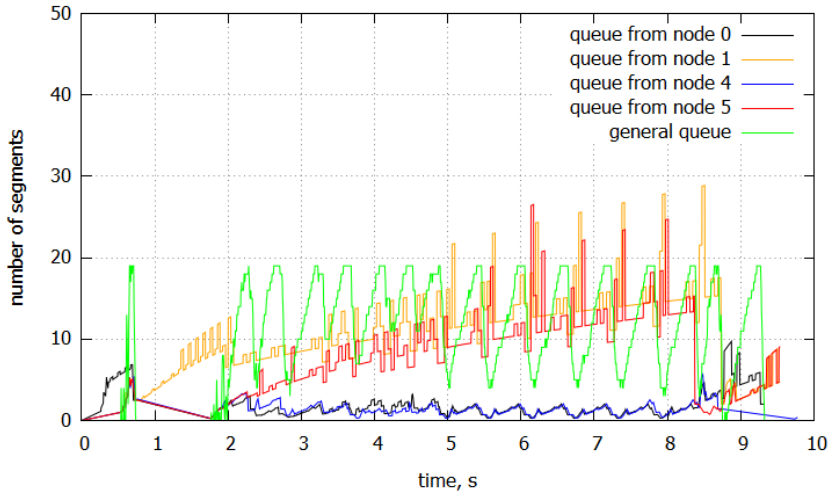


Рис. 2 – Количество пакетов, находящихся в буфере промежуточного узла, рассчитанное по формуле (2)

Видно, что применение формулы (2) относительно пульсирующего трафика (эксперимент проводился для модели протокола TCP Reno) приводит к более близким к реальным значениям загруженности буферов, нежели применение формулы (1). Используя эти расчеты, можно обеспечить более равномерную загруженность буфера и не допускать значительного переполнения буферов промежуточных узлов сети.

Из анализа поведения процесса заполнения буфера предлагается модернизированный алгоритм управления потоком. Предлагается ввести механизм контроля текущего состояния буфера, который состоит в следующем.

При потере пакета необходимо определить количество пакетов, находящихся в буфере промежуточных узлов для данного соединения (параметр Q_{max}). Запоминается и значение $RTT_{крит}$, при котором произошла потеря. Далее с помощью алгоритмов *fast retransmit* и *fast recovery* алгоритм переходит либо в состояние медленного старта (при потере пакета по тайм-ауту), либо возвращается в начальное состояние предотвращения перегрузки. Однако параметр *cwnd* увеличивается только до тех пор, пока не будет выполняться условие $0{,}8\ Q_{max} < Q$ (где Q текущее количество пакетов, находящихся в буфере) или произойдет потеря пакета. Данные пределы для параметра Q_{max} выбраны в соответствии с возможной ошибкой расчета по формуле (2) и в связи с тем, что при загрузке буфера на 90% возможны потери.

Тем самым, вводя дополнительную границу - значение Q_{max}, предлагается ввести режим работы TCP - режим контроля над перегрузкой. Это позволяет не допускать чрезмерной перегрузки буфера и существенно выравнивает окно перегрузки для различных модификаций протокола TCP, что видно из рис. 3.

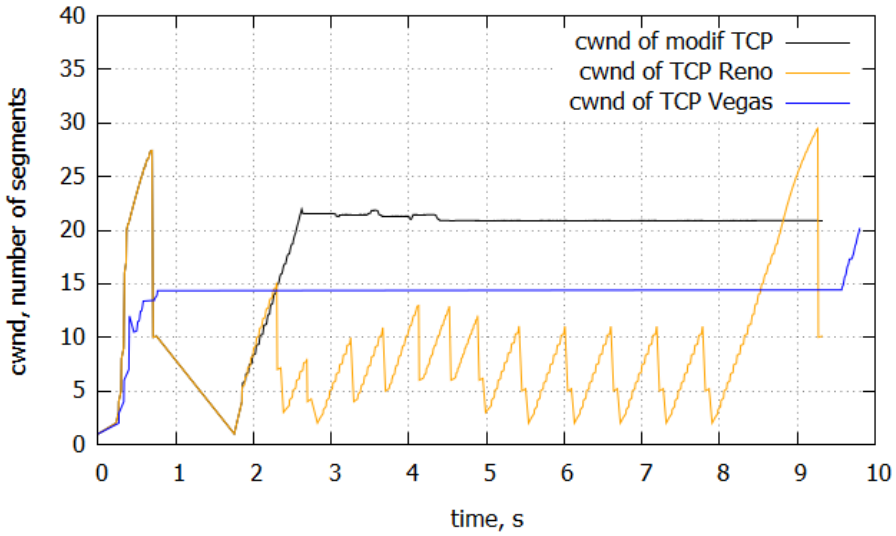


Рис. 3. – Изменение окна перегрузки в процессе передачи данных модифицированного протокола TCP, TCP Vegas и TCP Reno

Таким образом, при моделировании с источниками реализаций TCP Reno сеть постоянно находится либо в состоянии перегрузки, либо в состоянии выхода из нее даже при постоянном количестве соединений. При моделировании с реализацией TCP Vegas параметр cwnd, который влияет на загрузку линии, меняется только при изменении количества установленный соединений. Также следует отметить, что при моделировании с TCP Vegas при использовании модернизированного алгоритма характер обработки потока пакетов носит значительно менее пульсирующий вид, не допускается перегрузка буфера и не было потеряно ни одного пакета.

Библиографический список

1. В.С. Заборовский, В.А. Мулюха, Ю.Е.Подгурский Моделирование и анализ компьютерных сетей: телематический подход. СПбГПУ: Санкт-Петербург, 2010. - 93 с.
2. А.А. Можаев, А.А. Подорожняк, И.В. Ильина, А.А. Коваленко Усовершенствование транспортных протоколов в мультисервисных сетях. Харьков, 2007. - 86-92 с.
3. Материалы сайта: https://tools.ietf.org/html/rfc2018

P.V. Kiryanova, V.S Syuvatkin

MODERNIZATION ALGORITHM FOR CONTROLLING OVERLOADS IN THE ROUTERS

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

The article about the modernization of the TCP protocol. The basis of this modernization is the idea of introducing an additional algorithm for controlling overloads. The article proposes a new experimentally obtained formula for calculating the number of packets in the network hosts buffer. Using this formula, the upgraded protocol allows you to obtain a more uniform packet transfer rate and avoid frequent buffer overloading.

Keywords: TCP protocol, controlling overloads, network hosts buffer, upgraded protocol.

УДК 004.4:536.2

С.А. Кушакова, Ю.С. Егоров

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДБОРА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена разработке информационной системы для автоматизации подбора теплообменного оборудованиянефте- и газоперерабатывающих предприятий. Система позволяет повысить эффективность подбора за счет корректного и достоверного расчета характеристик теплообменного оборудования и сопоставления полученных результатов с базой данной потенциальных поставщиков.

Ключевые слова: теплообменное оборудование; автоматизация; информационная система; программное обеспечение.

В настоящее время практически каждая организация, производящая и поставляющаятеплообменное оборудование, предоставляет свои собственные программныесредвства для его подбора, кроме того, в Интернете существует достаточно большое количество онлайн сервисов, позволяющих рассчитать все необходимые характеристики.

Однакона корректность и достоверность расчетазачастую влияет не столько методика расчета современных теплообменников, сколько результаты конкурентной борьбы между производителями, преследующими в основном коммерческие цели.

В таких условиях, крупные нефте- и газоперерабатывающие предприятия вынуждены подбирать теплообменное оборудование силами собственных специалистов, которые затрачивают значительное количество времени на расчет характеристик оборудования и поиск подходящего поставщика, поэтому автоматизация этого процесса остается актуальной.

Современное теплообменное оборудование классифицируютсяпо [1]:

1) конструкции:
- аппараты, изготовленные из труб (кожухотрубные, «труба в трубе», оросительные, погружные, змеевиковые, воздушного охлаждения);
- аппараты, поверхность теплообмена которых изготовлена из листового материала (пластинчатые, спиральные, сотовые);
- аппараты с поверхностью теплообмена, изготовленной из неметаллических материалов (графита, пластмасс, стекла и др.).

2)назначению:
- холодильники;
- подогреватели;
- испарители;
- конденсаторы.

3) направлению движения теплоносителя:
- прямоточные;
- противоточные;
- перекрестного тока и др.

В нефте- и газоперерабатывающей отраслях наиболее часто используют пластинчатые и кожухотрубныетеплообменники[2].

Для автоматизации расчета и подбора теплообменного оборудования разработана корпоративная информационная система, позволяющая повысить эффективность работы инженеров.

Разработанная информационная система (ИС) обеспечивает:

- обработку входных данных;
- вывод результата пользователю (характеристик теплообменника);
- возможность сохранения результата в текстовом виде;
- поиск подходящего теплообменного оборудования по существующей базе данных производителей.

На рисунке 1 представлена архитектура ИС, которая включает в себя следующие подсистемы:

- авторизации (веб-приложение);
- обработки данных;
- базу данных.

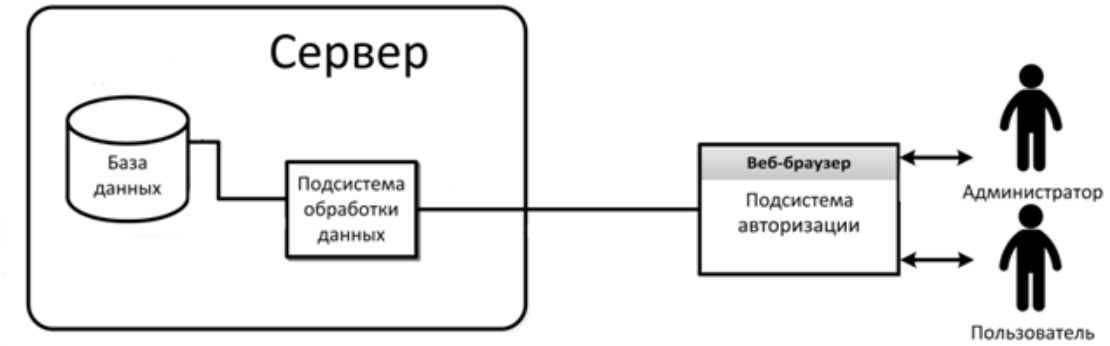


Рис. 1. Архитектура ИС

Подсистема авторизации обеспечивает возможность управления аккаунтами пользователей системы.

Подсистема обработки данных обеспечивает взаимодействие между подсистемой авторизации и базой данных, а так же обеспечивает расчет характеристик теплообменного оборудования.

В базе данных (БД) ИС хранится следующая информация: данные о пользователях ИС; данные о производителях теплообменников; данные о типовых теплообменниках; данные о параметрах теплообменников, используемых в расчетах. Для структурированного доступа и извлечения данных используется СУБД MySQL.

Для работы с ИС предусмотрены две роли: администратор и пользователь.

Администратор осуществляет функции регистрации пользователей, обновления данных в БД, а также технической поддержки. Пользователь (в частном случае – инженер)имеет возможность выполнять следующие действия в ИС:

- ввод в систему данных для расчета теплообменного оборудования;
- расчет необходимых характеристик теплообменного оборудования;
- сохранениеполученного результата в текстовом файле;
- поиск подходящего оборудования по базе данных производителей.

В процессе поискапрограмма учитывает как характеристикитехнологического объекта, так и полученные в результате расчета характеристики теплообменного оборудования, осуществляя подбор из существующего в БД перечня оборудования, ассоциированного со списком производителей.

Для кожухотрубных теплообменников расчет происходит следующим образом.

Пользователем указываются входные данные, по которым производится расчетхарактеристик теплообменника [2]:

- теплонесущиесреды;
- агрегатное состояние сред;
- номинальный массовый расходG1 [кг/ч];
- температура первого потока на входе теплообменника $T1_{вх}$[К];
- температура первого потока на выходе теплообменника $T1_{вых}$[К];
- температура второго потока на входе теплообменника $T2_{вх}$[К];
- температура второго потока на выходе теплообменника $T2_{вых}$[К];
- плотности потоков ρ[кг/м^3];
- вязкости потоков υ [сСт];
- теплоемкость потоков C_p[Дж/кг· К];
- коэффициент термического загрязнения стенок для обоих потоков q[м^2 · ч· град/кДж];
- давление Р[МПа];
- термическое сопротивление стенки с внутренней стороны трубr[м^2 · К/Вт];
- толщина теплового пограничного слояσ[м];
- теплопередающая стенка$r_{ст}$[м^2 · с· град/Дж].

Далее производится предварительный расчет, который необходим для подбора типового теплообменника, для которого будут производиться дальнейшие расчеты. По окончанию предварительного расчета программарассчитывает значение *F*, являющееся площадью поверхности теплообмена, и в соответствии с его значением подбирает подходящее типовое оборудование и на его основе производит следующие расчеты [3]:

- проверочный;
- масса теплообменного оборудования при гидроиспытаниях;
- гидравлический расчет(трубный) для горизонтальных и вертикальных теплообменников;
- гидравлический расчет(межтрубный) для горизонтальных и вертикальных теплообменников.

После получения рассчитанных характеристик, инженер может сохранить их для дальнейшей работы, а так же получить список подходящего оборудования. Программа осуществляет подбор по полученным характеристикам в базе данных поставщиков.

Для пластинчатых теплообменников расчет происходит следующим образом.

В начале работы пользователь указывает начальные параметры, по которым будет осуществляться расчет[2]:

- теплонесущие среды;
- агрегатное состояние сред;
- температура первого потока на входе теплообменника$T1_{вх}$[°С];
- температура первого потока на выходе теплообменника$T1_{вых}$[°С];
- температура второго потока на входе теплообменника$T2_{вх}$[°С];
- температура второго потока на выходе теплообменника$T2_{вых}$[°С];
- тип пластины;
- давление на входе Р1 [МПа];
- давление на выходе Р2 [МПа];
- плотности потоков ρ[кг/м^3];
- вязкости потоков υ[м/с];
- теплоемкость потоков C_p[Дж/кг· К];

- коэффициент термического загрязнения стенок для обоих потоков q[м^2 · ч· град/кДж];
- поверхность теплопередачи одной пластины F1[м^2];
- эквивалентный диаметр межпластинного каналаdэ[мм];
- площадь поперечного сечения одного канала f[м2];
- длина канала, приведеннаяLn[м];
- диаметр углового отверстияDy[мм];
- толщина пластины$\delta_{ст}$[мм];
- площадь проходного сечения штуцераDшт[мм];
- коэффициент теплопроводности материалаλ[Вт/м · град].

На основе полученных данных программа производиттепловой, гидравлический и компоновочный расчеты.

В соответствии с типом пластины программа выбирает ее габаритные размеры из базы данных типового оборудования[3].

После получения характеристик пользователь может сохранить их для дальнейшей работы с ними.Программа такжеосуществляет подбор подходящего по характеристикам теплообменника с использованиемБД поставщиков.

На рисунке 2 представлен интерфейс пользователя ИС.

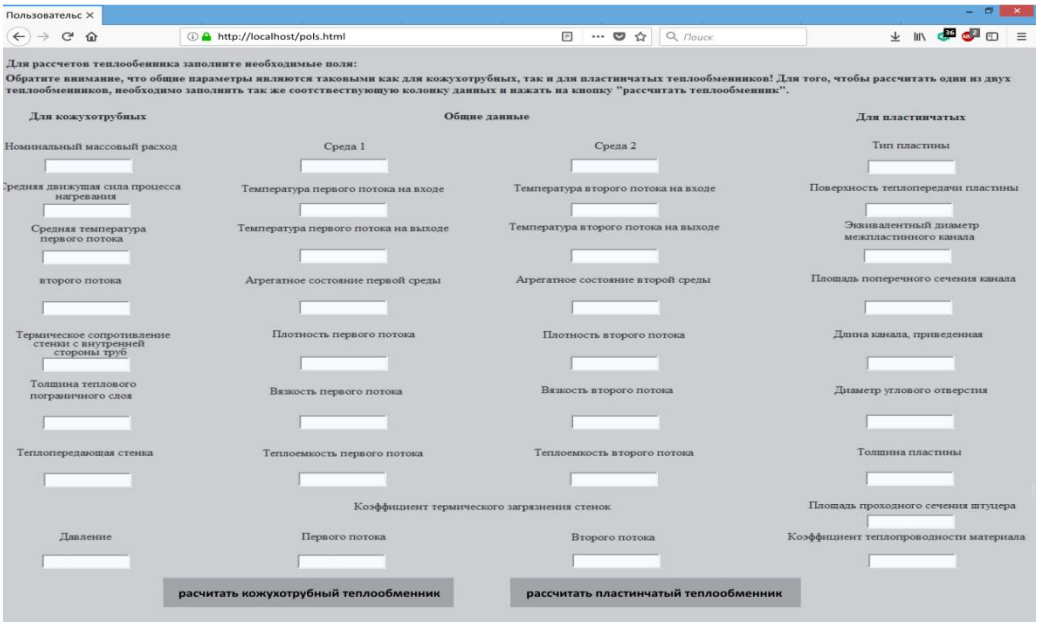


Рис. 2. Интерфейс пользователя ИС

Для инженерной реализации ИС был выбран язык программирования C# и среда разработки MSVisualStudio 2015. Преимуществами при этом является возможность работы на языке C# cСУБД MySQL за счет библиотеки ADO (ActiveXDataObjects) .NET, а также поддержка различных стилей[4].

Разработанная информационная системапозволяет повысить эффективность подбора теплообменного оборудованияза счет корректного и достоверного расчета требуемых характеристик, а также сопоставления полученных результатов с БД оборудования потенциальных поставщиков.

Библиографический список

1. Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М. Основы гидравлики и теплотехники: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2014. – 348 с.
2. Таранова Л.В. Теплообменные аппараты и методы их расчета: учебное пособие. – ТюмГНГУ, 2009. – 152 с.
3. Бажан П.И. и др.Справочник по теплообменным аппаратам. 1989. – 362 с.
4. ЛогановС.В.Разработка Web-приложений на основе ASP.NET: учебное пособие. – Н. Новгород: НГТУ,2014.–109с.

S.A.Kushakova, Y.S. Yegorov

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION SYSTEM FOR THE SELECTION OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENTT

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

The work is devoted to the development of an information system for the automation of the selection of heat exchange equipment for oil and gas processing enterprises. The system allows to increase the efficiency of selection due to correct and reliable calculation of the characteristics of the heat exchange equipment and comparison of the results obtained with the base of this potential suppliers.

Keywords: heat-exchange equipment; automation; information system; software.

УДК 004.75

В.В. Евсеева, Е.Н. Мащенко

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Севастопольский государственный университет

Приведено обоснование использования беспроводных сенсорных сетей в системах обработки информации. Описаны основные аспекты управления данными в беспроводных сенсорных сетях. Предложена архитектура системы обработки информации, использующая сенсорную сеть для сбора, передачи и предварительной обработки данных.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть (БСС), система обработки информации, потоки данных, сенсорные узлы.

Введение

Системы обработки информации - это актуальная на сегодняшний день область исследований. Наиболее значимыми в этой области являются системы распределенной обработки данных, которые обычно имеют дело с большими объемами данных. Хранение и выполнение автономной обработки для таких данных может быть дорогостоящим и длительным по времени, что нежелательно для большинства приложений критической инфраструктуры. Потоки данных используются в различных типах приложений реального времени (или близких к реальному) и генерируются такими объектами как, например, сенсорные сети, IP-сети, финансовые рынки, денежные операции, новостные ленты и др.

Сенсорные сети играют важную роль в этой области. Возможность мониторинга физических параметров окружающей среды и предоставление таких услуг, как раннее предупреждение и быстрый анализ рисков позволяет создавать новые архитектуры систем обработки информации и, соответственно, методы ее обработки. Зачастую, основная цель применения сенсорных сетей — контроль состояния объекта в процессе его эксплуатации. Критические компоненты объекта могут быть снабжены беспроводной системой сбора данных и диагностическими инструментами для анализа и принятия решений[1].

Подходы, основанные на доступности полной истории изменения данных, не могут удовлетворять требованию минимизации времени обнаружения события. Это критично для таких приложений, как сеть пожарной сигнализации, развернутая в здании или система предупреждения о лавинахна горнолыжном курорте и т.д.В этих приложениях результат зависит напрямую от времени обработки данных. Технологии распределенных вычислений, такие как внутрисетевая обработка данных и размещение операторов, используются для эффективного уменьшении яз агрузки данных на узле путем первичной обработки на источнике данных или путем распределения нагрузки между несколькими узлами. Обработка данных внутри сетио ткрывает отличную возможность для увеличения производительности системы.

Управление данными в беспроводных сенсорных сетях

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой инфраструктуру, которая состоит из сенсорных (измерительных), вычислительных и коммуникационных элементов и предоставляет администратору (наблюдателю) возможность наблюдать и реагировать на события и явления в определенной среде [2].

Моты (сенсорные узлы), являющиеся основными составляющими беспроводной сенсорной сети, могут включать в себя камеры, микрофоны, датчики, способные определять уровень влажности, шума, вибрации и т.д. Хотя диапазон чувствительности отдельного датчика ограничен, беспроводные сенсорные сети могут охватывать большое пространство, путем получения данных от множества узлов, предоставляя разнообразную и точную информацию об окружающей среде.

Беспроводные сенсорные сети могут быть использованы для внутрисетевой обработки,где обнаруженные данные могут собираться в пакеты и трансформироватьсяи более абстрактные и агрегированные данные высокого уровня для дальнейшей передачи и обработки.

При традиционном подходе к управлению данными в сенсорных сетях широко используется метод доступа на основе запросов. Данная технология управления состоит в агрегации и хранении данных и запросов к данным.Существуют три основных способа хранения данных:

Централизованное хранение. Данные, собранные узлами, передаются на базовую станцию для хранения, доступа и обработки.

Распределенное хранение и индексирование. Данные распределены в сети и проиндексированы для построения эффективных запросов.

Локальное хранение. Данные хранятся в сенсорном узле.

Современными решениями для управления данными в сенсорных сетях являются TinyDB и Cougar. Эти методы обрабатывают сенсорные данные с использованием таблицы отношений и SLQ-подобными запросов. TinyDB фокусируется на системах нижнего уровня и оптимизации, в то время как Cougar- на эффективном механизме коммуникации и оптимизации энергопотребления, а также внутренней обработки сетевых запросов.

Данные, поступающие от сенсорных узлов, имеют следующие свойства:

Данные сенсорных узлов гетерогенны, так как типы и функции датчиков разнообразны. Датчики температуры и влажности и датчики освещенности являются основными в сельскохозяйственных и логистических приложениях, в то время как датчики крови контролируют кровяное давление, пульс и другие показатели тела. Кроме того, протоколы, используемые устройствами, имеют большое разнообразие, благодаря чему данные от различных датчиков представлены разнородными форматами.

Данные сенсорных узлов являются избыточными. Окружающая среда или человек, как объекты мониторинга узлов, могут быть стабильными в течение небольшого промежутка времени. Например, в обычных условиях, температура воздуха в комнате может оставаться без изменений или изменяться незначительно в течение 5 минут. Поскольку период сбора данных сенсорами измеряется секундами, база данных будет иметь высокую нагрузку и, соответственно, низкую производительность при сохранении всех этих данных.

Данные сенсорных узлов поступают в режиме реального времени. Данные с датчиков собираются в определенные промежутки времени, что является положительным фактором для их использования в критических инфраструктурах. Например, как только возникает аномальная ситуация, ее своевременное обнаружение может помочь операторам принять своевременные решения и прибегнуть к адекватным мерам для уменьшения потерь.

Поточность данных сенсорных узлов. Поскольку затраты на производство датчиков снижаются, увеличивается размерность современных сенсорных сетей.Между тем, сенсорные узлы способны на сбор данных за считанные секунды, что, следовательно, увеличивает объем сгенерированных данных.

Чтобы увеличить эффективность использования сенсорных узлов, системы обработки информации должны учитывать эти особенности.

Распределенный характер беспроводных сенсорных сетей вводит различные возможности для совместной обработки сигналов, которые потенциально могут привести к значительному повышению производительности.

Благодаря мониторингу, обработке сигналов и коммуникационным функциям, беспроводные сенсорные сети позволяют обрабатывать информацию на разных уровнях абстракции. Согласно концепции иерархической обработки информации в сенсорных сетях, БСС состоит из трех различных уровней: сенсорный узел, локальное и глобальное окружения. Любые события в окружении могут обрабатываться на этих трех уровнях. На уровне узла сбор и обработка данных происходят в каждом отдельном устройстве, не требуя связи, кроме случаев передачи результатов на какой-либо удаленный информационный приемник. На

локальном и глобальном уровнях связь между узлами требуется для сбора необработанных или предварительно обработанных данных из нескольких узлов в единое место для совместной обработки сигналов.

Архитектура системы

Чтобы измерять параметры окружающей среды в реальном времени и осуществлять своевременное принятие решений, а также иметь обратную связь с физическим миром в соответствии с информацией об окружающей среде, необходима параллельная обработка информации. Этот способ обработки позволяет качественно и в срок проводить обработку крупномасштабных сенсорных данных,

В данной статье предлагается архитектура системы обработки информации с поддержкой облачного интерфейса системы хранения и обработки данных. С точки зрения сервисных вычислений, облачный сервис выступает в качестве удаленного и вспомогательного помощника для БСС, что может принести определенные преимущества.

Основной целью предлагаемой гибридной архитектуры является создание платформы для управления и хранения сенсорных данных, которая использует мощные технологии облачных вычислений для обеспечения масштабируемости данных, быструю визуализацию и пользовательский анализ. Платформа предназначена для поддержки долгосрочного развертывания сети беспроводных узлов через простой API управления данными. Подробная системная архитектура показана на рисунке 1. На этом рисунке представлены три объекта гибридной архитектуры БСС: БСС, облачный data-центр и пользователь. Это общая архитектура взаимосвязи нескольких БСС через Интернет. Серверные узлы, расположенные по краям пунктирных линий, являются шлюзами, которые получают данные от узлов-приемников данных.

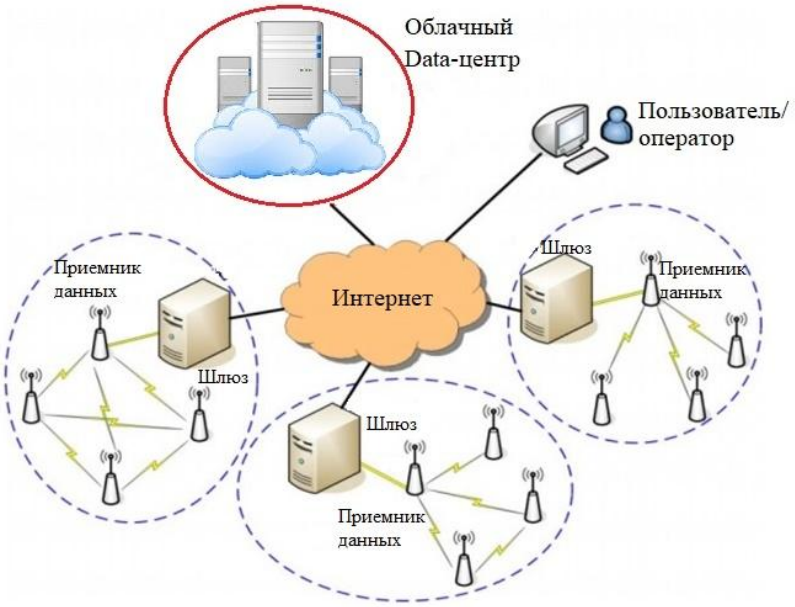


Рис. 1. Системная архитектура взаимосвязи между БСС и облачным Data-центром

В предлагаемой системе одни маршрутизаторы имеют прямую связь со шлюзом, в то время как другие вынуждены передавать данные по более длинному маршруту. Данный подход позволяет использовать всего один шлюз, однако он же увеличивает нагрузку на другие маршрутизаторы, которые, соответственно, будут выходить из строя раньше других. Однако, наращивая количество маршрутизаторов и эффективно распределяя нагрузку между ними, можно увеличить время работы сети и уменьшить потери сенсорных данных.

Данную архитектуру сети можно отнести к гибридному типу по той причине, что часть узлов образует ячеистую сеть, а часть – кластерную топологию.

Большой объем собираемых сенсорными узлами данных может обрабатываться, анализироваться и храниться с использованием облачного вычислительного сервиса и службы хранения данных. В предлагаемой архитектуре сенсорные данные могут быть эффективно разделены различными пользователями и приложениями при помощи использования гибких сценариев. Каждый пользователь может получить доступ к подмножеству сенсорных узлов, запустить конкретное приложение и выполнить поиск желаемых сенсорных данных, например, через веб-интерфейс.

Система сбора и обработки информации с предлагаемой архитектурой имеет следующие функции:

- Сбор и предварительная обработка данных;
- Связь с высокопроизводительным центром обработки данных;
- Распределенное хранение большого объема сенсорных данных;
- Параллельная обработка крупномасштабных сенсорных данных;
- Оценка эффективности обработки сенсорных данных.

Выводы

Данная статья предлагает систему обработки сенсорных данных БСС с использованием облачных вычислений. Высокая производительностьdata-центра позволяет хранить и обрабатывать данные, собранные с датчиков. В статье также предлагается гибридная архитектура БСС. Эта архитектура позволяет собирать, обрабатывать, совместно использовать и выполнять поиск большого количества сенсорных данных.

Наиболее важными преимуществами, позволяющими использовать беспроводные сенсорные сети для сбора и обработки информации, являются:

— Отсутствие или минимальное количество кабелей;
— Маленький форм-фактор;
— Надежность системы в целом;
— Масштабируемость;
— Легкость самоорганизации.

Библиографический список

1. Mainwaring A., Polastre J., Szewcyk R., Culler D. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2002. P. 88–97.
2. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless Sensor Network, Technology, Protocols and Applications. John Wiley & Sons, New Jersey, 2007. P. 1-2.
3. Мозговая В.В., Мащенко Е.Н. Анализ проблем практической реализации беспроводных сенсорных сетей // Мир компьютерных технологий: Сборник статей студенческой научно-технической конференции. - Севастополь: М-во образования и науки РФ, Севастопольский государственный университет, 2017. - С. 106.

V.V. Evseeva, E.N. Mashchenko

EFFICIENCY ANALYSIS OF WSN APPLICATION IN THE DATA PROCESSINGSYSTEMS

The University of Sevastopol

The article presents the substantiation of the use of wireless sensor network(WSN) in data processing systems. The main aspects of data management in wireless sensor networks are described. The architecture of a information processing system using a sensor network for data collection, transmission and preliminary processing is proposed.

Key words: wireless sensor network (WSN), data processing system, data flow, sensor node.

УДК 004.82:007.3

П.О. Попова, Ю.Е. Уткина, Ю.С. Егоров

КИБЕРПРОСТРАНСТВО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе киберпространство образовательной деятельности рассматривается, с одной стороны, как часть традиционной образовательной системы, а, с другой стороны, как самостоятельная информационно-образовательная среда, направленная на развитие, в первую очередь, активной творческой деятельности обучающихся с применением новых информационных технологий.

Ключевые слова: образовательная деятельность; виртуальная реальность; киберпространство; вуз; информационно-образовательная среда.

Форма и содержание современного образования меняется, уже сейчас его качественно можно охарактеризовать как информационное [2]. Изменения происходят как за счет развития информационной культуры, мировоззрения, информационной этики субъектов, соответствующих требованиям общества и образования, так и за счет расширения информационно-образовательной среды (ИОС), которая реализуется в информационных и коммуникационных технологиях, информационно-образовательных, электронных ресурсах, а также включает в свой состав информационно-компьютерное обучение, передовые информационные системы, технологии и ресурсы, составляющие базу информационной сферы [1].

В высшей школе ИОС обозначает новую сущность интеграции образовательной и информационной сред и имеет ряд устоявшихся трактовок, достаточно полно описывающих назначение ИОС: во-первых, ИОС – системно организованная совокупность информационного, технического и учебно-методического обеспечения, которая неразрывно связана с человеком как субъектом образовательного пространства; во-вторых, ИОС – это единое информационно-образовательное пространство, построенное с помощью интеграции информации на традиционных и электронных носителях, компьютерно-телекоммуникационных технологиях взаимодействия, включающее в себя виртуальные библиотеки, распределенные базы данных, учебно-методические комплексы и расширенный аппарат дидактики; в-третьих, ИОС – это совокупность взаимосвязанных подсистем, целенаправлен-но обеспечивающих педагогический процесс (например, информационная, техническая, дидактическая, методическая) и др. Во всех приведенных определениях акцент делается на информационном характере среды, поскольку информационно-знаниевые потоки составляют основу взаимодействия системы «человек-компьютер».

Однако под влиянием всеобщей информатизации информационная компетентность субъекта дополняется его медиакомпетенцией, информационная культура – медиакультурой.

Образование также переходит в новую форму, состояние медиаобразования, целью которого является формирование медиакомпетенции и медиакультуры субъектов и образование с опорой на них и ИОС [2].

Современный информационный мир получает представление в электронном, виртуальном мире, в котором в цифровой форме выражаются идеи, знания, сведения, взаимосвязи и отношения. Хоть это и абстрактная модель реального мира, но она тоже реальноа, т.к. здесь виртуальной является только форма, а содержание сохраняется, но и приобретает определенную специфику. Таким образом, системным электронно-виртуальным представлением информационного пространства становится киберпространство [2].

Киберпространство – это относительно новый термин, характеризующий информационные технологии. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе сложился ряд направлений его толкования применительно к международному праву,

критическим информационным инфраструктурам, информационно-коммуникационным технологиям и компьютерным сетям.

В одном из определений под киберпространством (cyberspace) понимается электронная среда в (посредством) которой информация создаётся, передаётся, принимается, хранится, обрабатывается и уничтожается.

Предложенному определению не противоречит еще одна трактовка «киберпространства» как конечной среды, основой которой являются современные компьютерные технологии, предназначенные для создания или имитации виртуальной реальности.

В свою очередь, под термином «виртуальная реальность» в настоящее время чаще всего понимается созданный программно-аппаратными средствами мир (объекты и субъекты), передаваемый человеку через его ощущения: зрение, слух, обоняние, осязание и другие.

При этом виртуальные миры не просто воспроизводят реальность, но преобразуют ее за счет интерактивного изменения существующих свойств: изменчивости формы, размера, соотношения части и целого, движения между различными уровнями структуры и т.п., выводя представления человека за рамки повседневного опыта. Для создания убедительного комплекса ощущений реальности компьютерный синтез свойств и реакций виртуальной реальности производится в реальном времени.

Таким образам, киберпространство – продукт и средство информатизации, обеспечивающее оптимальное взаимодействие с электронным виртуальным миром; его абстрактное представление с упорядоченным множеством измерений, позволяющих осуществлять моделирование и алгоритмизацию пути в любом возможном направлении. Это реляционная модель электронного виртуального мира, признаки которой рассматриваются как пространственные измерения с расширяющимися множествами значений [2].

Поскольку киберпространство постоянно дополняется и расширяется, включая в свою орбиту новые сферы деятельности человека, увеличивая при этом его интеллектуальные и эмоциональные ресурсы, познавательные, творческие и коммуникативные возможности, а созданная искусственная (виртуальная) реальность позволяет наблюдать происходящие в ней изменения, проверять гипотезы и ставить эксперименты, то можно говорить о прикладном значении этого термина в образовательной деятельности.

Современные образовательные процессы должны включать в обучение широкий спектр возможностей информационных технологий, обеспечивать развитие способов обработки и представления знаний посредством киберпространства, как виртуальной среды, созданной на базе высокотехнологических средств информатизации, т.е. киберпространство вуза при этом, по сути, и будет являться «информационно-образовательной средой».

В связи с этим, необходимо рассмотрение киберпространства вуза, с одной стороны, как части традиционной образовательной системы, а, с другой стороны, как самостоятельной системы, направленной на развитие активной творческой деятельности учащихся с применением новых информационных технологий.

На рисунке 1 представлена семантическая сеть киберпространства вуза [3].

Дидактика применения информационных технологий в образовательной системе исходит из того, что наличие преподавателя в системе обучения является обязательным и его основная функция состоит не просто в передаче информации, а в управлении процессом обучения.

Использование киберпространства вуза в процессе обучения должно строиться на определенной дидактической концепции, которая определяет отбор содержания, методов, организационных форм и средств обучения для достижения педагогических целей [3].

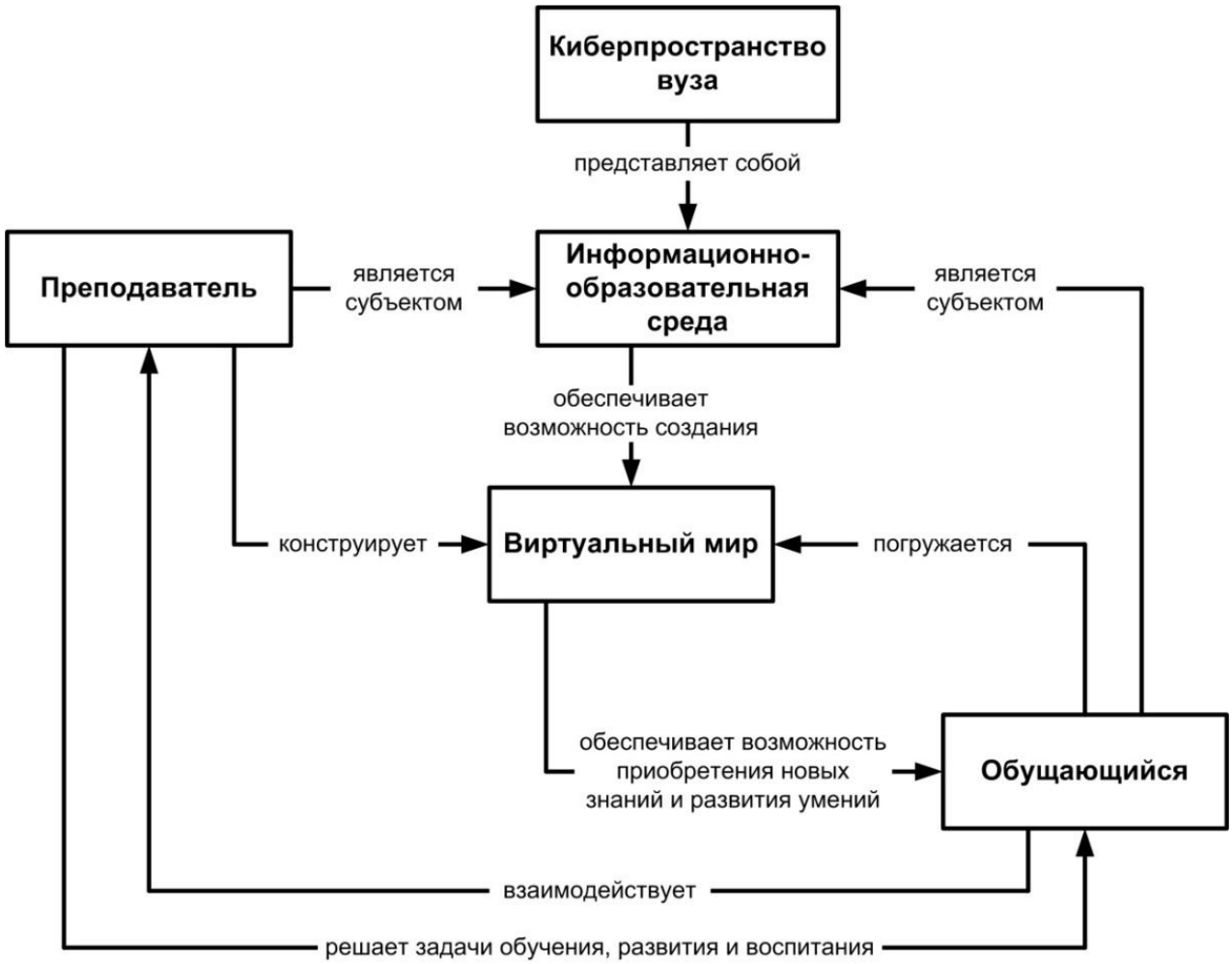


Рис. 1. Семантическая сеть киберпространства вуза

В качестве достигаемых таким образом педагогических целей можно рассматривать:

- приобретение определенной суммы знаний в рамках специальности или направления подготовки;
- развитие навыков самостоятельной познавательной деятельности;
- развитие навыков и умений работы с информацией, овладение способами познавательной и творческой деятельности, которые можно применять в дальнейшем при переподготовке или смене профессиональной деятельности;
- формирование социальных качеств.

Достижение педагогических целей в работе обеспечивается за счет дидактических функций, закладываемых в киберпространство, например, формирование навыков исследовательской деятельности путем моделирования научной работы в виртуальной реальности [3].

Реализация дидактических функций обеспечивается за счет применения при построении киберпространства современных информационных технологий, обладающих следующими дидактическими свойствами, в первую очередь, к которым относятся:

- возможность хранения, переработки и передачи информации любого вида (визуальной и звуковой, статичной и динамичной, текстовой и графической);
- возможность доступа к различным источникам информации;
- возможность использования для решения задач современного программного обеспечения, как учебного, так и профессионального наукоемкого назначения.

Фундамент образовательного киберпространства составляют многофункциональные электронные образовательные ресурсы (созданные, в том числе, с использованием технологий дополненной и виртуальной реальностей), поэтому оно является медиапространством и гиперпространством [2].

Поскольку киберпространство создано человеком и предполагает наличие продуктивного диалога с ним, то оно является пространством взаимодействия систем естественного интеллекта (человека) и искусственного интеллекта (киберсистем). Следовательно, образовательное киберпространство следует рассматривать в контексте познавательного взаимодействия субъектов образования с ним и через его посредство, т.е., в контексте внутренних и внешних отношений киберпространства, его содержания, состояния, социальных норм, требований, условий [2].

Субъектами образовательного киберпространства являются не только непосредственные участники образовательного процесса (обучающиеся и преподаватели), но и все создатели, разработчики киберресурсов, кибертехнологий, киберсистем. Именно эти субъекты образования определяют (прямо и косвенно) характер и специфику взаимодействия с образовательным киберпространством в соответствии с различными своими особенностями (психологическими, возрастными, мотивационными и др.), целями, потребностями [2].

Ресурсы образовательного киберпространства только тогда будут иметь ценность для субъекта образования, когда он сможет адаптироваться в нём и воспринять эти ресурсы в соответствии со своими личными информационно-познавательными интересами и задачами предметного обучения. То есть, медиакомпетентность субъекта предполагает знание им инвариантной структуры образовательного киберпространства, умение эффективного, рационального, правомерного и безопасного поиска его киберресурсов, умение конструктивного диалога и продуктивной работы с ними. Следовательно, оно является образовательным не только по своему содержанию, но и по адекватному отражению в содержании образования и по востребованности в нём, по наличию методики продуктивного взаимодействия с ним и реализации соответствующих педагогических технологий [2].

Применение киберпространства открывает широкие перспективы для визуализации и интерактивности учебного процесса. Конструирование виртуальных миров позволит увеличить скорость передачи информации обучаемому, повысить уровень ее понимания и степень усвоения. Виртуализацию в концепции информационно-образовательной среды выраженной через киберпространство следует понимать не только как насыщенность учебных материалов высококачественными цветными иллюстрациями, но и как полное погружение обучаемого, с помощью специальных технических средств, в виртуальный мир, сконструированный преподавателем или иными субъектами образовательного киберпространства, с целью получения новых знаний и развития практических умений и навыков.

Библиографический список

1. Коротенков Ю.Г. Информационная образовательная среда основной школы // Электронный ресурс. 2011 – Режим доступа: http:/www/academy.it.ru.
2. Коротенков Ю.Г. Киберпространство в аспекте обучения и социализации субъектов образования // Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития вертикальной интеграции системы образования, науки и бизнеса: экономические, правовые и социальные аспекты». Воронеж: Воронежский ЦНТИ-филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России. 2014. С. 217-222.
3. Егоров Ю.С., Попова П.О., Васильева Л.А. Перспективы применения киберпространства в образовательной деятельности // Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Инновационные технологии в образовательной деятельности». Н. Новгород: НГТУ, 2018. С. 66-69.

P.O. Popova, Y.E. Utkina, Y.S. Yegorov

CYBERSPACE OF EDUCATION

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

The article deals with the concept of cyberspace as part of the traditional educational system and as an independent educational environment. The purpose of the cyberspace of education is to develop the creative activity of students.

Keywords: education; a virtual reality; cyberspace; university; information and educational environment.

УДК 623.618.5

М.Ю. Пресняков, М.А. Стафеев

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ПОЛЕТОВ АВИАЦИОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ

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

В статье показаны особенности построения автоматизированной системы управления связью и радиотехническим обеспечением полетов в авиационных формированиях. Предлагаются подходы и принципы ее развертывания и применения.

Ключевые слова: система управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования, автоматизированная система управления, безопасность полетов.

Качество управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования непрерывно связано с добыванием и оценкой информации. В существующей системе управления связью и радиотехническим обеспечением уровень использования средств автоматизации не в полной мере отвечает современным требованиям. Сбор и обработка информации от подчиненных на пунктах управления связью и радиотехническим обеспечением зачастую осуществляется с бумажных или электронных носителей, информация переносится в неавтоматизированном режиме, анализ и моделирование развития обстановки по связи и радиотехническому обеспечению, информационная поддержка принятия решений должностными лицами не осуществляется, что приводит к потере времени при выполнении поставленных задач. Отсутствие специализированных программно-аппаратных комплексов должностных лиц органов управления связью и радиотехническим обеспечением в значительной мере снижает оперативность управления.

В условиях дефицита времени снижение эффективности управления частями и подразделениями связи, радиотехнического обеспечения и автоматизированных систем управления (РТО и АСУ) недопустимо, а выполнение требований по оперативности управления является первостепенной задачей органов управления.

Таким образом, актуальным является исследование по вопросам совершенствования системы управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования.

С целью поддержания требуемого баланса времени необходимо знать обстановку, принимать решения и ставить задачи в реальном масштабе времени.

В общем случае автоматизированная система управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования представляет собой взаимоувязанную по целям, решаемым задачам и времени функционирования совокупность органов управления связью и радиотехническим обеспечением, пунктов управления связью и радиотехническим обеспечением, и технической основы системы управления связью и радиотехническим обеспечением, имеющей аппаратно-программную реализацию, средства автоматизации управления которой обеспечивают автоматизированное управление системой связи и радиотехнического обеспечения в различных условиях обстановки.

Автоматизированная система управления связью и радиотехническим обеспечением являясь основным инструментом многоуровневой поддержки принятия решений должностных лиц управления связью, для обеспечения планирования, подготовки к применению по назначению, применения и восстановления системы связи и радиотехнического обеспечения, и боеспособности сил и средств, а также боевого применения подразделений связи и РТО с выполнением требований к устойчивости, непрерывности, оперативности и скрытности, должна реализовывать следующие виды (уровни) управления связью: организационное, оперативно-техническое и технологическое [1].

На уровне организационного управления должны реализовываться целевые задачи функционирования системы связи путём планирования связи, управления построением системы связи и боевым применением подразделений связи и РТО. При этом задачи автоматизированного управления связью на организационном уровне должны решаться на основе применения комплексов средств автоматизации управления связью и РТО, общего программного обеспечения, специального программного обеспечения организационного управления и элементов информационного обеспечения — баз данных организационного управления, реализованных на основе современных средств прикладной среды систем поддержки принятия решений (СППР). Для непосредственного решения задач организационного управления связью и РТО на организационном уровне управления должны выделяться следующие основные логические подсистемы:

подсистема учёта данных обстановки по связи и РТО;

подсистема моделирования функционирования сетей связи;

подсистема планирования связи и РТО;

подсистема планирования применения элементов системы связи (узлов, центров, линий, сетей, системы технического обеспечения связи и РТО, резерва сил и средств связи и автоматизации);

подсистема оперативного управления связью;

подсистема всестороннего обеспечения функционирования системы связи и РТО.

На уровне оперативно-технического управления должны решаться задачи по управлению сетями и услугами связи во взаимодействии с подсистемами организационного и технологического управления.

Для решения задач оперативно-технического управления связью на соответствующем уровне управления должны функционировать следующие основные логические подсистемы:

подсистема управление качеством предоставления видов и услуг связи;

подсистема контроля состояния и изменение структуры сетей связи. Основу технической реализации данного уровня должен составлять комплекс средств автоматизации оперативно-технического управления сетями связи, включающий:

автоматизированные рабочие места должностных лиц, объединённые локальной вычислительной сетью с серверами приложений, и базы данных;

программное и информационное обеспечение, обеспечивающее автоматизированное решение задач оперативно-технического управления.

На уровне технологического управления должна решаться задача контроля и изменения технического состояния средств связи (сетевых элементов) сетей связи путем создания соответствующей подсистемы. Технологическое управление связью осуществляется с использованием возможностей современных средств связи и РТО воспринимать поступающие из автоматизированной системы управления связью и радиотехническим обеспечением (АСУС и РТО) управляющие команды и сигналы, изменять под их воздействием своё состояние, а также представлять в АСУС Вооруженных Сил Российской Федерации информацию о своем состоянии.

Система поддержки и принятия решения должностных лиц представляет собой интерактивную автоматизированную систему, которая облегчает использование данных и моделей для идентификации, решения поставленных задач и принятия решений.

Особый интерес к использованию системы поддержки принятия решений должностных лиц органа управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования связан с комплексным подходом использования информации (данных). Разработка и внедрение такой системы позволит значительно оптимизировать процессы связанные с прогнозированием, отслеживанием текущих состояний и показателей эффективности функционирования системы связи и радиотехнического обеспечения авиационного формирования.

Задачи решаемые с помощью СППР можно подразделить на:

задачи для которых характерна возможность объективной оценки результата решения или хотя бы сравнительной оценки двух решений;

задачи, для которых такая объективная оценка результатов решения отсутствует, и ее заменяют экспертные оценки людей [2].

В современных СППР нашли широкое применение методы интеллектуального анализа данных которые представляют собой методы обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретаций знаний, необходимых для принятия решений должностных лиц органов управления связью и радиотехническим обеспечением авиационных формирований.

Возможна программная реализация СППР, поддерживающих, прежде всего, выполнение функций организационного уровня управления автоматизированной системы управления связью. При создании таких СППР целесообразно использование сочетание методов виртуализации вычислительных ресурсов с логической изоляцией вычислительных процессов, реализующих информационно-технологическую концепцию облачных вычислений. При этом в общем случае перспективные СППР могут сочетать методы информационного поиска, интеллектуального анализа данных, поиска знаний в базах данных, рассуждений на основе прецедентов, имитационного моделирования, генетических алгоритмов, нейронных сетей и др. в зависимости от конкретных задач, и строиться на основе технологии аналитической обработки информации в реальном времени и вариантов ее реализации [2].

При реализация автоматизации системы управления связью и радиотехническим обеспечением авиационного формирования (АСУС и РТО) должны учитываться следующие основные принципы:

принцип соответствия организационно-технической структуры АСУС и РТО организационно-технической структуре системы связи и РТО.

централизованное управление с возможностью децентрализации функций управления системой связи и её элементами;

принцип обеспечения опережающей готовности ресурсов АСУС и РТО по отношению к другим составляющим многоуровневой системы управления связью, что обеспечивает выполнение оперативно-технических требований к связи и РТО;

принцип единства научно-технической политики и системотехнических решений (в том числе использование единой системы стандартов по техническому, информационному и программному обеспечению) при создании унифицированных средств автоматизации для всех звеньев и уровней АСУС и РТО;

принцип сопряжения с системами управления взаимодействующих сетей и систем связи единой сети электросвязи [3].

Особенностями построения автоматизированных систем управления связью и радиотехническим обеспечением авиационных формирований является необходимость решения ряда задач, связанных с организацией радиотехнического обеспечения полетов авиации, а также, организации авиационной радиосвязи. При создании автоматизированной системы управления связью и РТО целесообразно предусмотреть ее информационное взаимодействие с Единой информационно-аналитической системой безопасности полетов.

Связь и радиотехническое обеспечение оказывает существенное влияние на безопасность полетов. Положительные результаты профилактической работы в подразделениях связи и РТО по обеспечению безопасности полетов достигаются главным образом за счет качественного выполнения всего комплекса предупредительных мероприятий на всех объектах связи и РТО. В связи с этим актуальным является проведение исследований направленных на разработку методик оценки обеспечения безопасности полетов прежде всего в организационном и техническом аспектах построения системы связи и РТО авиационного формирования.

Органы управления связью и РТО всех звеньев управления должны проводить комплекс мероприятий направленных на предотвращение авиационных происшествий по вине связи и РТО

полетов. В основе этих мероприятий лежит анализ состояния систем связи и РТО полетов авиационных формирований, при этом зачастую возникает задача обработки и сопоставления объективных показателей качества системы связи и РТО полетов авиационного формирования и субъективных требований к качеству обеспечению безопасности полетов.

Применение системы поддержки принятия решений должностных лиц органа управления связью и радиотехническим обеспечением позволит поднять на новый уровень качество и сроки выполнения поставленных задач, а также производить передачу (прием) команд и распоряжений в режиме реального времени, отображение всей необходимой графической и текстовой информации о состоянии подчиненных подразделений связи, решение расчетных задач по наиболее эффективному применению средств связи и радиотехнического обеспечения в ходе выполнения боевых задач, а также контроль над состоянием системы (средств) связи и радиотехнического обеспечения в реальном масштабе времени.

Таким образом, внедрение перспективных цифровых средств связи и автоматизации управления, а также создание на их основе систем поддержки принятия решений позволит значительно сократить время на принятие решения, повысить оперативность управления, что позволит в любых условиях обстановки обеспечить упреждающую готовность системы связи и радиотехнического обеспечения относительно готовности пунктов управления авиационного формирования. Орган управления связью и РТО должен иметь в своем распоряжении систему управления, реализующую функции организационного, оперативно-технического и технологического управления. Экспертная система – как составляющая АСУ связью и РТО должна отражать все важные аспекты взаимодействия системы связи и РТО, как «поставщика» услуг связи и РТО и потребителей услуг, а эффект применения системы управления связью и РТО должен быть адекватен затратам на ее внедрение.

Библиографический список

1. Арсланов Х.А. и др. Автоматизированная система управления связью Вооруженных Сил Российской Федерации и приоритетные направления ее развития // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации, 2016. С. 17–20.

2. Трахтенгерц Э.А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления. 2003, № 1. С. 13–28.

3. Боговик А.В., Загорулько С.С., Ковалев И.С., Котенко И.В., Масоновец В.В. Теория управления в системах военного назначения. М.:МО, 2001. 320 с.

M.A. Stafeev, M.Y. Presnyakov

INFORMATION SUPPORT OF THE COMMUNICATION MANAGEMENT SISTEM AND RADIO TECHNICAL SUPPORT OF AVIATION FORMATION FLIGHTS

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

The article shows features of scheme of automated management system and radio technical support of aviation formation flights. Approaches and principles of its development and application are proposed.

Keywords: communication, management system, automated management, radio technical support of aviation formation, flights information support of the, flights safety.

УДК 796:004.946

Ю.С. Егоров, М.А. Санин, Д.А. Чупров

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЕЙ В КИБЕРСПОРТЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «Кибернетика»

В работе описывается возможность использования технологий виртуальной и дополненной реальностей при подготовке и проведении киберспортивных мероприятий. Киберспорт признан официальным видом спорта в России, что требует внедрения современных информационных технологий в процессы трансляций киберсоревнований, обучения киберспортсменов и проведения тренировок.

Ключевые слова: киберспорт; информационные технологии; дополненная реальность; виртуальная реальность.

До настоящего времени во время просмотра спортивных трансляций зрители видели только то, что выбирали для показа телевещательные компании, и только с тех ракурсов, с которых снимали операторы. Однако новые технологии виртуальной (VR, Virtual Reality) и дополненной (AR, augmented reality) реальностей позволяют болельщикам полностью погружаться спортивные матчи и наблюдать за игрой практически с любого ракурса.

Виртуальная и дополненная реальности тесно связаны между собой. В виртуальной реальности человек видит искусственно созданные предметы и взаимодействует с ними. Дополненная же реальность использует визуальный ряд реального мира, дополняя его виртуальными предметами и свойствами [1].

В философской трактовке идея виртуальной реальности абстрагируется от её технического воплощения. Виртуальную реальность можно толковать как совокупность моделируемых реальными процессами объектов, содержание и форма которых не совпадает с этими процессами. Существование моделируемых объектов сопоставимо с реальностью, но рассматривается обособленно от неё – виртуальные объекты существуют, но не как субстанции реального мира. В то же время эти объекты актуальны, а не потенциальны [1].

«Виртуальность» (мнимость) реальности устанавливается по отношению к обуславливающей её «основной» реальности. Виртуальные реальности могут быть вложены друг в друга. При завершении моделирующих процессов, идущих в «основной» реальности, виртуальная реальность исчезает [1].

Существует также 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. При этом с помощью технических средств в воспринимаемой человеком реальности появляются «дополнительные» элементы (когда виртуальные объекты «монтируются» в его поле восприятия).

Сегодня существует множество программных и технических средств, которые позволяют при помощи дополненной реальности получить необходимые сведения об окружении. Само распространение дополненной реальности и нарастающая известность технологии среди потребителей связаны с тем, что вычислительная мощность и набор датчиков в аппаратных платформах для мобильных устройств позволяют производить наложение любых цифровых данных на получаемое в реальном времени со встроенных в устройства камер изображение.

В перспективе созданный техническими средствами мир (объекты и субъекты), передаваемый человеку через его ощущения: зрение, слух, обоняние, осязание и др. позволит имитировать как воздействие, так и реакции на воздействие. Уже сейчас для создания убедительного комплекса ощущений реальности компьютерный синтез свойств и реакций виртуальной и дополненной реальности производится в реальном времени. С развитием технических средств пользователь сможет воздействовать с виртуальными объектами в согласии с реальными законами физики.

Основными областями применения технологий виртуальной и дополненной реальностей являются, как военная техника и автомобилестроение, так и медицина, полиграфия, реклама, компьютерные и мобильные игры. Технологии применяются в архитектуре и геологии, навигации и туризме, а также повсеместно используются при трансляции спортивных событий [1].

Среди наиболее распространенных примеров использования дополненной реальности в спорте – параллельная лицевой цветная линия, показывающая нахождение ближайшего полевого игрока к воротам при телевизионном показе футбольных матчей; стрелки с указанием расстояния от места штрафного удара до ворот; траектория полета шайбы во время хоккейного матча и т.п.

Кроме богатых возможностей применения виртуальной и дополненной реальностей для привлечения поклонников ближе к действию в «традиционном» спорте (например, просмотр матча с выбранной точки поля), эти технологии могут быть использованы и в киберспорте.

13 апреля 2017 г. в Минюсте России был зарегистрирован Приказ Министерства спорта Российской Федерации от 16.03.2017 № 183 «О признании и включении во Всероссийский реестр видов спорта спортивных дисциплин, видов спорта и внесении изменений во Всероссийский реестр видов спорта». В соответствии с данным приказом компьютерный спорт был переведён во второй раздел – «виды спорта, развиваемые на общероссийском уровне». Это значит, что появилась возможность проведения в России официального чемпионата страны, появлению разрядов и званий по компьютерному спорту. В этом же разделе находятся все «традиционные» виды спорта – футбол, хоккей, волейбол, баскетбол и т.д.

С 5 июля 2017 г., в соответствии с приказом Министерства спорта Российской Федерации № 618, аккредитованной спортивной федерацией по виду спорта «компьютерный спорт» является Федерация компьютерного спорта России.

В консервативном понимании, спорт – это организованная по определённым правилам деятельность людей, состоящая в сопоставлении их физических или интеллектуальных способностей, а также подготовка к этой деятельности и межличностные отношения, возникающие в её процессе [2]. В свою очередь, киберспорт, также именуемый как компьютерный спорт или электронный спорт можно определить как вид соревновательной деятельности и специальной практики подготовки к соревнованиям на основе видеоигр, где игра предоставляет среду взаимодействия объектов управления, обеспечивая равные условия состязаний человека с человеком или команды с командой.

Киберспортивными дисциплинами можно считать игры, в которых удача и «случайные стечения обстоятельств» играют наименьшую роль, в то время как опыт и умение играть в игру – наибольшую. Таким образом, в категорию киберспортивных дисциплин часто попадают игры жанров MOBA (Multiplayer Online Battle Arena) или RTS (Real-Time Strategy) [3].

Все киберспортивные дисциплины делятся на несколько основных классов, различаемых свойствами пространств, моделей, игровой задачей и развиваемыми игровыми навыками киберспортсменов [3]: шутеры от первого лица, стратегии реального времени, авто- и авиа-симуляторы, командные ролевые игры с элементами тактико-стратегической игры и т.д.

В соответствии с приказом Минспорта № 183 от 16.03.2017 г., в России официально признаны четыре дисциплины: это боевая арена, соревновательные головоломки, стратегия в реальном времени и технический симулятор. Также Федерация компьютерного спорта России работает над официальным признанием шутеров и файтингов.

Помимо протокола, который подтверждает факт проведения киберспортивного состязания, обязательно наличие бригады судей, которая состоит из главного судьи и судей по играм (если их несколько), линейных судей, наблюдателей и технических судей [4].

Киберспортсмен же нуждается в ряде навыков, в основном, интеллектуальных, таких как реакция, мелкая моторика пальцев, умение мыслить нестандартно, а чтобы выдержать изнурительный тренировочный процесс, требуется крепкая психика. При этом необходимо создать нормативные акты, регламентирующие деятельность киберспортсмена, тренера и судьи при реализации процесса спортивной подготовки и проведении соревнований в дистанционном режиме [4].

В соответствии с приказом Минспорта России № 618 от 05.07.2017 г., право и обязанность разрабатывать правила по виду спорта и вносить их на утверждение в Минспорта РФ возложены на Федерацию компьютерного спорта России.

Тем не менее, правила киберспорта, фактически, определяются игрой, в которую играют игроки. В настоящее время все киберспортивные дициплины достаточно сбалансированы, ярко выраженный дисбаланс отсутствует.

Стоит отметить также, что у киберспортивных соревнований нет четкой организации, т.е. ежемесячно может проводиться по одному мировому турниру, следовательно, в каждой дисциплине за год может появиться более одного чемпиона мира.

Киберспортивные мероприятия, особенно мировые, наравне с «традиционными» спортом активно транслируются по спортивным каналам. Технологические компании применяют при этом всё более совершенные средства для улучшения качества трансляций, сочетая технологии виртуальной и дополненной реальностей.

В свою очередь, такое сочетание виртуальной и дополненной реальностей воспринимается человеком как смешанная реальность (MR, Mixed Reality), объединяющая реальный и виртуальный миры для созданий новых окружений и визуализаций, где физический и цифровой объекты сосуществуют и взаимодействуют в реальном времени.

Объединение реальных и виртуальных миров принято считать подклассом VR-технологий, при этом окружение виртуальной реальности – такое, где участник-наблюдатель полностью погружён и взаимодействует с полностью искусственным миром. Виртуальный мир может копировать свойства некоторых реальных окружений, существующих либо вымышленных; он так же может выйти за грани физической реальности, создавая миры, где физические законы, регулирующие пространство, время, механику, материальные свойства и т.д., не действуют [5].

Для погружения в такую реальность используют шлемы и другие устройства: системы трекинга головы, глаз, движений тела; перчатки, 3D-контроллеры, устройства с обратной связью, платформы, датчики, способствующие созданию ощущений реалистичности нахождения в цифровом пространстве.

Смешанная реальность позволяет участнику-наблюдателю одновременно исследовать виртуальную среду и реальный мир как единое целое. Посредством использования пространства и координат виртуальные объекты располагаются в реальном мире. Когда участник-наблюдатель приближается к объекту – они увеличиваются, а когда отдаляется – уменьшаются, а когда он двигается вокруг виртуальных объектов – это так же дает ощущение взгляда под разными углами и перспективами.

В то же время есть ряд факторов, которые сдерживают повсеместное использование технологий виртуальной и дополненной реальностей. Это и техническое несовершенство существующих устройств, и физиолого-психологические аспекты, включая привычки людей и страх вреда для здоровья.

Смешанная реальность может применяться в киберспорте в нескольких форматах.

Первый формат – анализ прошедших игр. После матча любой игрок может надеть шлем виртуальной реальности и снова посмотреть важный эпизод с любой точки, в том числе своими глазами или со стороны партнера-союзника (изображение буквально прокручивается, можно выбрать любую область). Это позволяет проанализировать ошибки и улучшить взаимодействие между игроками, потому что шлем создает эффект полного присутствия.

Второй формат – создание разных игровых сценариев с нуля. По запросу тренерского штаба в виртуальном мире моделируется некоторая ситуация, а игрок должен сделать правильный выбор, оттачивая определенные навыки.

Можно констатировать, что основным направлением применения технологий виртуальной и дополненной реальностей в киберспорте становится не столько организация необычных трансляций, сколько помощь в тренировочном процессе за счет создания искусственной среды.

Тренировки в условиях искусственной среды уже являются одним из наиболее популярных направлений в теории и практике «традиционного» спорта и физических упражнений. Такие

системы можно определить как «техногенные среды, имитирующие реальные условия с учётом специально сформулированных требований и в контролируемых режимах» [6].

Первоначальный импульс для разработки таких биотехнологических систем был связан с развитием специализированных тестирующих комплексов, которые в лабораторных условиях имитируют различные варианты спортивной деятельности в реальных условиях. Сегодня успешно моделируются и изучаются такие спортивные дисциплины, как бег, велоспорт, академическая гребля, гребля на байдарках, лыжные гонки, конькобежный и парусный спорт.

Еще одним фактором, повлиявшим на развитие искусственной среды, был успешный опыт в разработке подобных систем подготовки, используемых для специального обучения различных профессиональных групп, таких как водители, летчики, хирурги и парашютисты, следующим же шагом стало использование искусственной среды для подготовки спортсменов в точно заданных условиях с использованием онлайн-мониторинга, обратной связи и корректировки, что может быть транслировано и на киберспорт.

Таким образом, инновационный подход, связанный с внедрением технологий виртуальной и дополненной реальностей в киберспорт, обеспечит возможность подготовки киберспортсменов высокой квалификации, а также в значительной мере поспособствует обучению и диверсификации подготовки киберспортсменов низкого и среднего уровня.

Библиографический список

1. Егоров Ю.С., Санин М.А. Дополненная реальность как перспективное направление развития мобильных устройств // Материалы XXII Международной науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии». – Н. Новгород: НГТУ, 2016. С. 187.
2. Большая олимпийская энциклопедия, 2007. – 1752 с.
3. Оводков А. Киберспорт как вид спорта: становление и развитие // Internet. – http:// www.team-empire.org/news/1594.
4. Скаржинская Е.Н., Новоселов М.А. Актуализация научного сопровождения компьютерного спорта // Физическая культура: воспитание, образование, тренировка. 2017. № 2. С. 39-40.
5. Milgram P., Kishino F. Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEICE Transactions on Information and Systems. 1994. Vol E77-D, № 12. P. 1321–1329.
6. Issurin, V. Training transfer: scientific background and insights for practical application // Sports Med. 2013. № 43. P. 675-694.

Y.S. Yegorov, M.A. Sanin, D.A. Chuprov,

INTRODUCTION OF VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN CYBERSPORT

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Kibernetika LLC

The paper describes the introduction of virtual and augmented reality technologies in the preparation and conduct of cybersport events. Cybersport is recognized as the official sport in Russia, which requires the introduction of modern information technologies in the processes of broadcasting cybercompetition, training cybersportsmen and conducting training.

Keywords: cybersport; information technology; augmented reality; virtual reality.

УДК 004.2:004.4

Д.В. Седаков

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ КОНФИГУРАЦИЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОФИЛЯ

Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ
«Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Развивается способ управления конфигурацией комплекса информационных систем,которая находится из решения задачи многокритериального выбора. Для этой задачи с применением аппарата нечеткой логики сформированы показатели и критерий.

*Ключевые слова***:** управление конфигурацией, информационная система, многокритериальный выбор, нечеткая логика.

Управление конфигурацией входит в состав интегральных процессов, выполняемых при проектировании информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и особенно систем, критичных по безопасности[1]. В [2] отмечается заметное внимание и проведен обзор исследований в области построения конфигураций сложных многокомпонентных систем. Вопросы определения и развития конфигурации возникают при управлении информационной инфраструктурой предприятия, информационным обеспечением бизнес-процессов и при предоставлении информационных сервисов [3].

В работе [2] рассмотрены задачи проектирования и перепроектирования конфигурации на примере оборудования коммуникационной сети. Задача проектирования заключается в выборе одного элемента из каждой группы таким образом, чтобы было получено наилучшее соответствие требованиям и не было нарушено общее бюджетное ограничение [2]. Задача перепроектирования возникает в первую очередь при изменении (ужесточении) отдельных требований, в результате чего используемая конфигурация системы перестает быть эффективной. Для описания оборудования применена система требований и соответствующих критериев, включающая четыре группы [2]: эффективность, управляемость, надежность, другие характеристики и требования. При этом выбор конфигурации системы основывается на решении многокритериальной блочной задачи о рюкзаке. В заключительной части статьи [2] отмечен ряд перспективных направлений исследований, в том числе учет оценок совместимости компонентов оборудования и использование нечетких множеств.

Цель работы – в развитии подхода [5] в указанных перспективных направлениях управления конфигурацией информационных систем предприятия радиоэлектронного профиля.

Определим архитектуру комплекса информационных систем (КИС), с помощью состава U, структуры S и конфигурации C. Состав КИС зададим множеством $U=\{u_1,...,u_N\}$, включающим компоненты u_n, $n=\overline{1,N}$ КИС.В рамках данной статьи поставим в соответствие компонентам отдельные информационные системы(ИС) предприятия.

Например, для предприятий, занимающихся разработкой и производством высокотехнологичной продукции, комплекс информационных систем, обеспечивающих поддержку жизненного цикла изделий, может включать в себя следующие взаимодействующие компоненты (классы ИС):

- система управления данными об изделии (product data management, PDM);
- система конструкторского проектирования (computeraided design, CAD);
- система конструкторского проектирования электронных устройств (electronic computer aideddesign, ECAD);
- система технологической подготовки производства (computeraided manufacturing, CAM);
- система планирования производственных процессов (computeraided productionplanning, CAPP);
- система управления производственными процессами (manufacturing execution system, MES) и др.

Структура КИС S отражает описание взаимодействий между отдельными компонентами, которые определяются направлением информационных потоков в КИС. На корпоративном уровне рассматриваются связи между бизнес-процессами и их информационная поддержка [3], которая обеспечивается взаимодействующими ИС (компонентами КИС). Структура КИС может быть изображена с помощью структурной схемы или соответствующего ей направленного ациклического графа $G(U,S)$, где S − множество дуг, представляющих интерфейсы между компонентами КИС. Эти дуги могут быть заданы перечислением или $(N\times N)$-матрицей смежности $\mathbf{S}$.

Возможные варианты реализации каждого из компонентов u_n, $n=\overline{1,N}$ определяются на множествах альтернативных системно-технических решений D_n, где $D_n=\{d_{n1},...,d_{nM_n}\}$, $n=\overline{1,N}$.Под конфигурацией C КИС, аналогично [2], будем понимать альтернативы, отобранные для реализации каждого из компонентов u_n, $n=\overline{1,N}$. Для описания конфигурации КИС можно использовать N векторов индикаторных переменных $\mathbf{x}_n=[x_{n1},x_{n2},\ldots,x_{nM_n}]^{\mathrm{T}}$, $n=\overline{1,N}$ таких, что $x_{nm}=1$, если альтернатива d_{nm} выбрана для реализации компонента u_n. При этом $\sum_{m=1}^{M_n}x_{nm}=1$, $n=\overline{1,N}$, что означает выбор единственной альтернативы для каждого компонента КИС.Применим другой, более компактный, способ описания конфигурации C КИС, основанныйна векторе $\mathbf{c}=[c_1,...,c_N]^{\mathrm{T}}$, у которого $c_n=m,$ если для n-го компонента u_n КИС выбран m-й вариант системно-технического решения d_{nm}, что соответствует $x_{nm}=1$.

В работе [2] выбор конфигурации оборудования базируется на использовании многокритериальной блочной (с мультивыбором) задачи о рюкзаке. Максимизируемые показатели (частные целевые функции) определены с помощью экспертных оценок на основе отдельных характеристик альтернатив. При этом наилучшими (для каждого компонента) являются альтернативы, обладающие наибольшими значениями всех характеристик. Отсутствие явного учета требований к компонентам может приводить к получению «несбалансированных» решений и к «оплате ненужной функциональности».

При решении задачи формирования конфигурации КИС выделим функциональные и нефункциональные требования. Функциональные требования содержат описание необходимых возможностей программного обеспечения и определяют, какие услуги программное обеспечение должно предоставлять, а также какую реакцию демонстрировать в отдельных ситуациях в ответ на определенные действия пользователей. При этом функциональные требованиям должны обладать определенным набором свойств [1], таких как однозначность, полнота, непротиворечивость, проверяемость и др. К нефункциональным требованиям обычно относят характеристики информационных систем, которые в совокупности определяют уровень качества обслуживания.

Сравнение альтернативных системно-технических решений предлагается выполнять, сопоставляя характеристики информационных систем с предъявляемыми к ним требованиями. Обозначим совокупность требований, к характеристикам n-го компонента КИС как R_{nl}, $l=\overline{1,L_n}$. Обычно на практике при выборе системно-технических решений требования формализуются заданием областей для соответствующих характеристик y_{nl} в виде односторонних или двусторонних неравенств, например, $y_{nlL}\le y_{nl}\le y_{nlH}$.Допустимые значения дискретных характеристик могут быть заданы перечислением.

Для учета требований при определении конфигурации КИС введем индикаторную переменную r такую, что $r=1$, если требование R и соответствующее неравенство выполняются и

$r = 0$ в противном случае. В результате множество допустимых решений (конфигураций КИС) включает только те альтернативы, для которых все требования ко всем компонентам выполняются. Отметим, что при таком жестком способе задания требований множество допустимых решений может содержать сравнительно небольшое количество альтернатив и даже оказаться в отдельных случаях пустым. 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.

В связи с этим предлагается подход к формализации требований с применением аппарата нечеткой логики. 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 $r = \mu_R(y)$. При этом степень выполнения требования R определяется как значение соответствующей функции принадлежности $r \in [0;1]$.

В качестве основных вариантов формализации требований, связанных с количественными характеристиками компонент КИС, предлагается использовать ФП [4]:линейную s-образную функцию принадлежности (ФП класса γ); линейную z-образную функцию принадлежности (ФП класса L) и трапецевидную функции принадлежности.

Таким образом, применение ФП (1) − (3) для формализации требований можно рассматривать как переход от жестких ограничений с одним порогом к двухпороговым мягким ограничениям.

Для сравнения альтернативных конфигураций $\mathbf{c}$ воспрользуемся совокупностью показателей, которые определим на основе характеристик альтернатив с учетом заданных требований.

При определении конфигурации КИС введены следующие показатели, выражения для которых с применением аппарата нечеткой логики получены в [5]

- коэффициент соответствия функциональным требованиям $K_F(\mathbf{c})$,
- коэффициент соответствия нефункциональным требованиям $K_{NF}(\mathbf{c})$,
- коэффициент совместимости компонент КИС $K_G(\mathbf{c})$,
- коэффициент экономии при внедрении компонент КИС $K_E(\mathbf{c})$.

При определении конфигурации КИС важным является обеспечение совместимости между компонентами.

При определении коэффициента совместимости компонент КИС учтем, что отсутствие взаимодействия по причине несовместимости хотя бы между одной парой информационных систем может значительно снизить уровень информационного обеспечения выполняемых бизнес-процессов. Поэтому, значение коэффициента совместимости определено с, использованием взвешенной *t*-нормы типа «минимум»

Определим критерий решения задачи выбора конфигурации как совокупности показателей, формализуемых в виде частных целевых функций и ограничений, достаточных для оценки достижения поставленной цели. Основываясь на четырех предложенных показателях $K_F(\mathbf{c})$, $K_{NF}(\mathbf{c})$, $K_G(\mathbf{c}), K_E(\mathbf{c})$, в зависимости от их деления на частные целевые функции и ограничения, может быть сформировано несколько вариантов постановки задачи выбора конфигурации КИС. В случае поддержки принятия решений желательно представить ЛПР ранжированный список наиболее предпочтительных конфигураций.

Учитывая, что количество различных конфигураций может быть весьма велико $N_C = \prod_{n=1}^{N} M_n$, а также, что для автоматизированного решения требуется достаточно большой объем исходных данных, который формируется с применением процедур экспертного оценивания, целесообразен поиск путей снижения трудоемкости процедуры выбора конфигурации.

Под трудоемкостью решения задачи выбора конфигурации КИС в данном случае понимаются затраты времени на подготовку исходных данных и, во вторую очередь, вычислительная сложность. Так одним из самых трудоемких этапов подготовки исходных данных является экспертная оценка совместимости между парами альтернативными системно-техническими решениями для различных компонентов, которая описывается $(M_n \times M_k)$-матрицами $\mathbf{G}_{nk}$, $n=\overline{1,N}$, $k=\overline{1,N}$ Определение элементов таких матриц для всех взаимодействующих согласно структурной схеме компонент требует проведения продолжительного и дорогостоящего эксперимента.

Для обеспечения приемлемой трудоемкости решения задачи выбора конфигурации информационной системы предложена двухэтапная процедура. На первом этапе с помощью коэффициентов соответствия функциональным K_{Fnm} и нефункциональным $K_{NF_{nm}}$ требованиям альтернатив $m=\overline{1,M_n}$ на множестве допустимых решений формируется множество Парето D_{Pn} системно-технических решений для каждого компонента $n=\overline{1,N}$. В результате происходит значительное уменьшение количества альтернативных конфигураций КИС, на множестве которых ищется окончательное решение. Для этого с помощью коэффициентов совместимости компоненти соотвествия требованиям строится множество Парето альтернативных конфигураций КИС, удовлетворяющих ограничению по стоимости (экономии), которое может быть задано в виде $K_E(\mathbf{c}) \geq K_{EL}$ (в частном случае $K_E(\mathbf{c}) \geq 0$).Окончательное ранжирование конфигураций КИС выполняется с использованием взвешенной свертки отдельных коэффициентов. Полученный ранжированный список отобранных системно-технических решений выдается лицу, принимающему решения.

Внедрение разработанных процедур выбора конфигурации обеспечит поддержку принимаемых организационно-технических решений и будет способствовать повышению эффективности управления внедрением и развитием информационных систем на предприятии радиоэлектронного профиля.

Список литературы

1. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем: Монография // В.Г. Баранов, Л.М. Вдовин, Т.И. Горячева, В.А. Кольцов, В.Р. Милов, С.Л. Моругин, В.П. Хранилов, М.В. Ширяев / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.
2. Левин М.Ш., Сафонов А.В. Проектирование и перепроектирование конфигурации оборудования коммуникационной сети // Информационные технологии и вычислительные системы. 2006. № 4. С. 63 – 73.
3. Дмитриева Н.Г. Методологические модели управления информационным обеспечением // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 1. С. 11 – 22.
4. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
5. Баранов В.Г., Седаков Д.В., Милов В.Р. Способ управления конфигурацией информационных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8. С. 26–33.

D.V. Sedakov

APPROACH TO THE MANAGEMENT OF THE INFORMATION SYSTEMS CONFIGURATION OF THE RADIOELECTRONICS COMPANY

Branch of RFNC-VNIIEF
«Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye Sedakov»

Mode for information system complex configuration management is under development, based on solving multicriterion selection task. Indicators and criterion were generated for this task using fuzzy logic apparatus.

Key words: configuration management, information system, multicriterion selection, fuzzy logic.

УДК 658.5.011

И.В.Скрипник, А.Н.Кирсанычев

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЯ О КОНЦЕПЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

ООО НПП «ПРИМА»

Рассматривается задача выбора концепции выполнения проекта по разработке изделий на основе системного подхода. Для формирования множества возможных альтернатив применен метод морфологического анализа. Принятие решения реализовано с использованием векторного критерия посредством введения ограничений и выделения главного критерия.

Ключевые слова: системный подход, морфологический анализ, принятие решений.

Введение

Проектирование любой технической системы имеет свой целью создание некоторого изделия, способного удовлетворить требованиям технического задания (ТЗ) на разработку.Структура этапов проектирования регламентируется стандартами, например, ГОСТ 2.103, 15.201 и определяет порядок выполнения работ по разработке продукции. Результатом проектирования является комплект документации, необходимой и достаточной для производства и последующей эксплуатации объектов проектирования.

С точки зрения общей методологии нисходящего проектирования [1], синтез новой технической системы предполагает разработку новых технических идей и инженерных решений и включает в себя: разработку принципа действия системы; синтез структуры системы; определение параметров элементов системы.

На начальном этапе с учетом последних достижений науки, техники и технологии отыскивают принципиальные технические решения, которые составят основу функционирования будущего изделия. Данный этап соответствует стадии предварительного проектирования и находит свое отражение в техническом предложении [2]. На этапе структурного синтеза создаются варианты структуры системы, позволяющие реализовать выбранные ранее принципы действия системы. В соответствии с ГОСТ 2.103 этот этап включает стадию эскизного проекта. На стадии технического и рабочего проектирования определяются значения параметров элементов системы, находится решение проектной задачи, создается комплект рабочей документации на изделие. Вариативность решения на каждом из указанных этапов является средством достижения требуемых характеристик проектируемой системы. Вследствие существующей неопределённости процесс проектирования итеративен, с повторением уже пройденных этапов и коррекцией документации по результатам испытаний, в результате чего создается вариант системы, наилучшим образом подходящий для реализации требований технического задания.

Как правило, возникающие на каждом этапе задачи решаются с привлечением существующих методов принятия решений. При этом стоимость исправления проектной ошибки (неверно принятого решения) зависит от этапа выполнения проекта, на котором она допущена. Ошибка, допущенная на более ранних этапах, будет «стоить» существенно больше ошибок завершающих стадий проекта. В литературе, посвящённой методам проектирования систем, большое внимание уделяется процессам синтеза структуры разрабатываемой системы и оптимизации ее параметров, но при этом недостаточно рассматривается вопрос выбора концепциивыполнения проекта.

Под концепцией выполнения проекта будем понимать модель, отражающую систему взглядов ответственного исполнителя проекта (главного конструктора) на порядок действий и распределения ресурсов, необходимых для достижения целей проектирования. Правильно выбранная концепция проектирования обеспечивает целенаправленное решение поставленной задачи при рациональном использовании ресурсов.

Анализ проекта на основе системного подхода

Основные этапы исследования объекта с применением методологии системного анализа [3] включают в себя:

- определение проблемы;
- выявление целей;
- формирование критериев;
- генерирование альтернатив;
- принятие решения (оптимизация, выбор);
- реализация принятого решения.

На начальном этапе предстоит выявить проблему, подлежащую решению, затем расширить ее до системы взаимосвязанных составных частей (подпроблем). На основании сформулированной проблемы необходимо определить цель исследования, т.е. что надо сделать для решения проблемы. В результате декомпозиции может быть получено дерево целей, в зависимости от структуры имеющихся проблем. Критерии позволяют оценить степень достижения целей. В зависимости от их количества и характера целей критерийQ может быть как скалярной величиной$Q = q$, так и векторной с mкомпонентами $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$.Генерирование возможных вариантов (альтернатив) решения сформулированных проблем является одним из творческих этапов системного анализа. В результате поиска получают множество $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$. На этапе принятия решения [3, 6]в соответствии выбранным правилом f из множества альтернатив A выбирают наилучшее решение a^* или, в случае невозможности нахождения единственного решения, множество компромиссных вариантов$A_{\text{К}}$. На заключительном этапе в соответствии с выбранной тактикой проекта осуществляется проектирование конечной системы.

Предметом исследования выберем проект. Под проектом, согласно [5], будем понимать «временное предприятие, предназначенное для создания уникальных продуктов, услуг или результатов». Конечный результат проекта – новая техническая система (изделие), удовлетворяющая требованиям заказчика. В рамках исследования рассмотрим проблему нахождения рациональной концепции проектирования на основании информации, имеющейся на начальном этапе выполнения проекта.

Определение проблематики, целей и критериев анализа

Процесс проектирования подчинен необходимости удовлетворения интересов противоположных групп людей: разработчика (производителя) изделия и заказчика (потребителя) продукции. Каждая сторона стремится получить максимум выгоды от реализации проекта. Потребитель желает снизить суммарную стоимость изделия, отнесенную ко всему его жизненному циклу, при обеспечении все возрастающих требований к эффективности применения изделия. В интересах разработчика – минимизировать затраты на проектирование и выпуск продукции, отвечающей требованиям заказчика. Указанный дуализм интересов делает задачу проектирования противоречивой – с одной стороны следует использовать все последние достижения науки и техники, а с другой – имеются многочисленные ограничения, как явно указанные в техническом задании (стоимость, сроки проектирования и т.п.), так и присутствующие неявно.

Рассмотрим проблему с точки зрения ответственного исполнителя проекта. Его основная проблема – как выполнить проект? Основная проблема порождает систему подпроблем, существенно связанных с исследуемой. Перечислим некоторые из них:

- Как обеспечить требуемые качественные показатели проектируемого изделия?
- Как выполнить установленные для проекта сроки?
- Как снизить финансовые затраты на проектирование и постановку на производство?

После определения проблематики необходимо выявить цели проекта. Глобальной целью является выполнение проекта. Она порождает множество подцелей:

- обеспечение требуемых параметров проектируемого изделия;

- соблюдение сроков выполнения проекта;
- снижение затрат на разработку и постановку изделия на производство.

Степень соответствия проекта поставленным целям необходимо оценить на основании выбранных критериев. В соответствии с выбранными целями исследования определим следующие критерии: качественные показатели проекта(q_1); срок выполнения проекта (q_2); затраты (q_3).

Таким ебразом, будем иметь дело с векторным критерием $Q = (q_1, q_2, q_3)$. Для снижения сложности задачи возможные значения критериев определим в виде порядковых шкал:

$$q_1 = (\text{низкие} < \text{средние} < \text{высокие});$$
$$q_2 = (\text{малый} < \text{средний} < \text{большой});$$
$$q_3 = (\text{малые} < \text{средние} < \text{большие}).$$

Формирование альтернатив и их оценка

Для формирования множества возможных альтернатив концепциивыполнения проектавоспользуемся методом морфологического анализа [4, 1]. В соответствии с указанным методом необходимо выделить классификационные признаки объекта, определить значения классификационных признаков, сформировать множество возможных альтернатив путем полного перебора всех признаков и их значений.Количество свойств и их возможных значений определяется из условия обозримости и реальности анализа получаемых впоследствии вариантов.

В рамках проводимого исследования в перечень свойств должны быть включены те атрибуты, которые определяют концепцию выполнения проекта. Исходя из того, что предмет исследования рассматривается качественно, без точной количественной оценки, ограничимся тремяклассификационными признаками, для каждого из которых зададим два пограничных значения:

- p_1–степень соответствия проекта профилю предприятия, $p_1 = (\text{высокая}, \text{низкая})$;
- p_2– степень использования в проекте последних достижений науки и техники, $p_2 = (\text{высокая}, \text{низкая})$;
- p_3–исполнитель проекта, $p_3 = (\text{предприятие}, \text{субподрядчик})$.

Перечень возможных альтернатив и результат их экспертной оценки на основе выбранных ранее критериев приведен в табл.1.

Таблица 1

A	Классификационные признаки			Критерии		
	p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
a_1	высокая	высокая	предприятие	высокие	средний	средние
a_2	высокая	высокая	субподрядчик	высокие	малый	большие
a_3	высокая	низкая	предприятие	средние	малый	малые
a_4	высокая	низкая	субподрядчик	средние	малый	средние
a_5	низкая	высокая	предприятие	средние	большой	средние
a_6	низкая	высокая	субподрядчик	высокие	малый	большие
a_7	низкая	низкая	предприятие	низкие	большой	средние
a_8	низкая	низкая	субподрядчик	средние	малый	средние

Далее кратко поясним основные соображения, которые применялись при экспертной оценке указанных альтернатив.

Привлечение сторонней организации (субподрядчика) для выполнения проектных работ, при прочих равных условиях, увеличивает затраты на проектирование в силу того, что субподрядчик закладывает в стоимость работ собственную прибыль. Предполагая, что для работы привлекаются высококвалифицированные специалисты, это позволяет сократить сроки

разработки и обеспечить высокие качественные показатели проектируемой системы. Однако привлечение субподрядчика снижает степень участия специалистов предприятия при разработке систем, ведет к снижению их профессиональных качеств.

Необходимость использованияпоследних достижений науки и техники увеличивает затраты (финансовые и временные) на их изучение и освоение в ходе разработки, дополнительные затраты при постановке на производство спроектированной системы вследствие необходимости освоения новых технологических процессов и приобретения нового оборудования. Но при этом спроектированная система потенциально будет иметь более высокие качественные характеристики, а значит более привлекательные потребительские свойства.

Степень соответствия проекта профилю предприятия определяет возможность использования опыта существующих разработок и позволяет существенно снизить требования к требующимся для проектирования ресурсам – временным, финансовым, человеческим. В этом случае специалисты предприятия владеют необходимым багажом актуальных знаний в определённой области, а производственные подразделения обладают необходимыми технологиями и оборудованием для выпуска профильной продукции.

Принятие решения

Для выбора наиболее подходящей альтернативы необходимо выбрать алгоритм (метод) принятия решения. В приведенной постановке задача анализа объекта является многокритериальной, т.к. имеем дело с векторным критерием.Решение многокритериальной задачи в общем случае довольно проблематично, поскольку при переходе от одного варианта к другому улучшаются значения одних критериев, но ухудшаются другие. В этом случае нахождение оптимального решения является невозможным и ведется поиск компромиссных решений. Выделение области компромиссов$A_К$ позволяет отбросить заведомо неудовлетворительные$A_Н$ варианты решения, $A_К \cup A_Н = A$.

На практике успешное выполнение проекта означает выполнение договорных обязательств исполнителем проекта, что можно представить в виде условий

$$q_1 \geq q_1^{ТЗ}, q_2 \leq q_2^{ТЗ}, q_3 \leq q_3^{ТЗ}, \quad (1)$$

где $q_1^{ТЗ}$, $q_2^{ТЗ}$, $q_3^{ТЗ}$ – требования ТЗ на проект.

Таким образом, условие (1) можно использовать для определения множества допустимых компромиссов

$$A_К = \bigcup_i a_i \ , \ q_1(a_i) \geq q_1^{ТЗ} \ , \ q_2(a_i) \leq q_2^{ТЗ} \ , \ q_3(a_i) \leq q_3^{ТЗ} \ , \ \forall a_i \epsilon \ A_К \quad (2)$$

Найдем компромиссное множество для случая, когда по условиям ТЗ необходимо разработать систему, которая будет обладать средними качественными показателями при малом сроке разработки и затратами на проектирование не выше средних, т.е. $q_1^{ТЗ} = \text{средние}$, $q_2^{ТЗ} = \text{малый}$, $q_3^{ТЗ} = \text{средние}$. В этом случае множество компромиссов будет следующим – $A_К = (a_3, a_4, a_8)$.

Формально, любое решение, принадлежащее области$A_К$ позволяет удовлетворить требованиям технического задания, но при этом оно может не обеспечивать достижения поставленных целей исследования. Выбор наилучшего варианта из области$A_К$ может осуществляться с использованием дополнительной информации, позволяющей свести задачу многокритериального выбора к однокритериальной. Среди подобных методов [3, 6] в инженерной практике применяются методы свертки векторного критерия и методы ранжирования критериев. Воспользуемся последним подходом. Учитывая сформулированные ранее цели исследования, будем полагать, что главным критерием являются затраты (q_3), которые нужно минимизировать, а качественные показатели (q_1) и срок (q_2) выполнения проекта будут играть роль ограничений. Теперь задачу поиска наилучшего вариантаa^* можно представить в виде:

$$a^* = arg\begin{Bmatrix} min & q_3(a_i) \\ a_i \epsilon\, A_K & \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

т.е. оптимальным вариантом проекта будет такой a^*, который при соблюдении требований ТЗ в части сроков и качественных показателей проекта обеспечивает его минимальную стоимость. В нашем случае оптимальной альтернативой будет являться $a^* = a_3$, что в содержательном плане означает следующее –минимальные затраты на разработку технической системы в условиях малого срока проектирования будут обеспечиваться для профильного проекта, который выполняется силами специалистов предприятия с использованием имеющихся наработок. Фактически это означает незначительную модернизацию одного из существующих серийных изделий до требований ТЗ и выполняется на заключительной стадии – реализации принятого решения.

Библиографический список

1. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем: Учебное пособие для втузов – Белгород, 1999. – 372 с.
2. ГОСТ 2.103 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки
3. Перегудов Ф.И. Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высш.шк., 1989. – 367 с.: ил.
4. Акимов С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области // Проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза URL: http://www.structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm(дата обращения: 22.12.2017)
5. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK) – Пятое издание. –ProjectManagementInstitute, Inc., 2013.
6. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с: ил.

I.V. Skripnik, A.N. Kirsanychev

DEVELOPMENT OF APPROACH TO DECISION ON THE CONCEPT OF PROJECT EXECUTION

LLC Research & Production Enterprise «PRIMA»

The problem of choosing the concept of project implementation for the development of products based on the system approach is considered. To form a set of possible alternatives, the method of morphological analysis is applied. The decision is implemented using a vector criterion by imposing restrictions and highlighting the main criterion.

Keywords: system approach, morphological analysis, decision making

УДК 621.391.7

Д.А.Глейберзон, А.В. Семашко

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена проблема обеспечения безопасности речевой информации в сетях мобильной связи. Рассмотрены основные угрозы безопасности речевой информации. Проведен обзор действующих методов защиты. Проведено описание комплекса мер по защите речевой информации.

Ключевые слова: сотовые системы связи, речевая информация, аппаратные решения, программные решения, абонентские терминалы, комплексная защита.

Информация, на сегодняшний день, является основой человеческой деятельности и играет огромное значение в жизни современного общества. Телекоммуникации являются в настоящее время одной из самыхбыстро развивающихся отраслей [1]. Важнейшее место занимают сотовые системы связи (ССС), которые предназначены для обеспечения подвижной связью массового потребителя на значительных территориях[2], и позволяют осуществлять передачу как речевой информации так и данных. Развитие таких систем напрямую связано с проблемой обеспечения конфиденциальности, надежности и доступности связи, что объединяется понятием безопасность [3-5]. Обеспечение безопасности информационных технологий включает защиту информации от несанкционированного раскрытия, модификации, а также потери возможности ее использования[4]. В ССС доступность информации играет важнейшую роль. Это обусловлено тем, что информация, которая находится в системе (за исключением служебной), хранится у самих пользователей (абонентов ССС). Без обеспечения посредством ССС доступа пользователей к этой информации, невозможен процесс ее передачи и вследствие этого теряет актуальность задача защиты информации от несанкционированного раскрытия и модификации. Наиболее важно обеспечивать конфиденциальность и безопасность переговоров в сфере государства и бизнеса.

На сегодняшний день, самыми защищенными стандартами сотовой связи являются стандарты GSM, UMTS и CDMA. Остро стоит вопрос о том, что базовой защиты голосового трафика сотрудникам специальных и силовых служб и бизнесменам уже недостаточно – перехватить их разговор можно с помощью специального оборудования, например, устройства «Эшелон». Появилась необходимость создания специальных терминалов и программного обеспечения для них, т.к. шифры, которые применяются в стандартах мобильной связи, легко вскрываются, а с ними и вся информация. Было принято решение «закрытия» канала сотовой связи на полном участке – от аппарата абонента до аппарата. Найдено много решений данного вопроса – от различного программного обеспечения, до специальных закодированных терминалов.

Существует множество способов перехвата речевой информации. В работе рассмотрены основные из них, такие, как Эшелон, СОРМ и AccessFraud.

Первая версия "Эшелона" появилась в 1971 году. «Эшелон» работает на основе десятков геостационарных спутников слежения, которые способны перехватывать любые информационные наземные сигналы и сеть суперкомпьютеров, выполняющих десятки миллиардов операций. Для выборки интересующих сведений используются ключевые слова, фамилии и телефонные номера[6]. Существует эффективно функционирующая система СОРМ – система внутреннего мониторинга информации, передаваемой по сетям документальной электросвязи. Система состоит из специального ПО и аппаратного обеспечения. Управление и получение данных из этой системы происходит по мощному каналу связи, который так же резервируется, то есть создается равный по мощности. Для обеспечения бесперебойного доступа к системе используется независимое автономное питание, весь трафик шифруется. Согласно документам, СОРМ должна иметь доступ ко всем данным об абоненте, минуя оператора. По факту, операторы не против передавать данные абонентов, однако делают это по решению суда. Система работает в двух режимах контроля – полного и статистического. Статистический контроль означает, что речевой канал не

подключается к пульту управления, а передает в реальном времени информациюо установленных соединениях и звонках [7]. При полном контроле, помимо этого, так же осуществляется съем и трансляция на пульт управления информации, передаваемой в разговоре контролируемого абонента.

В работе рассматривается и другая угроза абонентам мобильных систем связи, которая называется AccessFraud. AccessFraud, это мошеннический доступ, т.е. несанкционированное использование услуг сотовой связи за счет умышленного или неумышленного вмешательства, манипулирования или перепрограммирования номеров сотовых аппаратов ESN (ElectronicSerialNumber) и/или MIN (MobileIdentificationNumber). В AMPS (AdvancedMobilePhoneService – усовершенствованная подвижная телефонная служба – аналоговый стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 825 до 890 МГц) эти номера могут быть перехвачены при помощи сканера и использованы для программирования других телефонов – метод создания нелегального "двойника". Способ возможен на сетях без аутентификации.

В представленной работе рассматриваются уже действующие методы по обеспечению безопасности в мобильных сетях связи, такие, как аппаратные решения, программные решения и использование дополнительных устройств, а так же предлагаются новые подходы к решению проблемы обеспечения защиты информации при передаче по открытым каналам сотовой связи.

Аппаратные решения представляют собой абонентские терминалы. Например, телефоны SectraTiger защищают передачу разговоров и SMS, функционируют в любой доступной сети GSM, но при этом, независимо от сети или оператора, используют средства криптографии на всем пути данных от отправителя до получателя. В США было принято решение сертифицировать GSM-телефон для правительственного использования. Им оказался аппарат Sectera подразделения компании GeneralDynamics (GD DecisionSystems). По такому телефону без опасения быть услышанным можно обмениваться информацией с грифом "Совершенно секретно". Фактически это трехдиапазонный (900/1800/1900) телефон MotorolaTimeport со специальным криптомодулем-скремблером. Также существуют криптофоны GSMK CryptoPhone G10i, GSMK CryptoPhone 300 (на базе коммуникатора HTC), GSMK CryptoPhone T2 ThurayaSatelliteOption (на базе спутникового терминала), GSMK CryptoPhone PSTN/1. Это либо самостоятельно исполненные в едином корпусе решения для мобильной связи, либо приставки к спутниковым и стационарным телефонам, обеспечивающие закрытие канала связи дополнительными средствами криптографии AES256 и Twofish. Особенность ключей кодирования в данном случае – их весьма ограниченный срок жизни. По аналогии с шифроблокнотами для разведывательных групп и дипломатических служб они являются одноразовыми – то есть, уничтожаются после каждого сеанса.

Программные решения представляют собой комплекс специальных программ, которые устанавливаются на абонентские терминалы для защиты информации. Компания "Сигнал-КОМ", российский разработчик программных и программно-аппаратных комплексов, предназначенных для решения задач в области защиты информации при ее хранении и передаче по каналам связи, представила программный комплекс VoiceCoderMobile (VCM), предназначенный для организации защищенных переговоров в сетях сотовой связи стандарта GSM. Он предназначен для работы на мобильных устройствах, построенных на базе процессоров семейства ARM и OMAP с тактовой частотой не ниже 200 МГц и функционирующих под управлением ОС WindowsMobile 2003 или WindowsMobile 5.0. Защита переговоров основана на параметрическом сжатии речевого сигнала в поток со скоростью передачи 4800 бит/с с последующим его шифрованием и передачей по каналам связи в рамках услуги передачи данных (CSD) операторов сотовой связи. Качество шифрования зависит от версии ПО, которое покупает пользователь, поскольку комплекс VoiceCoderMobile выпускается в двух модификациях – Light и Strong. Версия Light построена с использованием криптографических преобразований с ограниченной длиной сеансовых ключей (128 разрядов для асимметричных алгоритмов шифрования и 39 разрядов для симметричных) [7,8]. Фактически она позволяет надежно защищать от нелегального подслушивания со стороны злоумышленников только ту информацию, ценность которой ограничена во времени, – расшиф-

ровать ее можно довольно быстро, современная техника это позволяет. Версия Strong построена на базе криптографических преобразований с 256-разрядным ключом и предназначена для более серьезной, но не тотальной защиты переговоров. Кстати, для ее распространения нужна специальная лицензия со стороны регулирующих органов (ФСБ). Поскольку для ее получения производитель обязан сдать копию ключей системы в органы государственной безопасности, использование VoiceCoderMobile, скорее всего, будет серьезно ограничено российскими представительствами иностранных компаний. В настоящее время цена производителя на эту систему варьируется от 20 до 40 рублей, в зависимости отеефнкциональности.

Еще одно решение предложила компания KoolSpan – это относительно дешевое решение, обеспечивающее защиту от прослушивания переговоров в сетях сотовой связи. Оно реализовано на карте формата microSD с интегрированной микросхемой TrustChip, аппаратно поддерживающей алгоритм шифрования AES с длиной ключа 256 бит, и может использоваться в любых мобильных устройствах – телефонах, смартфонах, коммуникаторах. Программа шифрования создает защищенный туннель между двумя терминалами, не требуя использования каких-либо публичных ключей или сертификатов (PKI, IKE, Keberos, SA и др.). Все необходимые идентификационные коды и криптоалгоритмы заключены в микросхеме TrustChip. По информации разработчика, проверка подлинности происходит в двух направлениях на уровнях устройства, сеанса связи и обмена пакетами, гарантируя невозможность перехвата трафика [12].

Одним из действующих программных решений массового рынка является KasperkyMobileSecurity 8.0. Компания «Лаборатория Касперского» объявила о выходе комплексного решения KasperskyMobileSecurity 8.0, предназначенного для защиты смартфонов. По достаточно претенциозному заявлению разработчика, новая версия KasperskyMobileSecurity 8.0 не имеет себе равных по уровню технологий и обеспечивает беспрецедентный уровень защиты от разнообразных угроз, встающих перед пользователями смартфонов. Например, с помощью технологии SMS-Find можно обнаружить точное местонахождение потерянного смартфона (если устройство поддерживает GPS). Если смартфон был утерян или украден, модуль «Антивор» позволяет дистанционно заблокировать доступ к смартфону или удалить все хранящиеся на нем данные, послав SMS с кодовым словом на номер потерянного устройства [9].

В случае если SIM-карта устройства была заменена похитителем, реализованный в KasperskyMobileSecurity 8.0 модуль SIM-Watch незаметно отправит владельцу сообщение с новым телефонным номером устройства. Также KasperskyMobileSecurity 8.0 позволяет создать секретную папку для особо важных документов: содержание этой папки шифруется, а доступ к ней осуществляется по паролю, заданному пользователем. Пока телефон активно используется, каждый раз вводить пароль для доступа в папку не нужно. Однако после определенного периода для доступа к секретной папке вновь потребуется пароль.

Модуль родительского контроля, реализованный в KasperskyMobileSecurity 8.0, позволяет ограничить звонки и SMS для телефона ребенка (например, на платные номера, сервисы для взрослых и т.д.) Если смартфон поддерживает GPS, упомянутая функция SMS-Find позволит родителям узнать, где находится их ребенок. KasperskyMobileSecurity 8.0 также содержит улучшенный модуль защиты от спама [11]. Спам-фильтр блокирует не только нежелательные сообщения, но и звонки, защищая пользователя от мошенников и от навязчивой рекламы. Новая версия программы может работать в режиме белого списка (принимаются звонки и сообщения только от разрешенных контактов) или в режиме черного списка (принимаются звонки и сообщения со всех номеров, кроме запрещенных).

Антивирусный сканер в KasperskyMobileSecurity 8.0 контролирует файловую активность в режиме реального времени, а также осуществляет антивирусную проверку всего устройства по требованию. Все опасные объекты удаляются или помещаются в карантин. Встроенный в KasperskyMobileSecurity 8.0 сетевой экран (файервол) защищает от атак хакеров и программ-червей, внедряющихся через Bluetooth и Wi-Fi [10].

На сегодняшний день практически не представлена комплексная защита речевой информации для государственных заказчиков и бизнес сегмента. Все средства защиты являются раз-

розненными и не способны предоставить комплексную защиту. В данной работе рассматривается создание частной закрытой мобильной сети для передачи речевой информации. Разработка предполагает создание защищенных абонентских терминалов, которые используют удобную абоненту информационную систему, включающую в себя программные средства защиты. Внедряемые абонентские терминалы будут использовать развивающуюся сеть VoiceLTE. Голосовые данные будут передаваться через зашифрованные пакеты и использовать сеть интернет. Безопасность будет обеспечена тем, что ключи шифрования будут храниться непосредственно на абонентских терминалах, а не на сервере, который можно взломать. После каждого успешного вызова ключи шифрования будут автоматически уничтожаться. Каждый абонентский терминал будет выдаваться конкретному сотруднику без права передачи. Для идентификации и аутентификации будут использоваться технологии распознавания отпечатка пальцев и распознаванию лица, аналогично технологиям, используемым в iPhone 8, X (TouchID, FaceID). Для безопасности вся криптографическая информация в абонентском терминале будет хранится на отдельном процессоре. ПО будет предоставляться с закрытым кодом. Каждая организация будет заказывать данные терминалы с программным обеспечением напрямую у разработчика в соответствии с требованиями отдельно взятой компании. Предполагаемое время внедрения в какую-либо локальную организацию, в соответствии с нуждами и потребностями отдельно взятой компании составляет около 2 месяцев.

В заключение можно сказать, что в рамках данной работы решается вопрос комплексной защиты речевой информации. В данной работы представлен проект, который объединяет все действующие методы программной и аппаратной защиты в единый комплекс. Данное решение поможет бизнес сегменту и государственному сегменту обеспечить должный уровень конфиденциальности речевой информации, при этом, не теряя доступность для конечного пользователя и обеспечивает должный уровень достоверности речевой информации

Список литературы

1. Концепция развития в России систем сотовой подвижной связи общего пользования на период до 2010 года, 2000 г.

2. Концепция информационной безопасности Сетей связи общего пользования Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации. Министерство Российской федерации по связи и информатизации. – М.-2002.

3. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. М.-2000.

4. Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации (СТР-К).–М.–2001.

5. Дмитриев В.И. Прогноз зон покрытия базовых станций сетей подвижной радиосвязи / В.И. Дмитриев // Электросвязь. М. -2000.-№ 3.-С. 18-20.

6. Звягин А.И. Планирование сетей сотовой связи на основе полевых измерений / А.И. Звягин // Мобильные системы. М — 2003.- № 6,— С. 10-13.

7. Никодимов И.Ю. Планирование сети GSM / И.Ю. Никодимов, М.П. Мансырев, С.П. Пономарев и др. // Электросвязь. М. -2000.-№ 3.-С.10-14.

8. Ризви А. Оптимизация сети GSM / А. Ризви // Мобильные системы. М.–2001. № 3. - С.21-23.

9. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко –Трендз, 2000. 240 с.

10. Материалы web-сайта //http:// www.signal-com.ru/ ЗАО «Сигнал-КОМ».

11. Журнал "Information Security" http://www.itsec.ru/newstext.php?news_id=54366.

12. Материалы web-сайта //http://www.businesspundit.com/ Обзор криптофонов.

D.A. Gleyberzon, A.V. Semashko

ANALYSIS OF PROTECTION METHODS OF SPEECH INFORMATION IN NET-WORKSMOBILE COMMUNICATION

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

The problem of ensuring the safety of voice information in networks mobile communication. The main threats to the security of verbal information are considered. An overview of the current methods of protection was given. A set of measures to protect voice information has been described.

Keywords: cellular communication systems, voice information, hardware solutions, software solutions, subscriber terminals, complex protection.

УДК 004.75

И.И. Галанин

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ

Первичная профсоюзная организация Нижегородской областной организации Профессионального союза работников народного образования и науки Российской Федерации в НГТУ (студентов)

В работе приводится описание технологии блокчейн, рассматриваются реальные примеры использования и описывается концепт системы квазинепрерывного голосования на основе цепочек блоков.

Ключевые слова: блокчейн; хеш; менеджмент; информация; принятие решений; общество.

В настоящее время в новостях ИТ, экономики, других различных направлений деятельности человека можно услышать термин «блокчейн» (blockchain). Наряду с курсами основных валют всё больше изданий в сети Интернет следят за курсом электронной валюты Bitcoin, основа которой – блокчейн.

В широком смысле блокчейн – выстроенная по определённым правилам непрерывная последовательная цепочка блоков (связный список, blockchain – «цепь блоков»), содержащих информацию. Чаще всего копии цепочек блоков хранятся и независимо друг от друга (чрезвычайно параллельно) обрабатываются на множестве разных компьютеров.

Первое и наиболее распространенное упоминание, описание технологии блокчейн, как и первое применение этого термина, опубликовано Сатоши Накамото в 2008 году при описании электронной «валюты» Bitcoin. Поскольку основой дальнейших изысканий на эту тему является именно оригинальная работа Накамото, будем придерживаться именно его терминологии и структуры этой полностью реплицированной распределенной базы данных. Стоит упомянуть, что блокчейн часто относят к транзакциям в различных криптовалютах, однако технология цепочек блоков может быть распространена на любые взаимосвязанные информационные блоки.

Идея цепочки блоков блокчейн основывается на принципах асимметричного шифрования и peer-to-peer (p2p), что по сути является т.н. хешчейном (hashchain) (рис. 1).

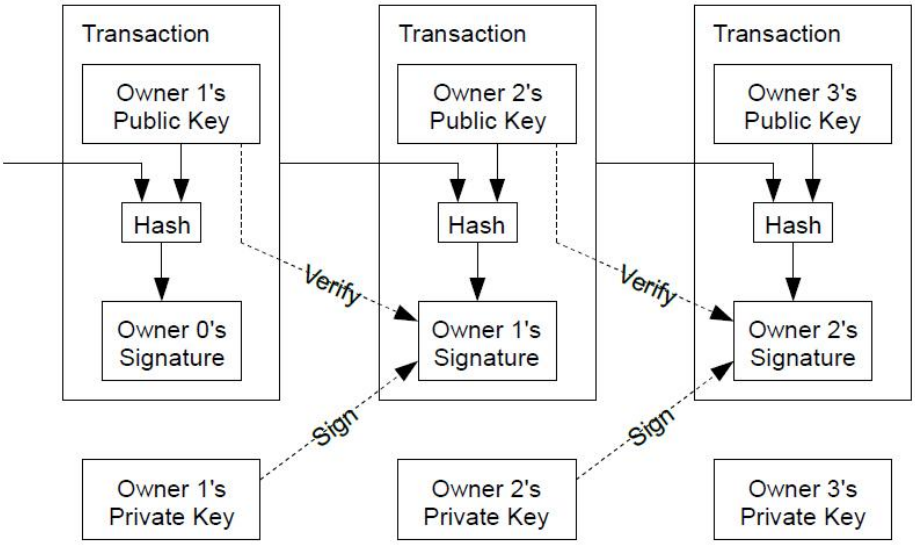


Рис. 1. Хешчейн

У каждого владельца данных (будь то пресловутый bitcoin или любая другая информация) имеются открытый и закрытый ключи, используемые для цифровой подписи транзакций как показано на рисунке 1. Хеш вычисляется от целой прошлой транзакции (блока), будучи включенным в новый блок, упрощенно это показано на рисунке 2.

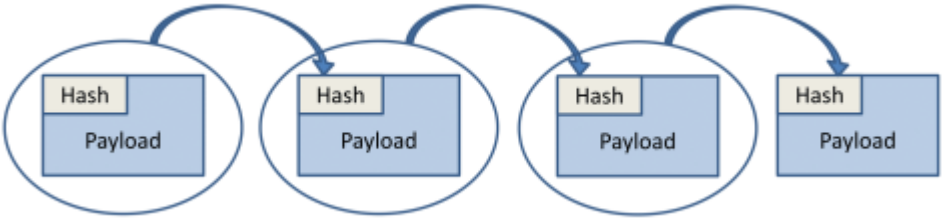


Рис. 2. Упрощенное изображение хешчейн

Здесь видно, что каждый блок состоит из хеша предыдущего и «полезной нагрузки» – payload. Пэйлоуд – полезные данные, в том числе, как видно из рисунка 1, подпись, открытый ключ владельца, а также данные транзакции. Важно понимать, что информация в payload имеет ценность.

Возникает проблема повторного использования (double-spending, «повторная трата»). Если мы что-то имеем и передаем это, то дважды отдать это у нас получиться не должно, но из-за того, что любые данные (как и файл) можно скопировать, в отличие от реального мира (где без определенных затрат мы не можем создать копию книги, изделия, монеты), эта проблема и возникает.

Возможны 2 варианта решения:

1. Единый доверенный центр, которых хранит данные обо всех транзакциях (самое распространенное решение на данный момент в DRM). Проблема этого варианта – судьба всей системы зависит от владельца этого доверенного центра (компании, человека), все данные о транзакциях хранятся только у него, и в силу различных возможных причин (взлом, изменение политики, давление со стороны третьих лиц) могут быть умышленно или непреднамеренно испорчены.
2. Информация о транзакциях должна быть известна всем узлам системы. Узлы договариваются о том, какая из транзакций верна и «закрепляют» её в общей базе. В этом случае транзакции хранятся распределённо. Этот принцип и используется в блокчейн.

Рассмотрим второй вариант решения более подробно.

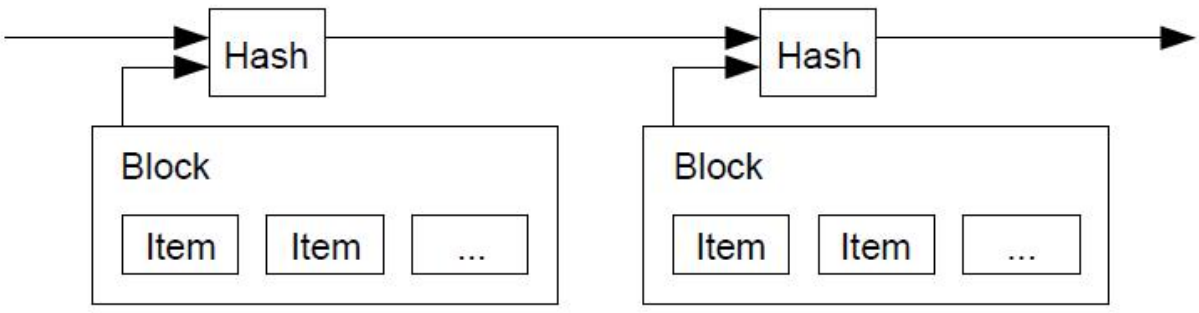


Рис. 3. Принцип работы Timestampserver

Для решения проблемы необходим сервер временной отметки (timestampserver). Его задача – взятие готового хеша блока, проставление ему временной отметки и публикация (раздача) всем участникам системы. Каждая «временная отметка» (timestamp) включает в свой

хеш предыдущую timestamp, тем самым создается цепочка, в которой каждое последующее «звено» подкрепляет предыдущие.

В качестве timestamp сервера используется распределенный сервер, основанный на доказательстве выполнения работы (proof-of-work), доказательство доли владения (proof-of-stake) или их гибриды. Строго говоря, описание сервера временной отметки – скорее описание системы криптовалюты, точнее конкретной реализации блокчейна, нежели блокчейна в общем смысле.

В сети Bitcoin глобальным хешчейном служит база данных распределенная среди многих компьютеров. Этот глобальный хешчейн содержит много внутренних хешчейнов представляющих некоторые ценные токены называемые биткоинами. Новые блоки, созданные на внутренних хейшчейнах, называются транзакциями, потому что они представляют изменения владельцев биткоинов. Владелец определенного биткоина создает новый блок на соответствующем внутреннем хешчейне и публикует этот блок как новую транзакцию, которую нужно включить в следующий блок внешнего хешчейна. Публикует – это значит рассылает всем другим участникам сети P2P Bitcoin. Как только новый блок внешнего хешчейна создан, он публикуется таким же образом.

Любой участник может создать новый блок для внешнего хешчейна включив в него опубликованные транзакции. Но это не просто. Для избежания хаоса все участники придерживаются определенного набора правил – протокола. И кто нарушает эти правила, тот игнорируется остальными. Протокол основан на трех принципах:

1. создание нового блока требует существенных вычислительных мощностей;
2. создание нового блока имеет награду, так что многие хотели бы потратить усилия на успешное создание нового блока; и
3. если случится ветвление, то самая длинная ветвь побеждает.

Первое условие требует, чтобы хеш, взятый из блока с некоторым случайным модификатором, начинался с определенным количеством нулевых битов. Так что случайный модификатор подбирается до тех пор, пока в результате не будет нужное количество нулевых битов. Это требование делает создание блока трудным.

С другой стороны, тот кто создал блок получает некоторое количество новоиспеченных внутренних хешчейнов представляющих ценность – биткоинов. Это тоже есть часть протокола. Более того, поскольку биткоины представляют в каком-то смысле валюту и внутренние хешчейны содержат транзакции в этой валюте, владельцы транзакций могут предлагать небольшую часть стоимости транзакции создателю нового блока глобального хешчейна. Таким образом, создатель нового блока получает новоиспеченные биткоины плюс все оплаты, собранные из транзакций, помещенных в блок.

Третье правило гарантирует только одну действующую копию базы данных, распределённую среди многих компьютеров. Очевидно то, что многие пытаясь создать блоки, создают их независимо разными. Поскольку распространение блоков не мгновенное, новые блоки могут быть созданы поверх независимо созданных блоков. Такая ситуация заставляет глобальный хешчейн ветвиться. Третье правило определяет одну самую длинную ветвь верной. Это правило работает без проблем, так как создание блоков занятие трудное, а значит вероятность что две или более ветви выживут падает очень быстро.

Мы видим, что внешний хешчейн играет роль центрального хранилища реально заменяя авторитарный орган. Поскольку внешний хешчейн глобальный, он хранит элементы внутренних хешчейнов однозначно и надежно связывая токены с их владельцами, в то же время делая невозможным «двойную оплату». База данных внешнего хешчейна распределена среди многих не доверяющих друг другу сторон. Это исключает возможность обязать все сообщество таких сторон следовать некоторому внешнему предписанию, такому как политический закон.

Итого структура блокчейн может быть представлена как на рисунке 4.

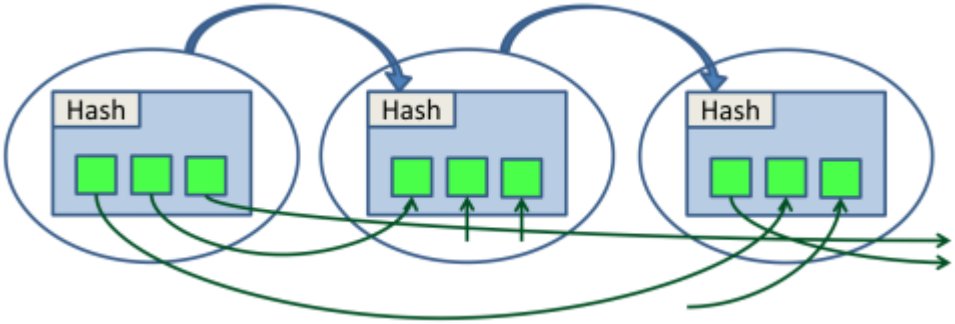


Рис. 4. Блокчейн

Также важно понимать, что первый блок в цепочке принимается всеми участниками как есть, то есть все участники совместно соглашаются о содержимом первого блока.

Некоторые исследователи проводят классификацию блокчейна. В одном из недавних исследований компания BitFury приводит следующую классификацию:

Открытый блокчейн (англ. public blockchain) – блокчейн, в котором не существует ограничений на чтение данных блоков (при этом данные могут быть зашифрованы) и ограничений на отсылку транзакций для включения в блокчейн.

Закрытый блокчейн (англ. private blockchain) – блокчейн, в котором прямой доступ к данным и к отправке транзакций ограничен определенным узким кругом организаций.

Общедоступный (инклюзивный) блокчейн (англ. permissionless blockchain) – блокчейн, в котором не существует ограничений на личность обработчиков транзакций (т.е. пользователей, которые могут создавать блоки транзакций).

Эксклюзивный блокчейн (англ. permissioned blockchain)– блокчейн, в котором обработка транзакций осуществляется определенным списком субъектов с установленными личностями.

Первое и самое известное применение – конечно же, криптовалюты. Bitcoin, Ethereum и подобные. Различия в типах используемых структур данных, то есть в том, в каком виде представлена информация. Например, в системе Bitcoin используются деревья Меркла.

В настоящее время множество финансовых организаций (вплоть до банков и международной системы SWIFT) рассматривают возможность применения блокчейна в своей работе.

Блокчейн используется уже в таких областях, как: энергетика, авторство и право владения, управление данными, алмазная индустрия, средства электронного голосования, организация частного и государственного управления, интернет вещей. Кроме того, многие исследователи рассчитывают, что данная технология может быть использована в медицине, юридической и нотариальной практике. Еще одним применением можно считать принятие решений.

Одним из методов принятия решений является голосование. Традиционное голосование не является обратимым, то есть в любом случае для изменения решения необходимо устраивать новую процедуру. Это достаточно ограничивает гибкость данного подхода, притом, что используется он во многих ситуациях. Блокчейн позволяет нивелировать данный недостаток. В случае использования данной технологии возможен квазинепрерывный процесс голосования – в случае изменения решения о, например, поддержке какой-либо инициативы, проекта (в следствие различных факторов и даже во время реализации), есть возможность открыто переголосовать – за счёт особенностей блокчейн невозможна «подделка» голосов, существенно уменьшается возможность принятия решений под давлением и на основе эмоций (даже если изначальное решение будет принято, то со временем возможно изменение расклада, свойство получившейся системы – автокоррекция ошибочных решений). Стоит отметить, что область применения описанной в тексте системы недостаточно широка на данный момент. Хотя многие уже существующие задачи, в том числе и статистические, можно реализовывать уже сейчас.

Используя открытый блокчейн возможен мониторинг в реальном времени изменения отношения к той или иной проблеме в обществе или в кругах экспертов. Возможно динамическое распределение средств фондов и финансовых потоков обществом и широкими слоями населения.

Выводы

Блокчейн как технология может быть использован практически в любой сфере деятельности человека. Это перспективное направление ограничено лишь нашей фантазией и креативностью, ведь это универсальный инструмент. Система, описанная в статье должна помочь в прозрачности распределения некоммерческих фондов и повышению причастия общества к распределению их средств.

Библиографический список

1. **Satoshi Nakamoto**. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. — 2008. — 9 с.

I.I. Galanin

POSSIBILITIES OF BLOCKCHAIN APPLICATION IN DECISION-MAKING

Primary trade-union organization of the Nizhny Novgorod regional organization of Labor union of workers of national education and science of the Russian Federation in NSTU (students)

The article presents the description of blockchain. Real application examples of blockchain are given. The concept of a quasicontinuous polling platform is described.

Key words: blockchain; hash; management; information; decision-making; society.

УДК 654.05

А. В. Семашко, Н.А. Новоселов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им.Р. Е. Алексеева

Определение занимаемой полосы сигнала – это одна из операций при решении задачи радиомониторинга. Большинство разработанных методов по оценке занимаемой полосы для случая канала с аддитивным белым Гауссовским шумом дают высокую точность оценки полосы, однако, в случае наличия замираний в канале, точность снижается. В данной работе рассмотрены основные технические характеристики, структура, преимущества и недостатки систем связи с ортогональным частотным уплотнением. Описаны дальнейшие этапы исследования каналов с ортогональным частотным уплотнением

Ключевые слова: OFDM, ортогональное частотное мультиплексирование, межсимвольная интерференция, помехоустойчивость, беспроводный доступ, аддитивный гауссовский шум.

Передача сообщений на расстояние – основная задача электротехники. Новые поколения портативных устройств, позволяющих использовать мультимедийные услуги, такие как передача речи, данных, аудио-видеоинформации требуют новые эффективные, и в то же время недорогие телекоммуникационные сети. В последнее десятилетие практически все сферы жизни пользуются услугами систем передачи данных. Поэтому при передаче нескольких потоков сообщений для одного или нескольких пользователей необходимо решить задачу множественного доступа к среде. Наиболее распространёнными являются такие методы решения этой задачи, как частотное разделение (FDMA) (на каждого абонента выделяется свой диапазон частот), временное разделение (TDMA) (для каждого абонента выделяется своё время доступа к среде передачи) и кодовое разделение (CDMA).

В данной работе рассматриваются общие методы приема и передачи OFDM (OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing) сигналов.

В связи с развитием в последнее время систем радиосвязи, вычислительных систем и методов цифровой обработки сигналов набирает популярность применение OFDM модуляции в самых различных системах. Ортогональное частотное мультиплексирование, обозначаемое аббревиатурой OFDM) и его модификации: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access - ортогональное частотное разделение с мультиплексированием доступа) и SOFDMA (Scalable OFDMA - масштабируемое OFDMA) – основаны на передаче потока входных данных, который делится на несколько параллельных потоков, каждый из которых передается на разной несущей (ортогональной) частоте колебаний.

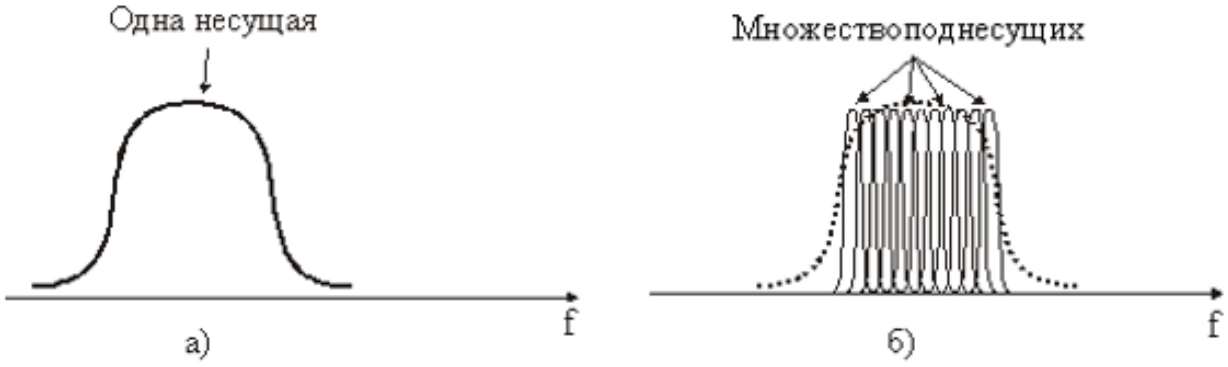


Рис. 1. Спектр радиосигнала с одной несущей (а) и OFDM (б)

Ортогональность поднесущих позволяет на приёмной стороне системы связи выделить каждую поднесущую из суммарного сигнала даже в случае частичного перекрытия полос их спектров.

Технология множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов считается одним из перспективных видов сигнально-кодовых конструкцийи позволяет повысить скорость передачи информации без увеличения занимаемой полосы частот или уровня модуляции и надежность в условиях межсимвольной интерференции для устойчивостик многолучевому распространению. Поэтому OFDM применяется во многих современных системах беспроводной связи, например, таких, как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и IEEE 802.16 (WiMAX), системах типа "интеллектуальный дом", а также проводная ADSL.

Высокая спектральная эффективность технологии OFDM обеспечивается достаточно близким расположением частот соседних поднесущих колебаний, которые генерируются совместно так, чтобы сигналы всех поднесущих были ортогональны. Это достигается благодаря использованию обратного преобразования Фурье с применением быстрых алгоритмоф(ОБПФ) в передатчике и прямого быстрогопреобразования Фурье (БПФ) в приемнике, которые могут быть достаточно просто реализованы методами цифровой обработки сигналов. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольные искажения.

Основными преимуществами метода OFDM являются:

1. Сравнительно простая реализация методами цифровой обработки;
2. Способность противостоять сложным условиям в радиоканале, устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами. Как следствие – лояльность к многолучевому распространению;
3. Возможность использования различных схем для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала.

Недостатками метода являются:

1. Необходимость высокоточной синхронизации и по времени и по частоте;
2. Снижение эффективности метода из-за использования защитных интервалов;
3. Чувствительность метода к эффекту Доплера;
4. OFDM демонстрирует очень высокий пик средней мощности;
5. Чрезмерные энергетические затраты, связанные с неидеальностью современных приемников и передатчиков.

Несмотря на все недостатки, OFDM является удачным решением для архитектур современных сетей радиосвязи, работающих в условиях мегаполиса. Технический прогресс и динамика рынка постоянно толкают производителей совершенствовать существующие технологии. В результате появляются устройства, использующие в своей основе различные модификации OFDM.

Важнейшим отличием OFDM технологии от простого разделения радиосигнала по нескольким параллельным частотным каналам является ортогональность поднесущих в групповом спектре OFDM сигнала. Физический смысл ортогональности заключается в подмешивании в структуру каждой поднесущей специальной метки - определенного уникального количества синусоидальных колебаний сигнала, различающихся по фазе на 90 град. (ортогональных функций), позволяющего демультиплексору на основе анализа данных меток разделять поднесущие сигналы даже в случае частичного перекрытия их частотных спектров. Выделение несущих в общем спектре обычного многоканального сигнала вследствие ограниченных технологических возможностей современных полосовых частотных фильтров требует достаточно большого частотного разноса несущих, что ограничивает увеличение их количества в заданной полосе частот. Выделение несущих в групповом спектре OFDM сигнала при демультиплексировании производится с помощью ортогональных преобразований сигналов. Это допускает возможность перекрытия спектров соседних поднесущих, что позволяет значительно увеличить частотную плотность их размещения в спектре сигнала и повысить спектральную эффективность.

Отметим, что длинные символьные периоды только уменьшают вероятность возникновения межсимвольной интерференции, а не устраняют ее полностью. Чтобы максимально уменьшить межсимвольную интерференцию используется циклический префикс. Циклический префикс – это повторение части символа, которая добавляется в его начало. Он представляет собой копию фрагмента полезного сигнала, таким образом некоторый фрагмент начала символа OFDM такой же, как и в конце символа. Это гарантирует сохранение ортогональности поднесущих (но только в том случае, если отраженный сигнал при многолучевом распространении задержан не больше, чем на длительность циклического префикса). Кроме того, циклический префикс позволяет выбрать окно для преобразования Фурье в любом месте временного интервала символа.

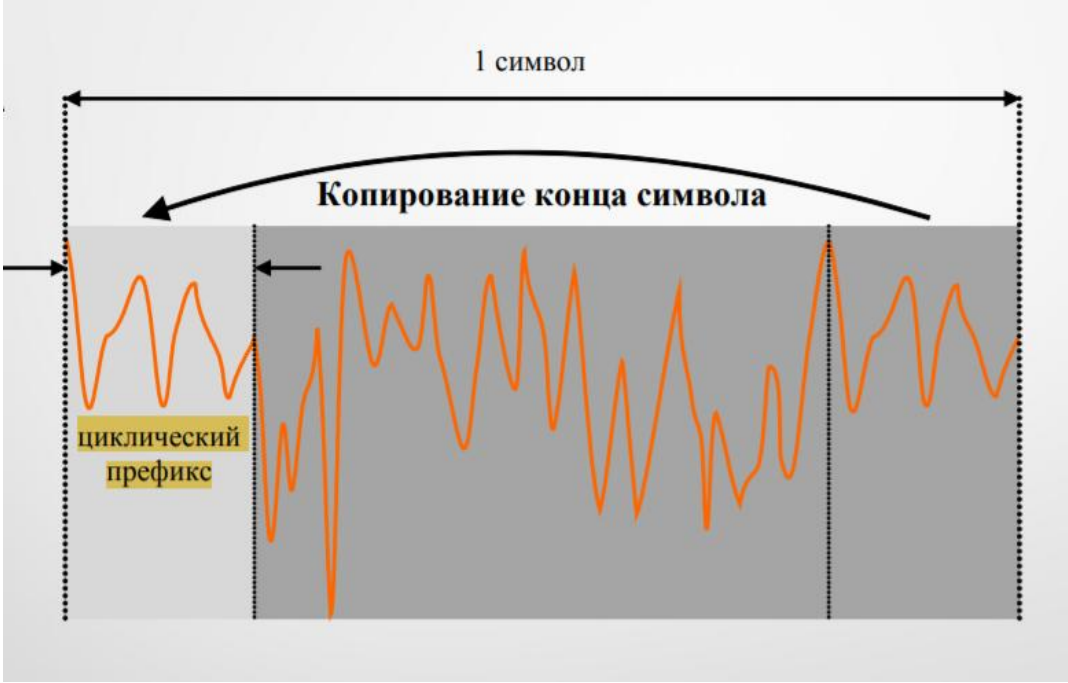


Рис. 2. Циклический префикс

Кодированный битовый или символьный поток подвергается перемежению. Окончательная форма сигнала представляет собой поток с перемежением как по времени, так и по частоте. Частотное перемежение подразумевает размещение битовой последовательности на некоррелированных (не соседних) несущих, так что это не влияет на скорость передачи данных. Временное перемежение представляет собой размещение отдельных бит последовательности на различных OFDM-символах. Следовательно, для каналов с быстрым замиранием эти биты подвержены различным канальным ослаблениям. Однако для каналов с медленным ослаблением перемежение по времени не эффективно и, как правило, не используется.

В данной работе представлена разработка модели системы передачи сигналов с ортогональным частотным уплотнием каналов и исследование ее характеристик. Основными трудностями при разработке представляются тщательное согласование шагов в модуляторе и демодуляторе и контроль формата и размера данных в течение всего процесса моделирования.

В докладе предложен и практически реализован алгоритм обработки OFDM сигнала, исключающий искажения ограничения сигнала и приводящий к выигрышу в шумах квантования по сравнению с классическим оптимальным равномерным квантователем Ллойда-Макса.

В работе исследуются принципы работы систем, использующих фазовую манипуляцию, а также технологию OFDM. Анализируется помеховая ситуация в неоднородных сотовых сетях с переключением абонентских соединений между базовыми станциями разных типов. Рассматриваются варианты разработки модели системы передачи сигналов в среде MATLAB.

Библиографический список

1. Ковалев В. В., Селецкая О. Ю., Покаместов Д. А. Формирование и обработка OFDM сигналов // Молодой ученый. – 2016. – №14. – С. 151-154. – URL https://moluch.ru/archive/118/32800
2. Галустов Г.Г., Мелешкин С.Н. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 80 с.
3. Надымов А.В. Использование OFDM-модуляции в мобильных средствах связи // Автоматика, электроника и средства связи. – 2012. – С. 226-229.
4. Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX: Учебное пособие / Рашич А.В.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 179 с.
5. Иванов Ю.А., Невструев И.А. Структура и помехоустойчивость систем беспроводного доступа с OFDM // Электротехнические и информационные комплексы и системы №3, т.5, 2009 г. – С. 25-29
6. М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов, Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. – 2016

A.V. Semashko, N.A. Novoselov

MODELING OF THE DATA TRANSFER SYSTEM WITH ORTHOGONAL FREQUENCY CHANNEL SEPARATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The definition of signal bandwidth is an important step in solving the problem of radio monitoring. Most of developed methods for signal bandwidth definition in case of a channel with additive white Gaussian noise gives high estimation accuracy, however, if there is fadings in the channel, the accuracy decreases. In this paper the main technical characteristics, structure, advantages and disadvantages of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) of signals are considered. Further stages of investigation of channels with orthogonal frequency multiplexing are described.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, intersymbol interference, coding, wireless access, additive white Gaussian noise.

УДК 004.056.53

А.В. Семашко, И.В. Николышин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЦЕПОЧКИ ТРАНЗАКЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Исследование факта фиксирования проведения транзакции, дающее возможность в любой момент просмотреть выполнение всей операции и что данные не были модифицированы сторонними людьми.

Методы исследования: Аналитический исследование алгоритмов с математическими данными, специальные криптографические методы.

Результаты: Реализован алгоритм работы цепочки блоков. Для того, чтобы поменять информацию в одном из блоков, необходимо модифицировать всю цепочку блоков, начиная с того, в котором были внесены первые изменения.

Выводы: Предложенный алгоритм показывает, что вероятность генерации блока пропорциональна количеству средств на счетах потенциальных создателей нового блока. Это намного более энергоэффективно и связывает ответственность за надёжность и корректность генерации новых блоков с размером капитала.

Ключевые слова: транзакция, алгоритмы расчета блоков.

Актуальность

Традиционные транзакции, характеризуются четырьмя классическими свойствами: атомарности, согласованности, изолированности, долговечности (ACID). В реалиях современного мира необходима прозрачность проводимых транзакций и многократное копирование всех транзакций. В системах с цепочкой транзакций есть три группы действующих лиц: источники событий (транзакций), источники блоков (фиксаторы транзакций), получатели (читатели) блоков.

В результате у любого из участников процесса будут данные о каждом шаге всех партнеров. За счет этого свойства, можно утверждать, что данные находящиеся под защитой, не были модифицированы сторонними людьми и отсутствует централизованный центр, от которого будет появляться зависимость, но при этом у всех пользователей должен быть разный доступ к данным файлам. Кто-то может лишь наблюдать и просматривать список файлов в каждой папке. А кто-то (адресат конкретного файла) может скачивать данные себе. Причем никто другой не сможет получить доступ к файлу – только тот, кому он предназначался. Также один из главных плюсов такой системы – возможность зафиксировать за определённую сумму любую информацию, важную Вам.

В результате в докладе необходимо выделить, что основным требованием к цепочке транзакций является невозможность модификации журнала: после добавления транзакции в журнал, должно быть невозможно её оттуда удалить или изменить. Данная тема позволит выиграть время совершения операций, так как. увеличивается количество точек, которые обрабатывают этот процесс, т.е. произойдет распределение вычислительных ресурсов.

Сложность

Основной сложностью защиты информации методом цепочки транзакций являются: «тяжелые» алгоритмы с математическими данными, специальные криптографические методы и тысячи компьютеров, включенных в специальную систему, между которыми происходит распределенный обмен данными. Таким образом, этот метод содержит историю владения, с которой можно ознакомиться. Он формируется как непрерывно растущая цепочка блоков с записями обо всех транзакциях. Копии базы или её части одновременно хранятся на множестве компьютеров и синхронизируются согласно формальным правилам построения цепочки транзакций. Информация в блоках не шифрована и доступна в открытом виде, но отсутствие изменений удостоверяется через хэш-цепочки. Возникает ситуация многократной траты расчета одного и того же блока. Для того чтобы решить эту проблему используются метки времени. Главный момент в работе такой

системы – факт фиксирования проведения транзакции, что даёт возможность в любой момент просмотреть выполнение всей операции с начала.

Каждый участник может взять набор транзакций, ожидающих включения в журнал, и сформировать новый блок. Но нельзя просто так взять и сформировать блок в децентрализованных системах. Надёжность таких систем основывается именно на том, что новый блок нельзя сформировать быстрее чем за определённое время.

Пути решения

Необходимо снабдить каждый блок хеш-суммой от его содержимого. И эту хеш-сумму включить в качестве дополнительной полезной информации (тоже хешируемой) в следующий блок. Тогда для того, чтобы поменять что-то в блоке без разрушения доверия клиентов к нему, нужно будет это сделать таким образом, чтобы хеш-сумма от блока не поменялась. Данное действие практически невозможно, если используется криптографически стойкая хеш-функция. Либо поменять в том числе и хеш-сумму блока. Но тогда придётся менять и значение этой хеш-суммы в следующем блоке. А это потребует изменений, в свою очередь, в хеш-сумме всего второго блока, а потом и в третьем, и так далее. В результате, чтобы поменять информацию в одном из блоков, необходимо модифицировать всю цепочку блоков, начиная с того, в котором были внесены первые изменения.

В данной работе рассмотрены три пути решения указанной проблемы в подобных системах. Защищаться от возможности перегенерации цепочки блоков можно с помощью:

- централизации с доверенным центром,
- централизации с недоверенным центром,
- децентрализованный вариант с использованием доказательства работы.

Централизация с доверенным центром

Если есть доверенный центр, то ему поручается через определённый промежуток времени (или через определённый набор транзакций) формировать новый блок, снабжая его не только хеш-суммой, но и своей электронной подписью. Каждый клиент системы имеет возможность проверить, что все блоки в цепочке сгенерированы доверенным центром и никем иным. В предположении, что доверенный центр не скомпрометирован, возможности модификации журнала злоумышленником нет.

Централизация с недоверенным центром

Выделенный центр не является полностью доверенным, Доверие состоит только в плане фиксации транзакций в журнале, при этом должна быть уверенность, что выделенный центр не перегенерирует всю цепочку блоков, удалив из неё ненужные ему более транзакции или добавит нужные. Для этого можно использовать, например, следующие два метода.

Первый метод основан на использовании дополнительного доверенного хранилища. После создания очередного блока центр должен отправить в доверенное и независимое от данного центра хранилище хеш-код от нового блока. Доверенное хранилище не должно принимать никаких изменений к хеш-кодам уже созданных блоков. В качестве такого хранилища можно использовать и децентрализованную базу данных системы, если таковая присутствует. Размер хранимой информации может быть небольшим по сравнению с общим объёмом журнала.

Второй возможный метод состоит в дополнении каждого блока меткой времени, сгенерированной доверенным центром временных меток. Такая метка должна содержать время генерации метки и электронную подпись центра, вычисленную на основании хеш-кода блока и времени метки. В случае, если «недоверенный» центр захочет перегенерировать часть цепочки блоков, будет наблюдаться разрыв в метках времени.

Стоит отметить, что этот метод не гарантирует, что «недоверенный» центр не будет генерировать сразу две цепочки блоков, дополняя их корректными метками времени, а потом не подменит одну другой.

Децентрализованный вариант с использованием доказательства работы

Механизм основывается на следующей идее. Пусть есть криптографически стойкая хэш-функция $h(x)$ и задан некоторый параметр t. $0<t<2^n$ -где n размер выхода хэш-функции в битах. Корректным новым блоком будет признаваться только такой, значение хэш-суммы которого меньше текущего заданного параметра. В этом случае алгоритм работы выглядит следующий образом:

1. Собрать из пула незафиксированных транзакций те, которые поместятся в первый блок.
2. Добавить в блок информацию о предыдущем блоке.
3. Добавить в блок информацию о себе (как об авторе блока и установить некоторое действие.

Для каждой итерации цикла вероятность получить корректный блок равна $t/2^n$. Пользователям нужно сделать большое количество итераций цикла, чтобы найти нужный. При этом только один из найденных блоков будет считаться корректным. Чем больше вычислительная мощность конкретного пользователя, тем больше вероятность, что именно он первым сумеет найти нужный. Зная суммарную вычислительную мощность сети, участники могут договориться о таком механизме изменения параметра, чтобы время генерации нового корректного блока было примерно заданное время. Это позволяет адаптировать сеть к изменению количества участников, их вычислительных мощностей и к появлению новых механизмов вычисления хэш-функций. Кроме задания параметра можно оперировать другими величинами, так или иначе относящимися к мощности вычислений:

- *Hashrate* — количество хешей, которые считают за единицы времени.
- *Difficulty* – сложность поиска корректного блока.

В случае примерно одновременной генерации следующего блока двумя и более участниками в направленном графе блоков происходит разветвление. Далее каждый выбирается один из новых блоков и пытается сгенерировать новый блок на основе выбранного, продолжая «ответвление» в графе. В результате одна из двух таких цепочек становится основной. В случае нормального поведения системы на включение конкретных транзакций в блоки данное действие влияет мало, так как каждый добросовестных участник следует одному и тому же алгоритму включения транзакций в блок. Однако можно предположить, что какой-нибудь злоумышленник захочет модернизировать что-либо, включая или не включая в блоки транзакции по своему выбору.

Предположим, что доля вычислительных ресурсов злоумышленника (направленных на генерацию нового блока) $0 <P< 0{,}5$. В этом случае каждый следующий сгенерированный блок с вероятностью P будет сгенерирован мощностями злоумышленника. Это позволит ему включать в блоки те транзакции, которые другие участники включать не захотели.
Но это все равно не позволит злоумышленнику не включать что-то в цепочку транзакций, потому что после его блока с вероятностью $(1-P)$ будет следовать блок обычного пользователя, который включит все транзакции в свой блок. Однако ситуация меняется, если мощности злоумышленника составляют более 50% от мощности сети. В этом случае, если после блока злоумышленника был с вероятностью $(1-P)$ сгенерирован обычный блок, злоумышленник его может просто проигнорировать и продолжать генерировать новые блоки. Получается, что злоумышленник сможет по своему желанию включать или не включать транзакции в цепочки. Пользоваться чужими деньгами злоумышленник всё равно не сможет, так как все блоки транзакций проверяются на внутреннюю непротиворечивость и корректность всех включённых в блок транзакций.

Направления дальнейших исследований

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке формализованной модели зашиты информации в транзакциях, которая обеспечила бы надежность и защищенность данных на новом уровне, что позволило бы повысить качество и эффективность бизнес-

процессов и сократить потери связанные с этим. Дальнейшие исследования будут основываться на главных преимуществах – открытости, защищенности и безопасности. Данный способ защиты станет хорошей опорой для любых сервисов, где пользователи могли переживать о возможном мошенничестве или о сохранности данных. Возможно использование в сфере (микроплатежей, банковских операций, логистики, юриспруденции, медицины). Кроме концепции доказательство работы в дальнейшем необходимо рассмотреть и другие. Например, такую как подход доказательство доли владения.

Вероятность генерации блока пропорциональна количеству средств на счетах потенциальных создателей нового блока. Это намного более энергоэффективно и связывает ответственность за надёжность и корректность генерации новых блоков с размером капитала (чем больше у нас средств, тем меньше мы хотим подвергать опасности систему). С другой стороны, это даёт дополнительную мотивацию концентрировать больше капитала в одних руках, что может привести к централизации системы.

Библиографический список

1. http://www.bmstu.ru/master/news/?newsid=4539 [Электронный источник]
2. https://mining-cryptocurrency.ru/blockchain [Электронный источник]
3. http://www.bmstu.ru/mstu/info/bauman-news/?year=2017&type=news&category_id=972 [Электронный источник]
4. http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Блокчейн_(Blockchain) [Электронный источник]
5. http://edu.bmstu.ru/napravleniya-obucheniya/informacionnaya-bezopasnost/blockchain [Электронный источник]
6. https://blockchainfounder.ru/ [Электронный источник]
7. https://habrahabr.ru/post/335994/ [Электронный источник]

A.V. Semashko, I.V. Nikolyshin

MODELING PROTECTION PROCEDURES INFORMATION BASED ON CHAINS OF TRANSACTIONS

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

Purpose: An investigation of the fact of fixing transactions, giving the opportunity at any time to view the performance of the entire operation and that the data were not modified by third-party people.

Research methods: Analytical analysis of algorithms with mathematical data, special cryptographic methods.

Results: The algorithm of the chain of blocks is implemented. In order to change the information in one of the blocks, it is necessary to modify the whole chain of blocks, starting with the one in which the first changes were made.

Conclusions: The proposed algorithm shows that the probability of generating a block of a proportional sum of funds on the accounts of the creators of a new block. This is more effective energy efficient and binds responsibility for reliability and correctness.

Keywords: transaction, algorithms for calculating blocks.

УДК 004.4

А.С. Прихунов, А.В. Семашко

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье приведены основные аспекты существующих систем электронного голосования, их достоинства и недостатки. Представлены четыре группы рисков, связанные с дистанционным способом отправки голоса. Рассмотрен способ организации системы электронного голосования на основе технологии блокчейн, с генерацией бюллетеня, содержащий секретный ключ.

Ключевые слова: блокчейн, электронное голосование, цепочка блоков, Ethereum, смарт контракт.

Избирательная система органов власти представляется одной из важнейших составляющих жизнедеятельности современного цивилизованного государства. Деятельность любой избирательной системы неотделима от масштабного использования информационных технологий. За время существования многих избирательных систем сложились и полностью устоялись процессы, которые происходят в них. Благодаря этому, можно весьма четко составить представление роли и месте автоматизации в избирательных процессах, о функциях, которые будут присутствовать в информационной системе, которая поможет организовать должным образом проведение голосований [1].

Подведение итогов нередко заканчивалось громкими скандалами, связанными с фальсификацией итогов голосования. В связи с такой проблемой резко увеличилась популярность технологий электронного голосования. Однако существует ряд рисков, некоторые из которых связаны с несовершенством технологии дистанционного электронного голосования в области защиты информации и с доверием избирателей к процедуре дистанционного электронного голосования. Изменение результатов голосования зачастую связано с традиционным способом хранения данных, которые находятся на централизованном сервере. Создание полностью автоматизированной системы электронного голосования на сегодняшний день мешает стереотип мышления о уязвимости данных, полученных в результате проведения голосования [1,2].

В современном мире криптография играет важную роль в защите информации от несанкционированного доступа. Она стала основным инструментом, который позволяет добиться безопасной авторизации, конфиденциальности информации и доверие ее третьим лицам, а также корпоративную безопасность. Сейчас криптография используется во многих отраслях, среди них в первую очередь электронный документооборот и электронная коммерция. В процессе развития компьютерных технологий, криптография совершила колоссальный прорыв в развитии. Проблема обеспечения безопасности электронного голосования вызвана в первую очередь несовершенством самой технологической базы всех электронных систем, а также отсутствием единого подхода и универсальных требований к качеству и безопасности самих систем дистанционного электронного голосования, так как они все построены на современной криптографии [3].

В настоящее время активно развиваются технологии дистанционного электронного голосования, которые позволяли бы проводить опросы через сеть Интернет или другую информационно-коммуникационную сеть. На сегодняшний день опыт попытки создания полностью автоматизированных систем электронного голосования существует у многих стран мира.

Электронное голосование – термин, определяющий различные виды голосования, охватывающий как электронные средства голосования (электронная демократия), так и технические электронные средства подсчёта голосов. Электронное голосование хоть и имеет ряд преимуществ перед традиционным, однако без недостатков оно тоже не осталось. Проблемы, связанные с дистанционным голосованием можно разделить на четыре основных группы.

1) риски, связанные с необходимостью обеспечения важнейших принципов избирательного права;
2) риски доверяя избирателей к процедуре голосования в дистанционных системах;
3) риски не совершенства технологии защиты электронного голосования, а также проблема сложности процедур самого голосования;
4) риски, связанные с технической реализацией проекта [4].

Проблемы, относящиеся к первой группе, связаны в первую очередь с правильной аутентификации избирателя в системе. Существует несколько вариантов, которые рассматривались в качестве идентификации каждого избирателя. К ним относится и голосование с помощью мобильного телефона, активно используемое в телешоу. Однако такой способ не гарантирует того, что голосующим окажется именно тот человек, которому принадлежит SIM карта. Существует вариант и с электронной картой, которая выдается каждому избирателю перед голосованием. Карта содержит специальный электронный ключ, который и является идентификатором каждого избирателя в этой системе. Такой способ требует создания заранее сгенерированных ключей, для дальнейшего их внедрения в электронные карты, что подразумевает собой длительное их хранение. Это резко увеличивает риски кражи ключей с сервера.

Проблемы второй группы относятся к сомнению людей к дистанционным системам голосования. Люди не знакомые с принципами работы таких систем, могут попросту ей не доверить свой голос. Согласно опросу, проведенному среди жителей России лишь 34% россиян относится положительно к идее электронного голосования, почти половина (48%) негативно отнеслась к такому внедрению (среде них 70% люди пожилого возраста), остальные имеют нейтральное мнение [2]. Однако почти все современное поколение имеет и пользуется доступом в сеть Интернет, поэтому вопрос об удобстве использования всеми избирателями таких систем лишь вопрос времени.

Риски третьей группы описывают проблему, связанную с отсутствием возможности контроля и наблюдения за процессом голосования. Препятствием также является и сложность процесса голосования, с помощью таких систем, которые требуют дополнительной информационно-разъяснительной работы. Также встает вопрос о защите полученных данных, который тесно связан с возможностью отслеживания учтенного голоса.

Проблема обеспечения безопасности электронного голосования, относящаяся к четвертой группе рисков вызвана в первую очередь несовершенством самой технологической базы всех электронных систем, а также отсутствием единого подхода и универсальных требований к качеству и безопасности самих систем дистанционного электронного голосования.

Положительная сторона системы электронного голосования заключается не только в оперативности и достоверности содержащейся информации, а также в качестве дополнительного средства инструментального контроля за деятельностью соответствующих избирательных комиссий при подсчёте голосов избирателей и определении результатов голосования.

Электронное голосование в первую очередь рассчитано на дистанционное участие в опросах и выборах. На сегодняшний день существует множество сервисов для проведения опросов и голосований. Однако ни один из них не может гарантировать отсутствия фальсифицированных голосов или даже фальсификации всего результата голосования.

Система электронного голосования, основанная на технологии блокчейн, может надежно хранить поступившие голоса в цепочке блоков, что могло бы гарантировать достоверность отданного голоса избирателя. Учитывая математическую сложность генерации хеша каждого блока, можно представить, сколько бы потребовалось вычислительной мощности для того чтобы подменить один блок с транзакциями, в тот момент, когда за ним уже находятся несколько подряд идущих блоков, при этом количество блоков, в момент вычисления также продолжает расти.

При создании децентрализованного приложения необходима разработка дополнительных программных модулей, которые будут позволять ему взаимодействовать с блокчейном. При

этом важно осуществлять проверку данных непосредственно в смарт-контракте, исходный код которого невозможно изменить.

Предложенная нами система использует блокчейн сети Ethereum. Платформа Ethereum позволяет создавать смарт контракты – компьютерный алгоритм, который дает возможность заключить сделку в технологии блокчейн.

Система электронного голосования на основе технологии блокчейн представляет собой онлайн портал, на котором часть пользователей могу создавать процедуру голосования, организовывать выборы или опросы, а другая часть участвовать в соответствующих мероприятиях. Первую часть пользователей будет называть организаторами голосования, а вторую голосующие или избиратели. Система устроена таким образом, что все данные, которые поступают в нее, отправляются непосредственно в блокчейн благодаря смарт контракту. Для этого требуется разработать соответствующий контракт и поместить его в блокчейн сети Ethereum, для дальнейшего его использования.

Контракт представляет собой программный код, структура которого позволяет организовывать хранение данных в виде списка структур. Одной из таких структур является структура голосования. В ней записывается вся основная информация, а именно: название, дата начала проведения, дата окончания, а также секретные ключи избирателей, которые в дальнейшем позволят им принимать участие в данном голосовании. Для взаимодействия смарт контракта с онлайн порталом был спроектирован модуль их взаимодействия, который позволяет вводимые данные пользователем отправлять в блокчейн.

Так как пользователю предстоит использовать сеть Ethereum, ему необходимо иметь в ней адресное пространство, которое можно получить простой регистрацией прямо на онлайн портале. Помимо регистрации в сети Ethereum пользователю требуется быть авторизированным в самой системе электронного голосования. Все операции, которые затрагивают данные, находящиеся в смарт контракте будут требовать повторного введения пароля от аккаунта в сети Ethereum, при этом повторный ввод пароля от учетной записи на онлайн портале от пользователя не требуется. Это характерная черта всех блокчейнов, которые таким образом подтверждают личность пользователя. Авторизация здесь называется разблокировкой, которая осуществляется на определенное количество времени, необходимое для совершения транзакции. В данной системе под транзакциями мы будем понимать все операции, затрагивающие данные в блокчейне, а именно: регистрацию, создание процедур голосования, выборов или опросов, регистрацию избирателей в конкретном голосовании или выборах и конечно же отправка голоса.

Несмотря на то, что данные будут надежно хранится в блокчейне, необходимо подтверждать личность голосующего, что влечет за собой проверку документов. Эта операция будет полностью ложится на организатора голосования, из-за чего систему нельзя называть полностью автоматизированной. С другой стороны, явка избирателя в пункт проверки дает прозрачность в удостоверении личности. При подтверждении избирателя организатор регистрирует его в блокчейне, а система автоматически генерирует бюллетень, содержащий QR код с секретным ключом для конкретного голосования. Выданный ключ избирателю, позволяет отправить свой голос в пользу одного из кандидата в сроки проведения голосования, которые указывались при его создании. До начала или после окончания голосования, ключ не является действительным. Такой подход к выдаче бюллетеня позволяет участвовать в выборах в дату их проведения, а получать ключ до их начала. Отданный голос также привязывает к определенном адресному пространству в сети Ethereum, который указывается при выдаче ключа. Полученные голоса надежно хранятся в блокчейне, а правильность адресации голоса конкретному кандидату пользователь всегда сможет проверить, введя повторно свой ключ.

Заключение

Предложенный метод построения системы электронного голосования, позволит надежно хранить полученные результаты в блокчейне, что позволит повысить криптостойкость данных. Досрочное получение бюллетеня позволит участвовать в голосовании удаленно, а также оставляет чувство значимости проводимого мероприятия. Долговременное хранение ключей повы-

шает их криптостойкость за счет постоянно растущего числа блоков в сети Ethereum. Однако предложенная система не является полностью автоматизированной, так как на сегодняшний день не существует сервисов, которые бы могли гарантировать верификацию личности в Интернете.

Библиографический список

1. Яркова О.Н., Осипова А.А. Защищенная система электронного голосования на основе криптографических алгоритмов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере №2(2) / 2014 – 7с.
2. Саломаа А., Криптография с открытым ключом // М.: Мир, 1995. – 318с.
3. Угрюмов Д.В., Создание математической модели обеспечения достаточного уровня анонимности в системах электронного голосования с сохранением целостности и конфиденциальности передаваемых данных // Научный журнал КубГАУ №93(09), 2013 – 16с.
4. Пескова О.Ю., Фатеева С.В. Электронное голосование: методы, риски и проблемы; Южный федеральный университет – Таганрог, 2014 – 12с.
5. О Государственной автоматизированной системе Российской Федерации «Выборы»: Федеральный закон от 10 января 2003 г.№20-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации, 2003 – 172с.
6. Дэвид Бисмарк: Электронное голосование без обмана [Электронный ресурс]. // TED: Ideas worth spreading [сайт]. URL: https://ru.tiny.ted.com/talks/david_bismark_e_voting_without_fraud
7. Семьянов П. Почему криптосистемы ненадежны? [Электронный ресурс]. // Алгоритмы методы исходники [сайт] URL: http://algolist.manual.ru
8. Черемушкин А.В. Криптографические протоколы. Основные свойства и уязвимости: учебное пособие. М.: Изд. Центр «Академия», 2009 – 272с.

A.S. Prikhunov, A.V. Semashko

ELECTRONIC VOTING SYSTEM BASED ON BLOKCHAIN TECHNOLOGY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article presents the main aspects of the existing electronic voting systems, their advantages and disadvantages. There are four groups of risks associated with the remote method of sending voice. A method for organizing an electronic voting system based on blockchain technology, with the generation of a bulletin containing a secret key, is considered.

Keywords: blockchain, electronic voting, chain of blocks, Ethereum, smart contract.

УДК004.5+614.2

С.А. Семашко

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НАСЕЛЕНИЯ

Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения «Приволжский окружной медицинский центр» Федерального медико-биологического агентства России

Социальная активность общества в перую очередь определяется физическим здоровьем граждан. Диагностика – это первый шаг к постановке диагноза, знакомство с пациентом, его проблемами. При все увеличивающимся потоке пациентов необходим системный подход для хранения результатов диагностических исследований и их обработки. Современные инструментальные, физические и антропологические методы исследования состояния организма человека пзволяют собрать большой объем сведений, способствующих правильной диагностке пациентов медицинских учреждений. Однако именно большой объем данных требует значительного времени на их анализ и обработку, а также высокой квалификации врача. В работе обосновывается необходимость и рассматриваются подходы к разработке интеллектуальных баз данных для больниц, поликлиник, диагностических центров …, позволяющих осуществлять комплексирование измерений от разных приборов и устройств диагностики с целью улучшения качества раннего диагностирования заболеваний и оптимизации работы медицинского персонала.

Ключевые слова: Здоровье, диагностика, интеллектуальные база данных, инструментальные методы, комплексирование измерений.

Здоровье граждан является одной из основных, если не главных, забот Государства. Современные информационные технологии представляют огромные возможности для обеспечения здорового образа жизни до наступления критических ситуаций, требующих зачастую очень больших временных и бюджетных материальных затрат на восстановление функциональных способностей гражданина.Полноценное функционирование населения всех возрастов определяет полноценное экономическое состояние региона. Вместе с тем коварное появление любого заболевания легко испортит существование любого человека, что с неизбежностью приведет к его социальной деградации. Подавляющее число *дисфункций*, приводящих к социальной апатии, эффективно ликвидируются в случае, если изменения в организме не приняли системный характер. Для обеспечения своевременной, иногда очень деликатной, помощи является раннее выявление симптомов гипотетического заболевания. Указанная проблема в настоящее время могла бы быть решена применением современных информационных технологий и, в том числе, созданием интеллектуальных баз данных, позволяющих вести обработку состояния организмов граждан региона в динамике, учитывая при этом самые разные аспекты, выключая текущий, исторический и гипотетический статус пациентов.Основным инструментом для формирования таких Гиперинформационных структур является регулярная диагностика состояния организма пациентов, и, очень важно, чтобы она была не навязчивой и безвредной.

Термин «диагностика заболеваний» представляет собой комплексный подход к пациенту, егозаболеванию, включающий в себя тщательный сбор анамнеза, лабораторные и инструментальные методы обследования, на основании результатов которых можно диф-ференцировать точный диагноз и назначить адекватное лечение. В зависимости от жалоб пациента и клинических проявлений заболевания ему назначают ряд обследований:

1. Пальпация, аускультация, перкуссия – это физические методы медицинской диагностики;
2. Лабораторная диагностика;
3. Инструментальное обследование;
4. Компьютерная обработка данных.

Пальпация – (лат. palpatio, ощупывание) – метод медицинской диагностики, проводимый путём ощупывания тела пациента. Аускультация– (лат. auscultatio, выслушивание) – метод медицинской диагностики, заключающийся в выслушивании звуков, образующихся в процессе функционирования внутренних органов. Перкуссия – метод медицинской диагностики, заключающийся в простукивании отдельных участков тела и анализе звуковых явлений, возникающих при этом.

Показанием к той или иной процедуре [1] являются основные жалобы пациента и клинические проявления основного заболевания. Диагностика заболеваний может включать в себя какой-то определенный метод исследования или комплекс различных методов.

К инструментальным методам обследования относятся:

1. УЗИ – исследование разных органов при помощи ультразвука;
2. Эндоскопия разной направленности. Эндоскоп (от др.-греч. ἔνδον – внутри и σκοπέω – смотрю) – группа оптических приборов различного назначения;
3. Рентгенография, направленная на распознавание видоизменений в функциональной работе организма
4. МТР-Магнитно-резонансная томография – способ получения томографических медицинских изображений для исследования внутренних органов и тканей с использованием явления ядерного магнитного резонанса. Томография – (др.-греч. τομή — сечение) — получение послойного изображения внутренней структуры объекта;
5. КТ-Компьютерная томография - это метод послойной диагностики организма, основанный на рентгеновском излучении
6. Функциональная диагностика (ЭКГ, суточное мониторирование артериального давления и ЭКГ).

Для постановки диагноза чаще всего клиническому врачу необходима комплексная диагностика. Каждый инструментальный метод обследования хорош по-своему и индивидуален, но, очень часто,может быть дополнением для уточнения диагноза.

История рентгенографических исследований начинается в 1885 году. Именно тогда Вильгельму Рентгену впервые удалось зарегистрировать затемнение фотопластинок, произошедшее под воздействием излучения особого спектра. Тогда же ученый обнаружил, что при облучении какой-либо части тела человека на фотопластинке остается изображение скелета. Данное открытие послужило основой метода медицинской визуализации. До этого исследовать внутренние органы и ткани при жизни человека не представлялось возможным. Рентгеновское излучение помогает врачам диагностировать множество недугов, например, переломы. Этот метод более направлен на более плотные ткани, его хорошо используют в травматологии и ортопедии, стоматологии, т.к. лучше визуализируется патология костной системы.Так же данный метод обследования нашел свою нишу в пульмонологии, т.к. на фоне воздушности легких четко проецируются объемные образования, воспаления, скопления жидкости. Однакочастые рентгеновские обследования небезопасны для здоровья пациента, и т.к. рентгеновские лучи в больших дозах пагубно влияют на живой организм и проявляются [3]:

- эритемами – ожогами, отличающимися глубоким и стойким поражением кожных покровов;
- изменением состава крови – кратковременными при небольшом избытке излучения, при длительном воздействии лучей могут быть необратимые изменения;
- ранним старением организма;
- формированием опухолевидных образований;
- бесплодием, или;
- развитием генетических аномалий у потомства.

Компьютерная томография – информативный метод обследования, но тоже основан на рентгеновском облучении органов и тканей, более финансово и временно

затратный.Магнитно-резонансная томография не использует рентгеновские лучи, но тоже временно и финансово затратный метод обследования. Эти два направления диагностики являются очень информативными методами обследования нотребуют большого количества дорогостоящего оборудования и существенных временных затрат [2].

Ультразвуковые методы исследования не требуют специализированных кабинетов, аппаратура относительно не дорогая, не требующая большого штата сотрудников.

О наличии в природе звуковых волн, не воспринимаемых человеком, люди догадывались давно, но открыл «невидимые лучи» итальянец Л. Спалланцани в 1794 г., доказав, что летучая мышь с заткнутыми ушами перестаёт ориентироваться в пространстве.

Первые научные опыты с ультразвуком стали проводиться еще в XIX в. Швейцарскому учёному Д. Колладену в 1822 г. удалось вычислить скорость звука в воде, погружая в Женевское озеро подводный колокол, и это событие предопределило рождение гидроакустики.В 1880 году братья Кюри обнаружили пьезоэлектрический эффект, возникающий в кварцевом кристалле при механическом воздействии, а спустя два года был сгенерирован и обратный пьезоэффект. Это открытие легло в основу создания из пьезоэлементов преобразователя ультразвука – главного компонента любого ультразвукового оборудования.Попытки поставить ультразвук на службу медицине относятся к 30-м годам XX века. Его свойства начали применять в физиотерапии артритов, экземы и ряда других заболеваний.

Опыты, начавшиеся в 40-е годы, были направлены уже на использование УЗ-волн в качестве инструмента диагностики новообразований. Успехов в исследованиях достиг венский психоневролог К. Дюссик, который в 1947 году представил метод, названный гиперсонографией. Ему удалось обнаружить опухоль мозга, замеряя интенсивность, с которой ультразвуковая волна проходила сквозь череп пациента. Именно этот учёный считается одним из родоначальников современной ультрозвуковойдиагностики (УЗД).

Настоящий прорыв в развитии УЗД произошел в 1949 году, когда учёный из США Д. Хаури сконструировал первый аппарат для медицинского сканирования. Это и последующие разработкиХаури мало напоминали современные приборы. Они представляли собой резервуар с жидкостью, в которую помещался пациент, вынужденный долгое время сидеть неподвижно, пока вокруг него передвигался сканер брюшной полости – сомаскоп.

Примерно в это же время американский хирург Дж. Уайлд создал портативный прибор с подвижным сканером, который выдавал в режиме реального времени визуальное изображение новообразований. Свой метод он назвал эхографией.В последующие годы УЗИ-сканеры совершенствовались, и к середине 60-х годов они стали приобретать вид, близкий к современному оборудованию с мануальными датчиками. Тогда же западные врачи начали получать лицензии для использования в практике метода УЗД.

Эксперименты по применению ультразвука проводились и советскими учеными. В 1954 году в институте акустики Академии Наук СССР появилось специализированное отделение, возглавляемое профессором Л. Розенбергом.

Выпуск отечественных УЗИ-сканеров был налажен в 60-е годы в НИИ инструментов и оборудования. Учёные создали ряд моделей, предназначенных для применения в различных медицинских сферах: кардиологии, неврологии, офтальмологии.

К тому моменту, когда советские врачи начали проявлять интерес к ультразвуковой диагностике, им всеже приходилось пользоваться плодами достижений западной науки, поскольку к 90-м годам прошлого века отечественные разработки безнадёжно устарели и отстали от времени.

Методы ультразвуковой диагностики продолжают активно развиваться. На смену обычной двухмерной визуализации приходят новые технологии, позволяющие получать объёмную картину, «путешествовать» внутри полостей тела, воссоздавать внешний вид плода. Например:

1. Трёхмерное УЗИ – создаёт 3D изображение в любом ракурсе.
2. Эхоконтрастирование – УЗИ с применением внутривенного контраста, содержащего микроскопические газовые пузырьки. Отличается повышенной точностью диагностики.
3. Тканевая, или 2-я гармоника (THI) – технология с улучшенным качеством и контрастностью изображения, показана пациентам с избыточным весом.
4. Соноэластография – УЗИ с применением дополнительного фактора – давления, помогающего по характеру сокращения тканей определять патологические изменения.
5. Ультразвуковая томография – методика, аналогичная по информативности КТ и МРТ, но при этом совершенно безвредная. Собирает объёмную информацию с последующей компьютерной обработкой изображения в трёх плоскостях.
6. 4 D– УЗИ – технология с возможностью навигации внутри сосудов и протоков, так называемый «взгляд изнутри». По качеству изображения похоже на эндоскопическое исследование [4].

Из изложенного следует, что одной из актуальных проблем современного медицинского учреждения является проблема обработки увеличивающегося потока информации о пациентах, полученной из различных технических (и не только) диагностических источников[5]. При этом значительное количество исследований уже представлены в электронном виде, и следовательно, могут обрабатываться современными вычислительными средствами.

В работе рассматривается задача разработки интеллектуальных хранилищ информации[6] о диагностических исследованиях пациентов с целью повышения качества постановки диагноза и оптимизации работы персонала лечебного заведения.

Перспективным способом решения данной проблемы является автоматизация работы с информацией о каждом пациенте в частности, создание компьютерных баз данных, позволяющих хранить, систематизировать и обрабатывать данные.

Практически каждое медицинское учреждение на данный момент имеет не только клинические отделения,но и в ряде случаев целые диагностические отделения. Каждое больница и поликлиника ежедневно работая с большим количеством пациентов, имеет множество различных специалистов, которые нуждаются во взаимосвязи для постановки диагноза. Для более качественного проведения диагностических исследований необходимо «общение» между всеми диагностическими службами, т.к.в сложных случаях одного метода исследования недостаточно для качественной постановки диагноза. Например, в стоматологии с помощью рентгена можно исследовать патологию зубов и костей черепа, но с помощью УЗИ можно лоцировать изменения региональных лимфоузлов, наличие отечности подкожно-жировой клетчатки, наличие свободной и осумкованной жидкости, что существенно повлияет на тактику лечения. В травматологии рентген может диагностировать изменение костной ткани (перелом, трещина и т.д.), а с помощью аппаратуры УЗИ можно выявить сопутствующую патологию – повреждения сухожилий, менисков,тромбоз вен, разрыв мягких тканей, наличие гематом.

Работать с постоянно растущими объемами информации только на бумаге (истории болезней, карточки пациентов…) становитсякрайне затруднительно, отнимает много времени, и что очень важно, окончательный диагноз сильно зависит от квалификации врача, то есть до настоящего времени продолжает оставаться весьма субъективным. Отсюда следует острая необходимость компьютеризированного (системного) объединение всех диагностических (и клинических) служб. Для оптимизации работы врачей с отдельно взятым пациентом, сокращения времени работы персонала и времени нахождения пациента в диагностическом отделении.Разработка общей интеллектуальнойбазыданных, а такжепрограммных средств для работы с ней,являютсякрайне актуальной задачей насегодняшнийдень и имеетбольшуюпрактическуюзначимость.

Назначение общей базы данных пациентов:

- хранение информации о обратившихся пациентов клиники;
- хранение информации по каждому диагностическому кабинету клиники;
- хранение общей информации о пациентах;
- хранение информации о приемах, в том числе диагнозах и лечении.
- обновление и добавление информации;
- анализ информации по различным срезам (пациенты, кабинеты, врачи); выдача итоговой информации в виде заключений (отчетов) по каждому пациенту;
- комплексирование измерений параметров организма от разных источников;
- подготовка результатов измерений в форме, удобной для постановки диагноза и разработки методики лечения.

Пациент клиническим врачом направлен в диагностическое отделение и каждый диагност при помощи общей базы данных может уточнить анамнез заболевания, просмотреть заключения уже сделанных инструментальных, лабораторных методов обследования, добавить свои заключения в общую базу.

Пациенты, имеющие хронические заболевания, ежегодно проходят лечение в специализированных стационарах. Электронная база хранения заключений поможет лечащему доктору наиболее быстро и качественно собрать анамнез, а пациента избавит от хранения документов на куче бумажных носителей. Сократиться время посещения пациента в поликлиниках, которое он тратит, допустим, в регистратуре на поиски его медицинской карты.

Зачастую диагностические методы обследования требуют контроля в динамике. Крупные клинико-диагностические центры в своем штате имеют сразу нескольких врачей ультразвуковой диагностики и один и тот же пациент может попасть на прием к разным специалистам. В общей базе в любой момент каждый врач сможет найти предыдущие исследования конкретного пациента для сравнения, чтобы оценить динамику лечения,улучшит качество обследования. Обобщение информации позволит облегчить труд врачей, персонала в регистратуре, быстро предоставляя общую информацию о пациенте и проведенных раннее исследованиях.

Электронная база данных пациентов способствует более рациональной организации деятельности учреждения, возможности привлечения для постановки диагноза более опытных специалистов из других лечебно-профилактических и научно-исследовательских учреждений, позволяет консультироваться со специалистами в других городах и странах, создавая виртуальные научно-практическиеконсилиумы, значительно сокращает время для постановки диагноза и уточнения лечения.

Общая электронная база данных может использоваться в научных целях. Соискатель (научный сотрудник), будь то клиницист или диагност, используя общую базу пациентовможет подобрать для себя клинические и диагностические данные прошедших обследование и лечение пациентов для дальнейшей их обработки в научных целях.

При выписке из стационара каждый пациент получает «выписной эпикриз», который включает: основной диагноз, сопутствующую патологию, протоколы и заключенияпроведенных диагностических обследований, проведенное лечение, рекомендации. С помощью обшей базы данных возможно существенное сокращение времени формирования выписки и создания наиболее информативного документа по поводу заболевания и лечения конкретного пациента.

Формирование общей компьютеризированной базы данных диагностических служб дает возможность своевременно извлечь нужную информацию по заданным критериям с необходимым упорядочиванием (выборки с сортировкой), сгруппировать данные и вычислить необходимые величины (групповые операции, отчеты с вычисляемыми полями),

что способствует более быстрому и точному формированию отчетностей статистических данных каждого специалиста (по методам исследования и диагнозам) и отделения в целом, упрощает обсчет годовых отчетов.

Библиографический список

1. http://vselekari.com/analizy/diagnostika [Электронный ресурс].
2. http://vselekari.com/analizy/diagnostik [Электронный ресурс].
3. http://diametod.ru/rentgen/vreden [Электронный ресурс].
4. Окороков А. Н. Диагностика болезней внутренних органов //М.:, Медицинская литература, 2001. Т1.
5. Рассел, Стюарт Норвиг, Питер. Искусственный интеллект: современный подход, 2-изд..: Пер. с англ.– М.: Издательский дом «Вильямс», 2007.– 1408с.

S. A. Semashko

DEVELOPMENTOF INTELLECTUAL DATABASES FOR EARLY DIAGNOSIS OF DISEASES OF THE POPULATION

Federal budget-funded healthcare institution "Volga regional medical center" of Federal medical-biological Agency of Russia

Social activity of society in the first place is determined by the physical health of citizens. Diagnosis is the first step to diagnosis, familiarity with the patient, his problems. With the increasing flow of patients, a systematic approach is needed to store the results of diagnostic studies and their processing. Modern instrumental, physical and anthropological methods of studying the state of the human body allow to collect a large amount of information that contributes to the correct diagnosis of patients of medical institutions. However, it is a large amount of data that requires considerable time for their analysis and processing, as well as high qualification of the doctor. The paper substantiates the need and discusses approaches to the development of intelligent databases for hospitals, clinics, diagnostic centers ..., allowing the integration of measurements from different instruments and diagnostic devices in order to improve the quality of early diagnosis of diseases and optimize the work of medical personnel.

Key words: Health, diagnostics, intelligent database, instrumental methods, the aggregation of measurements.

УДК 004.4

А.В. Шор, А.В. Семашко

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ АВТОРСКОГО ПРАВА НА МУЗЫКАЛЬНЫЙ КОНТЕНТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье предложен один из возможных способов защиты авторского права с применением технологии блокчейн. Также рассмотрены существующие на сегодняшний день решения по защите, приведены их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: технология блокчейн, авторское право, сеть Ethereum, платформа, транзакции, смарт-контракт, web-интерфейс.

В настоящие дни мы очень часто обращаемся к Интернету за получением той или иной информации, которая предоставляется в свободном доступе. Используя полученную информацию в сети Интернет, мы не думаем о правилах использования этих сведений. На приобретенный инфоматериал так же накладываются авторские права. Размещение на своем сайте чужого контента без разрешения его создателя, является нарушением закона. Нарушение прав на интеллектуальную собственность приобрело масштаб среди такого контента, который популярен среди пользователей интернета и может быть представлен в виде медиафайлов, к примеру, музыка.

Одна из наиболее важных проблем защиты авторских прав связывают с подтверждением исключительного права на интеллектуальную собственность. Авторское право возникает с момента создания произведения. Нет никакой необходимости регистрировать произведение, но отсутствие регистрации не гарантирует публичную достоверность исключительного права. В спорных ситуациях необходимо будет доказать, что данный контент был создан исключительно трудом автора.

В данной статье предлагается рассмотреть систему, которая решила бы проблему интеллектуального права того или иного произведения.

Решить такую проблему поможет использование современной технологии блокчейн, которая позволит построить децентрализованную систему. Достоинство применения такой технологии в том, что информация, которая сохраняется в блокчейн, находится в свободном доступе, просмотреть ее может любой, кто является частью этой системы. Использование такой технологии делает невозможным подмену существующих данных.

В перспективе блокчейн мог бы решить проблему прозрачных исчислений непосредственно на счет создателя музыки, таким образом от музыканта не будет скрыта информация о лицензионных отчислениях. Авторы музыки таким образом открыли бы для себя новые источники дохода.

Существующие решения по защите авторского права

На сегодняшний день существуют различные способы защиты авторского права музыкальных произведений, многие из которых не обеспечивают качественную защиту от недобросовестных коллег по цеху [1 - 7]:

1) защита авторского права знаком автора. К недостаткам следует отнести субъективность экспертизы подлинности данного труда;
2) депонирование произведения – хранение единственного экземпляра творческого труда в специальных организациях. К сожалению, не все организации, предоставляющие такого вида услуги, являются проверенными и надежными;
3) нотариальное удостоверение. В основном такой способ защиты используется для заверения подлинности копии произведения. Таким способом регистрации можно

заверить лишь произведения в печатном виде. Хранение произведения осуществляется только на оплаченный автором период;

4) отправка произведения по почте. Отправить труд можно как по почте, так и по электронной почте. Недостаток такой процедуры – доказательство является одноразовым. Данный способ защиты авторских прав лучше использовать в совокупности с вышеперечисленными способами;

Проблема присвоения авторства на произведение, неверного указания имени автора при размещении работы, внесения в нее правок без согласия создателя остается до сих пор актуальной. Подтверждение подлинности авторского права контента могла бы решить такая технология как блокчейн.

Безопасность и надежность в технологии блокчейн обеспечивается через децентрализованный сервер, проставляющий метки времени, и одноранговые сетевые соединения. В результате этого формируется база данных, которая управляется автономно, без единого центра. Такая технология структурирования базы данных исключает возможность кражи, подмены, изменение данных и мошенничество.

Таким образом можно выделить принципы, на которых основана технология блокчейн:

1) отсутствие централизации – важный элемент технологии. Все сведения хранятся на компьютерах пользователей, которые видят одно и то же; поэтому взломать или «выключить» блокчейн невозможно: если есть хотя бы один компьютер, входящий в состав сети работает, технология будет выполнять свою задачу [8];
2) система организована так, что каждый ее участник постоянно проверяет поступающие к нему сведения. В итоге при любой операции подтверждается целостность и достоверность хранящихся в сети материалов.
3) новая информация записывается в конец цепочки поверх уже проверенной и частично основывается на ней.

Система защиты авторского права на основании технологии блокчейн может надежно хранить информацию об авторе того или иного музыкального произведения, что могло бы гарантировать достоверность данных. Если изменить какую-то часть материалов, например, путем взлома, то это должно привести к изменению последующей цепочки информации, иначе эта ошибка будет видна всем участникам. А изменить данные сразу, например, на десяти тысячах компьютеров очень сложно и дорого. Этим гарантируется сохранность и точность сведений.

Архитектура системы защиты авторского права на музыкальный контент с применением технологии блокчейн

В архитектуре приложения можно выделить четыре основных модуля:

1) модуль смарт-контрактов, с помощью которых возможно взаимодействие с блокчейном;
2) база данных, которая хранит информацию о пользователях этой системы;
3) модуль координирования, который позволяет взаимодействовать со всеми частями этой системы;
4) пользовательский интерфейс.

В смарт-контракте хранится контрольная информация о каждом музыканте, зарегистрированном в блокчейн сети. Приложение позволяет закрепить авторство той или иной музыкальной композиции за определенным композитором. Часть вводимых данных музыкантом при регистрации проходят верификацию, тем самым происходит подтверждение личности. Верификация происходит на стороне портала, который непосредственно занимается проверкой личности в интернете. Примеры таких площадок: PublicVerification и Dadata. На данный портал отправляются такие данные о музыканте как серия, номер

паспорта, ФИО, дата рождения, адрес регистрации. Запрос обрабатывается и пересылается предварительный статус верифицирован/не верифицирован. В некоторых случаях может понадобиться ручная верификация (когда есть нестыковки с введенными данными). Обычно это технические ошибки в тексте. Как заявляют разработчики таких площадок, такое решение полностью соответствует действующему законодательству о Защите персональных данных. Также для полной регистрации музыканту необходимо располагать адресным пространством кошелька Ethereum, с помощью которого возможно выполнение различных транзакций, и пароль от данного кошелька. И адрес, и пароль задаются системой. Как только музыкант верифицирован, он становится зарегистрированным в блокчейн сети. Было решено в сеть заносить только проверенных личностей из-за вероятности того, что человек может взять чужой паспорт и внести данные другого человека.

В базе данных было решено хранить информацию о пользователях данной системы. Как и музыканту, пользователю также необходимо пройти регистрацию на данном портале. Для этого нужно знать адресное пространство в сети Ethereum и пароль от него, которые так же задаются системой.

Модуль координирования является главным узлом системы, с помощью которого можно взаимодействовать со всеми модулями системы. Данный модуль осуществляет общее управление проведением транзакций, позволяет проверить корректность данных, хранящихся в базе данных, а также предоставляет интерфейс для работы с системой.

Для удобного взаимодействия пользователя с системой был разработан пользовательский web-интерфейс. Для музыканта открыты такие функции, как просмотр чужих профилей композиторов, загрузка своих произведений, покупка подписки, прослушивание чужих композиций, изменение профиля. Пользователь может прослушивать музыку любимых композиторов после покупки подписки на данного музыканта, а до этого все аудиозаписи представлены в демоверсии. После регистрации на портале пользователю доступен будет такой функционал, как просмотр профиля музыканта, покупка подписки, прослушивание треков, просмотр существующих подписок. Каждая из этих транзакций будет сформирована в блок. Блоки выстроятся в одну цепь [10]. Каждый блок связан с другим с помощью ключа, а именно в заголовке каждого блока находится ключ предыдущего блока. Такой подход обеспечивает защиту данных от взломов и атак. Также в заголовке блока находится ключ самого блока, который рассчитан на записях в блоке и ключе предыдущего блока. Можно сказать, что в ключе одного блока зашифрованы данные всех предыдущих блоков, поэтому при попытке изменить данные в одном блоке повлечет за собой изменение ключа этого блока, вследствие чего потребуется изменить значения ключей предыдущих блоков, что является крайне сложной задачей.

Заключение

В данной работе был рассмотрен один из способов защиты авторского права музыкантов с применением технологии блокчейн. Все транзакции, совершенные музыкантом и пользователем, формируются в отдельные блоки, которые становятся зависимыми между собой и выстраиваются в цепь, то есть формируется база данных, которая управляется автономно, без единого центра. Такая технология структурирования базы данных исключает возможность кражи, подмены, изменение данных и мошенничество. Для подтверждения исключительности права на тот или иной музыкальный контент не составит труда поднять блок с соответствующей транзакцией.

Библиографический список

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rao.ru/index.php/pravoobladatelyam/deponirovanie-proizvedenij
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rsl.ru/ru/s4/s47024#31
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki
4. Казанцев С.Я., Згадзай О.Э. Авторские права и их защита в сети Интернет
5. Афанасьева Ю. Новые информационные технологии: интеллектуальная собственность в Интернете // Интеллектуальная Собственность. Авторское право и смежные права.- 2005. -№ 2.- С. 33-34.
6. Защита авторских прав в Интернете. Новости науки и техники. //http://n-t.org/, 2005.
7. Контуры инновационного развития мировой экономики / под ред. А. А. Дынкина. – М.: Наука, 2000. – С.97.
8. Свон М. Блокчейн: Схема новой экономики. М.: Олимп-Бизнес, 2017. 240 с.: ил.
9. Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. — 2008. — 9 c
10. Олег Мазонка, Влад Попов. Хэш Цепочки Технологии Hasq. — 2014.
11. Melanie Swan. Blockchain: Blueprint for a New Economy. — O'Reilly Media, Inc., 2015. — 152 p. — ISBN 978-1-4919-2047-3.
12. Pedro Franco. The Blockchain // Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics. — John Wiley & Sons, 2014. — 288 p. — ISBN 978-1-119-01916-9.
13. Andreas M. Antonopoulos. 7. The Blockchain // Mastering Bitcoin. — O'Reilly Media, Inc., 2014. — ISBN 978-1-4493-7404-4.

A.V. Shor, A.V. Semashko

THE EVALUATION OF TELECONTROL DISTANCE OF TECHNICAL OBJECTS BY USING THE TERRESTRIAL RADIO WAVES

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

The article suggests one of the possible ways to protect copyright with the use of blockchain technology. Also considered are the existing solutions for protection, their advantages and disadvantages are given.

Keywords: blockchain technology, copyright, Ethereum network, platform, transactions, smart contract, web-interface.

УДК 621.398

А.В. Семашко[1], А.А. Ямпольский[2], А.И. Бареева[2]

АНАЛИЗАТОР ЗАНЯТОСТИ КВ КАНАЛА НА ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРА ФАЗОМОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
[2] ООО Научно-производственное предприятие "ПРИМА"

В работе приведен краткий обзор особенностей ведения связи в КВ диапазоне, приведено писание детектора занятости прослушиваемого канала на предмет наличия в нем фазомодулированных сигналов с символьной скоростью 2400 бод. Показаны результаты моделирования работы детектора в канале с АГБШ, с указанием вероятности обнаружения искомого сигнала и среднего времени, необходимого на его обнаружение.

Ключевые слова: КВ канал, фазовая модуляция, отношение сигнал-шум, занятость канала.

Современный этап мирового развития (и Россия не исключение) характеризуется энергичным и всесторонним внедрением информационных технологий во все сферы жизни. Связь, эта кровеносная система информационных процессов, естественно, обязана соответствовать темпам и масштабам информатизации общества – к этому она и стремится. Достаточно, например, проследить динамику подвижной сотовой связи в России. Поколение 2G и 2G+ определяло уровень развития подвижной связи в течение 12-15 лет – до выхода на арену поколения 3G, а разрыв между 3G и 4G сократился уже до 6-7 лет. В России еще только оценивают результаты первых шагов по внедрению 4G, в то время как за рубежом ведутся серьезные работы в направлении 5G. Фоном для этого впечатляющего, стремительного развития является адаптация технических и сервисных возможностей связи к требованиям массового рынка. Этот фон, с одной стороны, объективен, понятен и сопряжен с гонкой за территориями покрытия и скоростями передачи данных, а с другой – заслоняет иные, касающиеся не только массового рынка, аспекты развития связи в России.

Одним из таких аспектов, оказавшихся в тени современных бизнес-технологических процессов в сфере телекоммуникаций, является коротковолновая радиосвязь (КВ) [1].

Но уйти на второй план КВ-радиосвязь сегодня не может и на это указывает целый ряд обстоятельств:

- фактор колоссального размера территории страны усугубляется значительной неравномерностью степени урбанизации, плотности населения, к тому же он сопряжен с исключительно сложными климатическими и географическими условиями;
- возникло новое – арктическое – направление сосредоточения усилий по развитию Российской Федерации, особенности реализации которого в целом ряде случаев делают КВ-радиосвязь безальтернативной;
- КВ-радиосвязи объективно присуща возможность покрытия территории страны без существенных инфраструктурных затрат, но при этом с высокой надежностью;
- растет понимание необходимости обеспечения живучести, надежности, помехозащищенности и устойчивости систем связи государственного и военного управления на основе комплексного использования различных видов связи;
- каких-либо других систем и средств связи, способных при автономном применении обеспечить и полное покрытие территории России, и требуемую надежность, и относительную дешевизну, и устойчивость в широком диапазоне условий обстановки (климатической, географической, помеховой и т. д.), просто нет.

Не лишним будет упоминание о том, что Россия имеет общие границы с 18 государствами, в том числе и с двумя частично признанными республиками. Протяженность границ нашей страны самая большая в мире, соответственно ресурсы (в том числе и связь) на обеспечение армии выделяются колоссальные. Вопрос о быстрой связи на дальние и сверхдальние расстояния актуальности не потеряет никогда. Несмотря на большие достижения и быстрое развитие систем спутниковой связи, сотовых сетей и широкополосного беспроводного

доступа, КВ связь все еще остается востребованной, ведь далеко не везде можно поставить вышку мобильной связи, а спутниковая связь не только дорогая, но и зависима от положения спутника в данный момент.

Разработчики при реализации любой связи неизбежно сталкиваются с различными трудностями. В КВ-радиосвязи одна из основных проблем – ограниченность диапазона частот, которое приходится решать путем совместного использования выделенного ресурса, т. е. использование одной частоты многими абонентами. Отсюда берет начало важная задача – рациональная организация связи на небольшом диапазоне частот. В связи с этим появляется необходимость прослушивания частоты для передачи перед отправкой сигнала. Другими словами – нужен детектор передаваемых сигналов.

Такая задача успешно реализована для обмена сообщениями, которые используют следующие сигналы: ALE 3G, MIL-STD-188-110 и STANAG 4285.

Разработанный детектор используется для обнаружения PSK-8 сигналов с символьной скоростью 2400 бод, в полосе 3 кГц. Детектор тестируется в каналах с АГБШ, без замираний и многолучевости.

Вероятность обнаружения сигнала разработанным детектором должна быть не хуже чем в Таблице 1. Вероятность ложного срабатывания не должна превышать 1%.

Таблица 1

Вероятность обнаружения занятости (ALE модемами и модемами передачи данных).

Форма волны	SNR (дБ в полосе 3 кГц)	Время прослушивания (с)	Вероятность обнаружения
ALE	0 6	2,0 2,0	0,8 0,99
Голос в ОБП	6 9	2,0 2,0	0,8 0,99
MIL-STD-188-110 (последовательная однотоновая PSK)	0 6	2,0 2,0	0,8 0,99
STANAG 4285	0 6	2,0 2,0	0,8 0,99

Общая идея детектора заключается в анализе наличия символьной скорости в принимаемом сигнале. Детектор должен работать на протяжении двух секунд, т. к. именно в течение этого времени требуется определить, занят канал передаваемым сигналом или свободен, в зависимости от результата дать разрешение на пересылку сигнала либо запретить передачу. Сигнал с проверяемой частоты передачи поступает на входной фильтр, идентичный фильтру передатчика (формирующий фильтр). Далее сигнал децимируется. Индекс децимации выбран таким образом, чтобы в результате приходилось 4 отсчета на каждый символ. После децимации сигнальная последовательность подается на вход АРУ.

С выхода АРУ сигнал поступает на входной преобразователь. Задача входного преобразователя – выделить границы символов. Так как в спектре входного сигнала нет спектральной составляющей равной символьной частоте, входной преобразователь должен выделить эту спектральную составляющую. Данный преобразователь представляет собой автокоррелятор на длительности равной интервалу дискретизации.

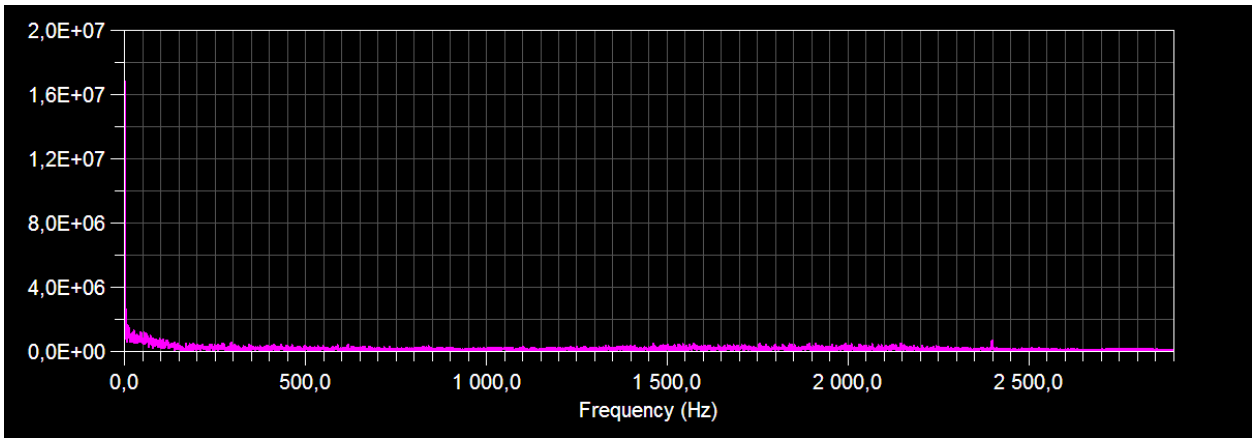


Рис. 1 Спектр сигнала, на выходе входного преобразователя

После входного преобразователя искомая составляющая в спектре появляется, но ее амплитуда мала по сравнению с низкочастотной областью спектра. Для выделения ближней зоны (2400 +/- 50 Гц) в полученной характеристике используется узкополосный КИХ фильтр. Выходной сигнал фильтра нормируется АРУ для упрощения сравнения преобладания символьной частоты над другими спектральными составляющими в этой ближней зоне.

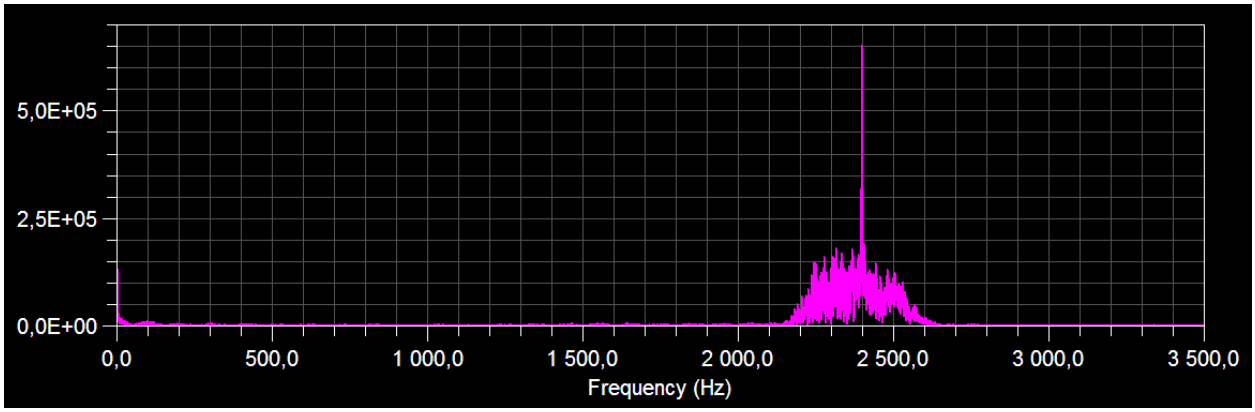


Рис. 2 Спектр сигнала, на выходе полосового КИХ фильтра

Полученный сигнал поступает на вход коррелятора с тоном 2400Гц (символьная скорость составляет 2400 бод). Так как точность символьной скорости достаточно высокая (погрешность по стандарту не хуже 10^{-5}), то в корреляторе можно производить накопление проекций на длительности всего измерения. По выходу коррелятора (по его амплитудному значению) выносится решение о наличие/отсутствие PSK сигнала в канале. Решение принимается исходя из сравнения амплидудного значения выхода коррелятора и установленного порогового уровня, по которому формируется команда о возможности или не возможности выхода на передачу.

В ходе тестирования программы были исследованы следующие характеристики детектора: вероятность обнаружения и время обнаружения сигнала.

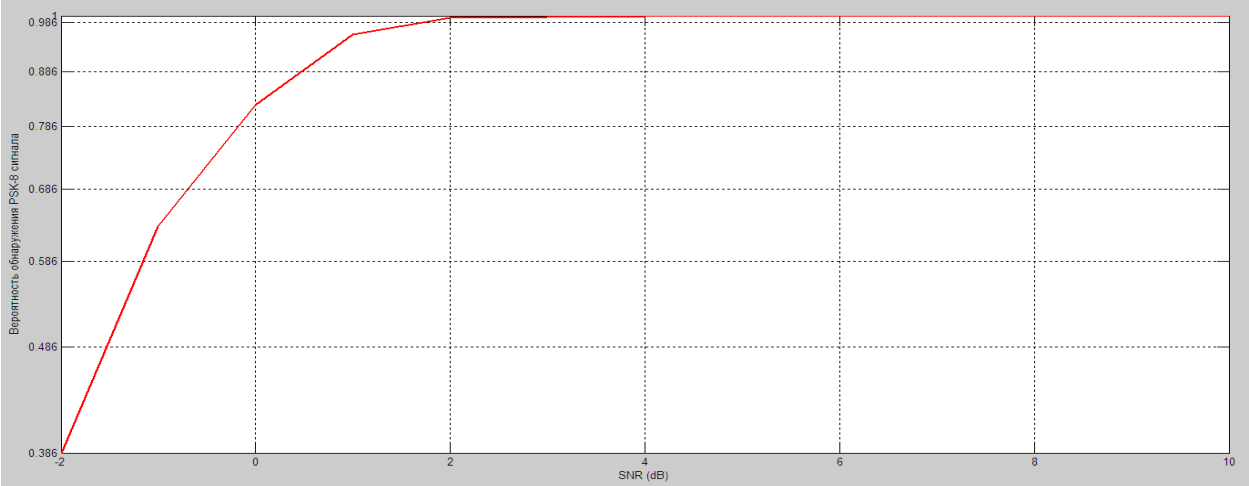


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения PSK-8 сигнала от уровня шума в канале

График зависимости вероятности обнаружения PSK-8 сигнала от уровня шума показывает, что работа детектора соответствует предъявленным требованиям (Таблица 2).

Таблица 2. Результаты тестирования детектора (ALE модемами и модемами передачи данных).

SNR (dB)	Вероятность обнаружения, соответствующая требованиям	Вероятность обнаружения детектора
6	0.99	1
0	0.8	0.824

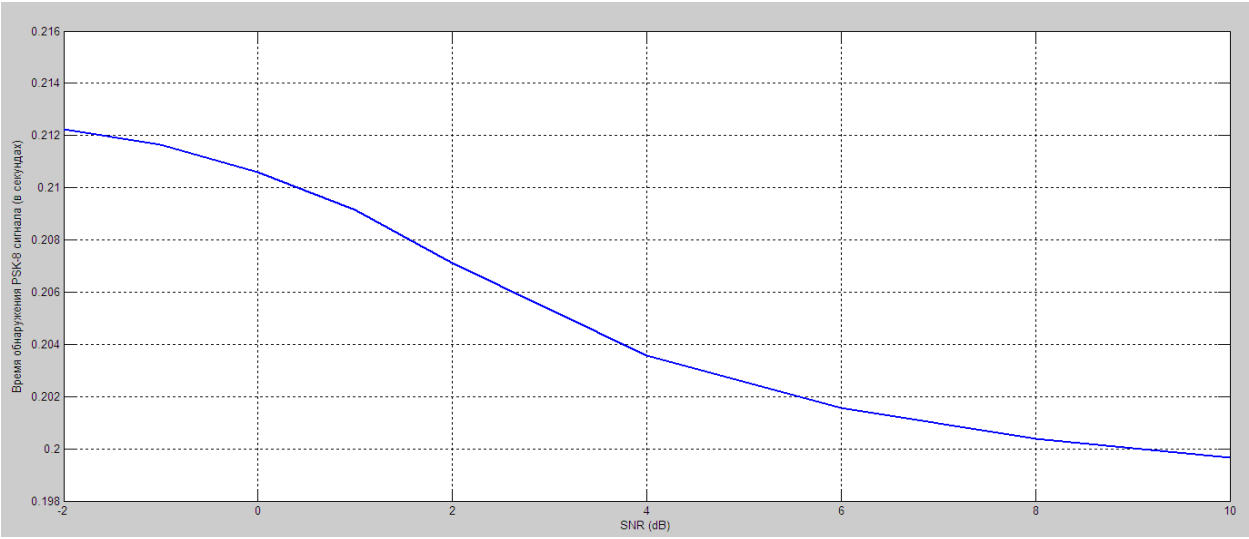


Рис 4. Зависимость времени обнаружения PSK-8 сигнала от уровня шума в канале

Время обнаружения сигнала PSK – 8 детектором должно быть меньше двух секунд (Таблица 1). Рисунок 4 показывает, что детектор соответствует этому требованию.
Также была проведена проверка на вероятность ложного обнаружения PSK – детектора. Вероятность ложного обнаружения < 0.01 (0.8%).

Библиографический список

1. Кильдишева О. Э. ОАО «РИМР»: опыт и инновации на службу государству // Электросвязь. — 2013. — № 11.
2. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. О. В. Головина. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 598 с.
3. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
4. HFLINK is the international resource for ALE Automatic Link Establishment High Frequency Communications - HF Digital [Электронный ресурс] – URL: http://hflink.com/standards/HF_modems_explained_stanag.pdf (дата обращения: 02.08.2017).
5. HFLINK is the international resource for ALE Automatic Link Establishment High Frequency Communications - HF Digital [Электронный ресурс] – URL: http://hflink.com/standards/MIL_STD_188_110B.pdf (дата обращения: 02.08.2017).
6. HFLINK is the international resource for ALE Automatic Link Establishment High Frequency Communications - HF Digital [Электронный ресурс] – URL: http://hflink.com/standards/ALE_standard_188_141B.pdf(дата обращения: 02.08.2017).

A. V. Semashko[1], A. A. Yampolskiy[2], A. I. Bareeva[2]

ANALYZER OF EMPLOYMENT OF THE HF RADIO CHANNEL ON THE BASIS OF THE DETECTOR PSK SIGNALS

[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
[2]Limited Liability Company Research&Production Enterprise PRIMA

The article provides a brief overview of the peculiarities of communication in the HF, a description of the detector of the listening channel for the presence of phase-modulated signals with a symbolic speed of 2400 baud. Shows the results of simulation of a detector in a channel with AVGN, indicating the probability of detection signals and the mean time needed to detect it.

Key words: HF channel, phase modulation, signal to noise ratio, channel occupancy.

УДК 004:519.711.4

Е.В. Степанова, Ю.В. Козлова, Ю.С. Егоров

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРИОРИТЕТОВ ЗАПЛАНИРОВАННЫХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена разработке алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальной системы планирования и приоритезации задач мобильного приложения управления событиями с использованием навигационных данных, которая позволяет заранее определять возможные маршруты движения с учетом способа передвижения, обеспечивает выбор оптимального из них, а также автоматически формирует рекомендации пользователю для принятия решения, при этом используется текущее географическое местоположение устройства и геопозиция запланированного события.

Ключевые слова: программное обеспечение; мобильное приложение; поддержка принятия решений; комбинаторная оптимизация.

Сегодня существует ряд онлайн сервисов, позволяющих получать пользователю информацию о состоянии запланированного им маршрута движения заранее. Такие сервисы агрегируют информацию о средней скорости со смартфонов водителей, у которых запущен навигатор или мобильные карты с включённым режимом «Сообщать о пробках». Сервисы автоматически собирают GPS-координаты и время, кроме того аналогичные данные могут быть получены сервисами от компаний, обладающих парком автомобилей, оборудованных GPS-приёмником и модемом.

Благодаря наличию в таких сервисах API – набора готовых классов, процедур, функций, структур и констант, предоставляемых для использования во внешних программных продуктах, становится возможным использовать данные геолокации для решения задач управления маршрутами передвижения.

В качестве гипотезы исследования выдвигается предположение, что на основе текущего местоположения мобильного устройства пользователя, заданных координат запланированных событий, а также значения «время в пути», полученного с облачных сервисов по API, возможно будет сформировать 2-3 рекомендованных маршрута движения между событиями с учетом различного вида транспорта, максимизируя тем самым удовлетворенность пользователя.

При этом должна решаться NP-полная в сильном смысле задача комбинаторной оптимизации, состоящей из задачи о ранце и модифицированной задачи коммивояжера, когда внешний цикл – поиск (т.е. перебор) по подмножествам вершин графа (аналог задачи о ранце), а внутренний цикл – задача о коммивояжере, решаемая на выбранном на данной итерации подмножестве вершин, но при этом допускается посетить не все заданные пользователем точки.

В качестве исходных, используются данные геолокации мобильного устройства пользователя; значение «время в пути» t_w, полученное с облачных сервисов с помощью API; статистические данные по дорожным заторам; введенные пользователем данные (приоритеты событий P_E, время начала t_S и окончания событий t_E и пр.).

В качестве допущения принимается возможность пользователя самостоятельно задать приоритеты запланированных событий P, а в качестве ограничений – возможность пользователя задать не более 24 точек E и связанных с ними событий (не более одного в час).

В качестве критериев выступают:

- Показатель «Время в пути» t_w – требуется сократить время, которое пользователь тратит на передвижение между заданным событиями, привязанными к географическим точкам.
- Показатель «Удовлетворенность пользователя» U_C – требуется обеспечивать формирование таких маршрутов движения, которые будут максимально удовлетворять пользователя в зависимости от назначенных событиям приоритетов.

Таким образом, минимизируется значение «Время в пути» и максимизируется «Удовлетворенность пользователя».

При этом учитывается способ передвижения пользователя (пешком, на автомобиле, на городском транспорте), а также накопленная статистика по дорожной обстановке. Также устанавливаются следующие ограничения:

- максимальное количество точек Pc_{max} – 24;
- максимальное время нахождения в пути t_{wmax} – 24 часа;
- максимальное время пребывания в одном выбранном месте t_{smax} – 2 часа.

Суммарный вес (время в пути) каждого из полученных маршрутов (в минутах) не должен превышать время, отведенное на этот маршрут. Вес маршрута рассчитывается по следующей формуле

$$w = \sum_{i=1}^{n} t_{wi} + t_{s\max} \times E_C ,$$

где t_w – время в пути от одной точки маршрута до следующей; $t_{s\ \max}$ – максимальное время нахождения в одном месте; E_C – количество точек на маршруте.

В терминах теории графов задачу можно сформулировать следующим образом. Задано n вершин и матрица A, где l – длина (или цена) дуги (i, j). Под маршрутом коммивояжера z будем понимать цикл точек. Таким образом, маршрут является набором дуг. Если между точками i и j нет перехода, то в матрице ставится символ «*бесконечность*». Он обязательно ставится по диагонали, что означает запрет на возвращение в точку, через которую уже проходил маршрут коммивояжера, длина маршрута $l(z)$ равна сумме длин дуг, входящих в маршрут. Пусть Z – множество всех возможных маршрутов. Начальная вершина i_1 – фиксирована. Требуется найти маршрут $z \in Z$, такой, что $(z_0) = min\ l(z), z \in Z$.

Можно найти точное решение задачи коммивояжёра [1], то есть «вручную» вычислить длины всех возможных маршрутов и выбрать маршрут с наименьшей длиной. Однако даже для небольшого количества точек решать задачу таким способом практически невозможно [2]. Для простого варианта симметричной задачи с n точками существует (n-1)!/2 возможных маршрутов, то есть для 15 точек существует 43 миллиарда маршрутов и для 18 точек уже 177 триллионов. То, как стремительно растет продолжительность вычислений, можно показать на следующем примере. Если бы существовало устройство, находящее решение для 30 точек за час, то для двух дополнительных точек требуется в тысячу раз больше времени; то есть, более чем 40 суток.

Таким образом, в процессе работы потребуется разработка адаптивного алгоритма, направленного на решение гибридной задачи комбинаторной оптимизации, состоящей из модифицированной задачи коммивояжера и задачи о рюкзаке, с учетом динамически изменяющейся внешней среды и с использованием статистических данных (с целью прогнозирования), а также позволяющего сформировать и предложить пользователю 2-3 решения (маршрута движения) на основе данных его геолокации.

Разработанные алгоритмы планируется использовать в процессе создания мобильного приложения управления событиями с использованием навигационных данных.

Мобильное приложение должно обладать следующими функциональными возможностями:

- автоматическая инсталляция и развертывание приложения на мобильном устройстве пользователя;
- привязка взаимного положения информационных моделей и действительного положения мобильного устройства;
- формирование списка запланированных событий;
- ввод данных о геопозиции запланированного события;
- преобразование систем координат;
- создание напоминания-будильника для запланированного события;
- автоматическое определение текущего местоположения пользователя;

- анализ дорожного траффика с учетом способа передвижения пользователя;
- вычисление времени выезда с учетом дорожной ситуации;
- поиск и визуализация альтернативных маршрутов передвижения пользователя;
- обработка данных для формирования оптимальных маршрутов движения;
- формирование рекомендаций пользователю с использованием алгоритмов поддержки принятия решений на основе «Что-Если» моделирования;
- краткосрочное прогнозирование;
- оценка параметров моделей прогнозирования на основе данных наблюдения;
- оповещение пользователя об изменении времени заданного напоминания-будильника для запланированного события с учетом дорожной ситуации;
- интерактивная визуализация информации с помощью графического интерфейса пользователя.

Маркетинговые исследования показывают, что мобильное приложение может быть востребовано в первую очередь у городских жителей, которые перманентно стоят в дорожных пробках, негативными последствиями которых являются: общее увеличение времени в пути и его непредсказуемость, экономический ущерб из-за потери времени и опозданий; повышенный стресс водителей и пассажиров. Дополнительными целевыми сегментами могут являться: преподаватели и студенты (пары по расписанию в разных корпусах университета, разбросанных по всему городу); путешественники и туристы (вылет по расписанию из Аэропорта, который чаще всего за городом); сотрудники предприятий, которые вынуждены перемещаться по городу (между городами) для участия в деловых встречах или переговорах, имеющих, как правило, фиксированное местоположение и/или временные рамки.

На данный момент разработан прототип мобильного приложения (с ограниченной функциональностью), который обеспечивает выполнение следующих функций [3]:

- формирование списка запланированных событий;
- ввод данных о геопозиции запланированного события;
- создание напоминания-будильника для запланированного события;
- автоматическое определение текущего местоположения пользователя;
- анализ дорожного траффика с учетом способа передвижения пользователя;
- вычисление времени выезда с учетом дорожной ситуации;
- выбор оптимального (по времени нахождения в пути) маршрута движения;
- оповещение пользователя об изменении времени заданного напоминания-будильника для запланированного события с учетом дорожной ситуации.

Прототип мобильного приложения разработан на языке программирования Java с помощью бесплатной IDE Android Studio v3.0.1 [4], библиотеки SQLite (для работы с локальной базой данных), а также несколько видов Google Maps API для работы с картами в мобильном приложении, в том числе для определения маршрутов и вычисления значения «время в пути».

На рисунке 1 представлен графический интерфейс пользователя прототипа мобильного приложения управления событиями с использованием навигационных данных.

Таким образом, разработанный прототип использует текущее географическое местоположение устройства и геопозицию запланированного пользователем события, что позволяет заранее определить возможные маршруты движения с учетом способа передвижения (на городском транспорте, на автомобиле), обеспечивает выбор оптимального из них (по времени нахождения в пути), а также предоставляет возможность заранее сформировать оповещение об изменении времени, заданного для напоминания о запланированном событии [3].

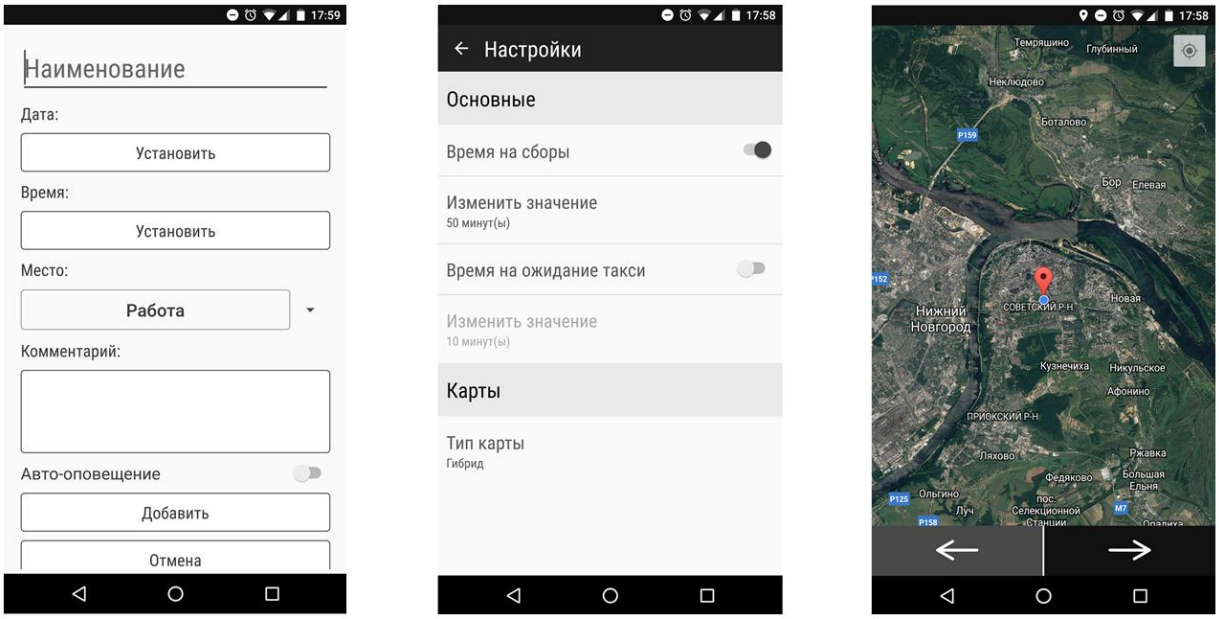


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя прототипа мобильного приложения управления событиями с использованием навигационных данных

Результатом дальнейших исследований должна стать интеллектуальная система планирования и приоритезации задач, обеспечивающая решение задачи определения приоритетов движения по заданным пользователем точкам в условиях динамически изменяющейся внешней среды (дорожная обстановка, погодные условия, очереди и т.п.), а также позволяющая сформировать и предложить пользователю 2-3 варианта решения (маршрута движения) на основе статистических данных и геолокации его мобильного устройства.

Библиографический список

1. Ватутин Э.И., Титов В.С., Емельянов С.Г. Основы дискретной комбинаторной оптимизации. М.: Аргамак-Медиа, 2016. – 270 с.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.
3. Степанова Е.В., Егоров Ю.С. Мобильное приложение управления событиями с использованием навигационных данных // Материалы XVI Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». – Н. Новгород: НГТУ, 2017. С. 64.
4. Хашими С., Коматинени С., Маклин Д. Разработка приложений для Android. Спб.: Питер, 2011. – 736 с.

E.V. Stepanova, Y.V. Kozlova, Y.S. Yegorov

DECISION-MAKING INFORMATIONAL SUPPORT FOR SCRIPTED EVENTS PRIORITY DETERMINATION USING COMBINATORIAL OPTIMIZATION METHODS

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

The work is devoted to the development of a decision support system for a mobile application. The system allows to determine the routes of the user's movement, provides the choice of the optimal route and automatically generates recommendations to the user. The developed algorithm uses the current geographic location of the device and the geolocation of the scheduled event.

Keywords: software; mobile application; decision support system; combinatorial optimization methods.

УДК 004:658.6

Е.Д. Старлытов, А.Б. Лазарева

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ УЧЕТА ГАЗА

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Представлена часть программно-технического комплекса «Газсеть», применяемого для создания автоматизированных систем учета газопотребления в коммунально-промышленном секторе. База данных, необходимая для работы приложения, спроектирована на базе СУБД Firebird2.5.Для организации интерфейса выбрана среда Delphi.

Ключевые слова: программно-технический комплекс, автоматизированная служба обработки данных, база данных.

В настоящее время в связи с увеличением производства и потребления природного газа актуальной становится задача учета объемов газа, которые поставляются газораспределительными предприятиями и расходуются потребителями.

Еще несколько лет назад сбор информации с приборов учета газа (системы учета, счетчики, электронные корректоры) осуществлялся в интерактивном режиме силами специального штата сотрудников. Подобный метод сбора информации является затратным и необъективным, так как возможны ошибки в процессе сбора и передачи данных.Качественно и быстро осуществить сбор и анализ данных позволяют лишь автоматизированные информационные системы, в которых применяется комплексное решение, объединяющее коммуникационное и измерительное оборудование, новейшие технологии передачи данных, физические линии связи и программные средства верхнего уровня [1].

Программно-технический комплекс(ПТК) «Газсеть» применяется для создания автоматизированных систем (служб) в коммунально-промышленном секторе учета газопотребления. Разработанная автоматизированная служба обработки данных стала частью ПТК «Газсеть». Можно выделить следующие этапы разработки автоматизированной службы обработки данных:

- анализ и проектирование базы данных;
- анализ первичных данных, поступающие с корректоров газа;
- разработка автоматической службы обработки временных файлов;
- проверка наличия данных через приложение «Анализ данных», являющееся частью ПТК «Газсеть».

Задача построения автоматизированной системы сбора данных включает в себя в первую очередь реализацию решений по передаче первичных данных в систему хранения и отображения данных. В роли источников первичной информации применяются технические средства нижнего уровня − электронные коллекторы ТС210, ТС215, ТС220, ЕК270, ЕК260,ЕК280,ЕК290, СПГ 761 (рис. 1).

Размещение узлов учета газа может быть любым: рядом с центром сбора данных и значительном удалении, по этой причине нет универсального способа связи ПК с корректором. На выбор схемы подключения и коммуникационного решения влияют, кроме расстояния до корректоров, еще и необходимость и реальные возможности подключения внешних источников питания; характеристика зоны расположения узла учета (взрывоопасная зона или нет); наличие источников естественных и искусственных электромагнитных помех. На рис. 2. представлена структура сбора данных.

Рис.1 Линии учета расхода газа на базе корректора ЕК-270

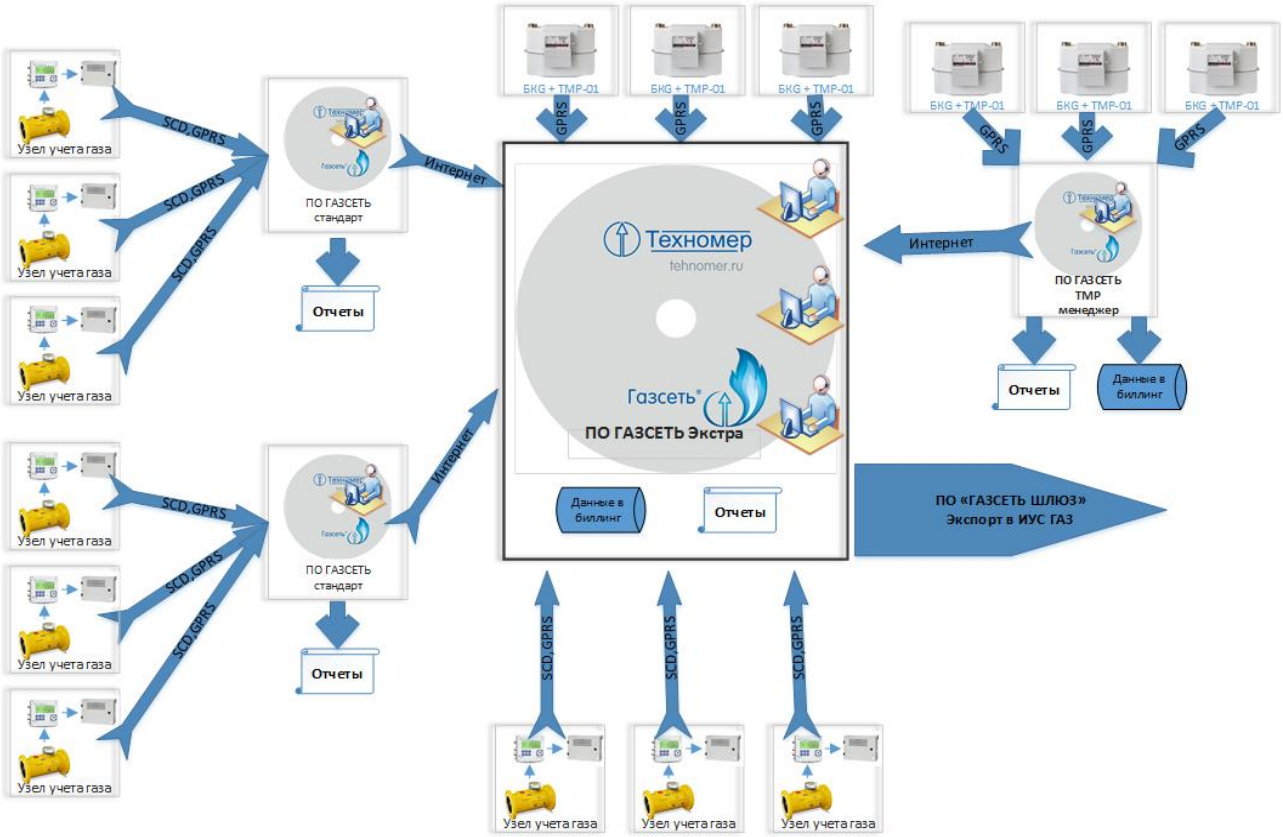


Рис. 2. Общая структура сбора данных ПТК «Газсеть»

Для работы автоматизированной службы обработки данных необходима база данных (БД) учета газа. Она должна содержать информацию об узлах учета газа, находящихся на этих узлах корректорах, а также информацию о пользователе: номера телефонов и т.д. Уровень базы данных − это центр сбора данных в локальной сети предприятия. Здесь находится сервер базы данных, оборудование связи. На этом уровне первичные данные от удаленных узлов учета сосредотачиваются в центральном хранилище − серверной базе данных. База данных играет роль исчерпывающего источника информации для технического обслуживания узлов и взаиморасчетов с потребителями.

База данных была спроектирована в СУБД Firebird 2.5,работающей на операционной системе Windows [2-4]. Это коммерчески независимая система.Firebird 5.2 – это сервер баз данных, который может обрабатывать множество независимых баз данных. Для организации интерфейса выбрана среда Delphi [5]. Также в базу данных были добавлены основные таблицы, в которых обрабатываются архивы данных с приборов: актуальные счетчики, месячный архив,

суточный архив, часовой архив, архив нештатных ситуаций, архив изменений параметров прибора, архив перебоев питания для корректоров серии СПГ.

Сбор данных учета газа – это бизнес-функция информационной системы по обеспечению доставки первичных данных от узлов учета до сервера сбора данных и преобразованию этих данных во внутреннее представление системы. Цель сбора данных − обеспечить наличие и постоянное пополнение как можно более целостного набора данных по каждому корректору в серверной базе данных. Первичные данные хранятся в специальных архивах. Для считывания этих данных был разработан специальный формат текстового файла (временный файл). Данный временный файл включает в себя все архивные данные с корректора и разделен на секции: Параметры корректора, месячный архив, суточный архив, часовой архив. В них записывается и зашифровывается подробная информация о текущих показаниях корректора. После полного заполнения временного файла он помещается в папку для обработки данных. На рис. 3 представлен пример архивов данных временного файла.

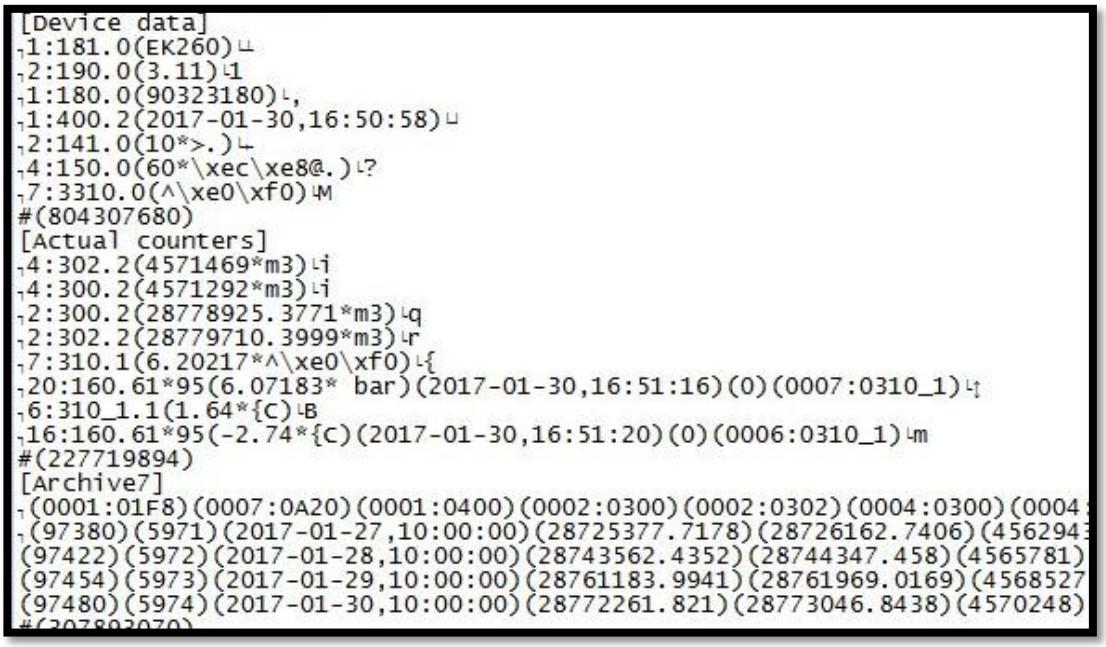


Рис. 3. Пример архива данных временного файла формата rdt

На этапе разработки автоматической службы были поставлены следующие задачи:

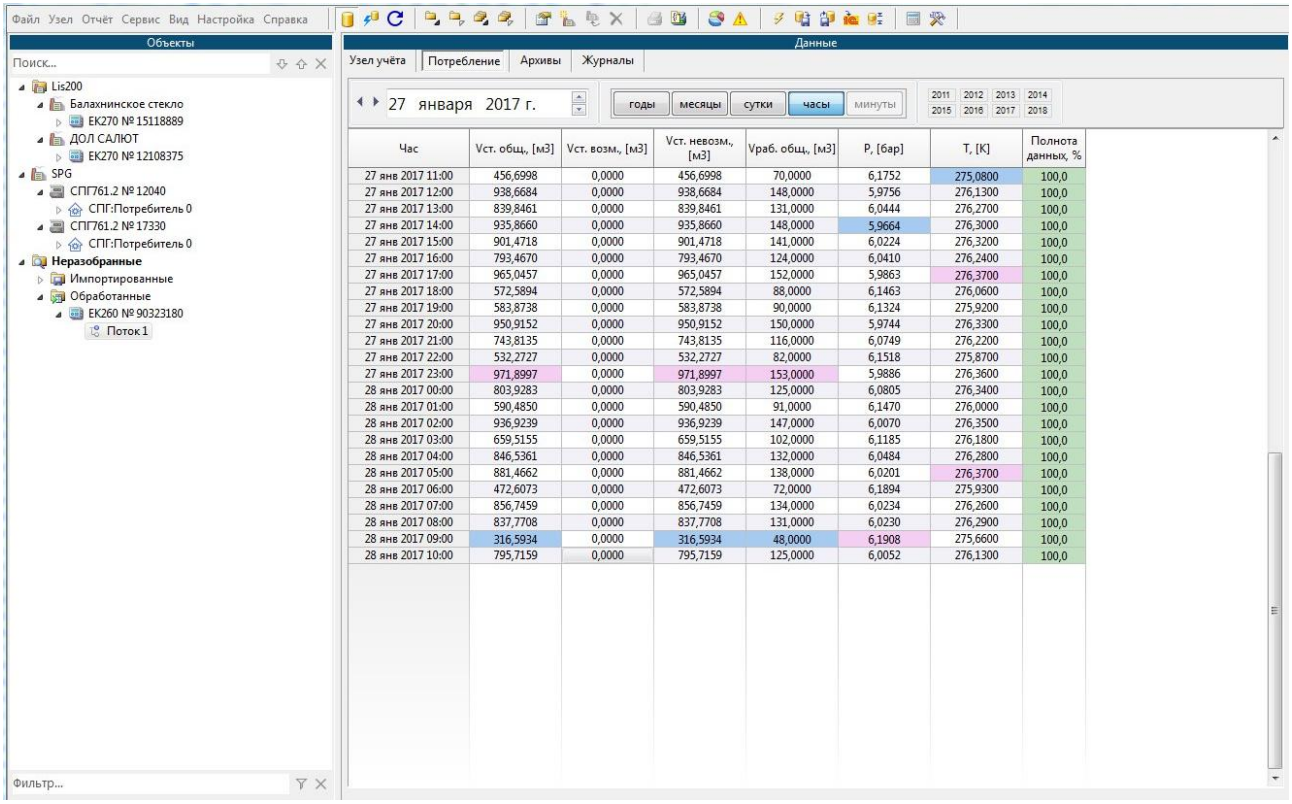
- реализовать алгоритм проверки первичных данных на достоверность;
- разработать алгоритм обработки и передачи архивных данных в базу;
- проверить успешность обработки данных.

Автоматическая служба ежесекундно проверяет папку для обработки данных до момента появления в ней временного файла одного из трех форматов: .rdt, .agr, .txt. После нахождения временного файла, программа начинает его обработку с проверки достоверности всех секций. Для этого во временный файл пишется контрольная сумма.

Используется алгоритм, в котором служба автоматической обработки рассчитывает контрольную сумму каждой секции, если она не совпадает со значением во временном файле, то этот файл не проходит проверку достоверности первичных данных.

Если файл прошел проверку первичных данных, то служба обработки переходит к следующему этапу, расшифровке данных из временного файла. Для этого был разработан специальный алгоритм, который расшифровывает строки во временном файле. После служба подключается к базе данных и записывает расшифрованные данные в специальные таблицы. Все действия обработки данных записывается в текстовый файл, который после можно

прочитать и узнать, когда и как временный файл обработался. После обработки временные файлы сохраняются в отдельные папки для успешно обработанных файлов.



Час	Vст. общ., [м3]	Vст. возм., [м3]	Vст. невозм., [м3]	Vраб. общ., [м3]	P, [бар]	T, [K]	Полнота данных, %
27 янв 2017 11:00	456,6998	0,0000	456,6998	70,0000	6,1752	275,0800	100,0
27 янв 2017 12:00	938,6684	0,0000	938,6684	148,0000	5,9756	276,1300	100,0
27 янв 2017 13:00	839,8461	0,0000	839,8461	131,0000	6,0444	276,2700	100,0
27 янв 2017 14:00	935,8660	0,0000	935,8660	148,0000	5,9664	276,3000	100,0
27 янв 2017 15:00	901,4718	0,0000	901,4718	141,0000	6,0224	276,3200	100,0
27 янв 2017 16:00	793,4670	0,0000	793,4670	124,0000	6,0410	276,2400	100,0
27 янв 2017 17:00	965,0457	0,0000	965,0457	152,0000	5,9863	276,3700	100,0
27 янв 2017 18:00	572,5894	0,0000	572,5894	88,0000	6,1463	276,0600	100,0
27 янв 2017 19:00	583,8738	0,0000	583,8738	90,0000	6,1324	275,9200	100,0
27 янв 2017 20:00	950,9152	0,0000	950,9152	150,0000	5,9744	276,3300	100,0
27 янв 2017 21:00	743,8135	0,0000	743,8135	116,0000	6,0749	276,2200	100,0
27 янв 2017 22:00	532,2727	0,0000	532,2727	82,0000	6,1518	275,8700	100,0
27 янв 2017 23:00	971,8997	0,0000	971,8997	153,0000	5,9886	276,3600	100,0
28 янв 2017 00:00	803,9283	0,0000	803,9283	125,0000	6,0805	276,3400	100,0
28 янв 2017 01:00	590,4850	0,0000	590,4850	91,0000	6,1470	276,0000	100,0
28 янв 2017 02:00	936,9239	0,0000	936,9239	147,0000	6,0070	276,3500	100,0
28 янв 2017 03:00	659,5155	0,0000	659,5155	102,0000	6,1185	276,1800	100,0
28 янв 2017 04:00	846,5361	0,0000	846,5361	132,0000	6,0484	276,2800	100,0
28 янв 2017 05:00	881,4662	0,0000	881,4662	138,0000	6,0201	276,3700	100,0
28 янв 2017 06:00	472,6073	0,0000	472,6073	72,0000	6,1894	275,9300	100,0
28 янв 2017 07:00	856,7459	0,0000	856,7459	134,0000	6,0234	276,2600	100,0
28 янв 2017 08:00	837,7708	0,0000	837,7708	131,0000	6,0230	276,2900	100,0
28 янв 2017 09:00	316,5934	0,0000	316,5934	48,0000	6,1908	275,6600	100,0
28 янв 2017 10:00	795,7159	0,0000	795,7159	125,0000	6,0052	276,1300	100,0

Рис. 4. Результат обработки временного файла в приложении «Анализ данных»

Все обработанные временные файлы можно посмотреть в приложении «Анализ данных» (рис. 4). Если корректор отсутствовал в базе данных, он будет помещен в папку «Обработанные». Если он до этого существовал, то после обновления появятся новые обработанные данные.

Накопленная в результате сбора архивов данных информация необходима для визуального просмотра, расчетов, печати отчетов и т.д. Результаты обработки временного файла позволяют выполнить следующие операции:

- просмотр и поиск информации;
- отчетность;
- анализ нештатных ситуаций;
- упорядочение и хранение данных;
- перемещение данных;
- интеграция с внешними системами;
- статистика и вычисления.

Рабочее место диспетчера позволяет анализировать полноту собранных данных (удачные и неудачные сеансы связи с прибором) и регистрировать в системе новые приборы.

На рис. 5 приведен пример использования обработанных данных.

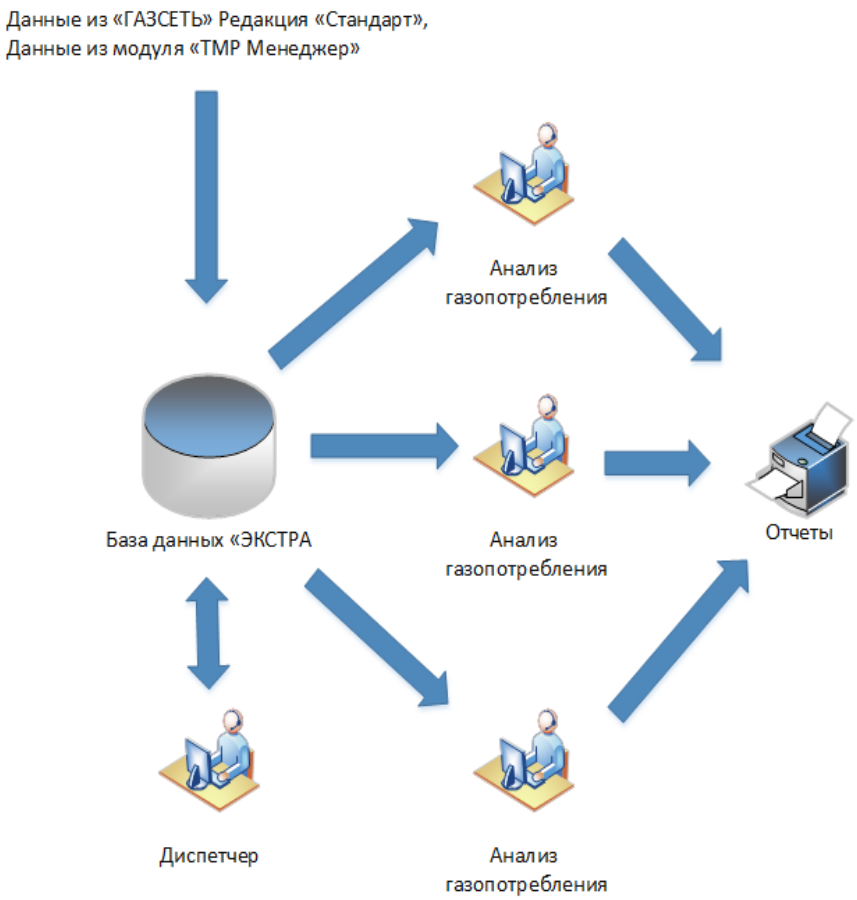


Рис. 5. Пример использования обработанных данных

На пользователя системы возлагаются обязанности по настройке конфигурации программного обеспечения верхнего уровня, а также наблюдению за нормальным функционированием комплекса. Таким образом, оператор системы становится ее администратором.

Выводы

В результате проделанной работы была разработана база данных для узлов учета газа. В системе автоматизированного сбора данных большинство ручных операций были заменены комплексом распределенных программных модулей. Применение автоматического сбора и обработки данных позволило снизить трудоемкость и сократить сроки обработки больших архивных данных, повысив их достоверность и надежность.

Комплекс программно-технических средств обеспечивает круглосуточное автономное выполнение специальных серверных процессов, обеспечивающих регистрацию, передачу, накопление и контроль полноты уже накопленных данных учета газа.

Библиографический список

1. Совершенствование организации метрологического обеспечения комплексного учета природного газа в единой системе газоснабжения/Метрологический периодический сборник научно-технических статей –Агентство корпоративных коммуникаций «Энергетик»Санкт-Петербург, 2015. – С. 278.
2. *БорриХелен*.Firebird. Руководство разработчика баз данных= The Firebird Book: A Reference for Database Developers.–Спб.:«БХВ-Петербург», 2007.–С.1104

3. *Helen Borrie.*The Firebird Book Second Edition // Volume 1: Firebird Fundamentals. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. –C. 470.
4. *Helen Borrie.*The Firebird Book Second Edition // Volume 2: Developing with Firebird Data. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.–C.532
5. Осипов Д. Базы данных и Delphi. Теория и практика.– Спб.:«БХВ-Петербург», 2011.– С.752.

E.D. Starlytov, A.B. Lazareva

AUTOMATION OF DATA COLLECTION AND PROCESSING WITH MICROPROCESSOR GAS ACCESSORIES

Arzamas polytechnic institute (branch)
of Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

A part of the software and hardware complex “Gazset”, used to create automated metering systems for gas consumption in the communal and industrial sector, is presented. The database required for the application is designed on the basis of the Firebird 2.5 database. To organize the interface, the Delphi environment is selected.

Key words: software and hardware complex, automated data processing service, database.

УДК 656.7.052

В.Г. Сухоребров, А.Д. Сюваткин

ПРОГРАММНЫЙ КАЛЬКУЛЯТОР РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ПАКЕТНЫХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Статья посвящена разработке алгоритмов расчета характеристик потока пакетных данных в произвольных распределениях. Приводится пример использования разработанного калькулятора программного обеспечения в распределении входящих запросов на обслуживание в соответствии с законом Парето.

Ключевые слова: мультимедийный трафик, поток пакетных данных, маршрутизатор, распределение Парето

Возрастание объемов передачи мультимедийного трафика по глобальным сетям порождает задачи оптимизации сетей передачи данных. Оптимизация пропускной способности сети или ее сегментов может выполняться путем модернизации как аппаратных средств, так и программного обеспечения. На этапе подготовки к оптимизации важно произвести оценочные расчеты многих параметров по обслуживанию пакетов маршрутизаторами. К сожалению, точность получаемых результатов зависит от очень многих свойств поступающих пакетов данных и принципа их обработки. На свойства поступающего потока значительно влияют длина пакетов, скорость их поступления, длительность пауз между поступлениями пакетов, время на обработку пакетов процессором, характер трафика, емкость буферов и т.п. Причем поступление пакетов может иметь взрывной характер, когда в отдельные моменты времени количество поступающих пакетов может резко возрасти в несколько раз и столь же малоожидаемое их количество может резко уменьшится. Такой характер поступления пакетов в определенной степени соответствует распределению Парето. Применительно к процессам в сетях с пакетной передачей важные положения распределения Парето можно интерпретировать примерно так:

- факторов, учтенных при проектировании сети, множество, и они в основном обеспечивают нормальную и предсказуемую работу сети, однако некоторые неучтенные факторы могут привести к важным деструктивным явлениям, например, к сбоям в работе из-за наличия «узких» мест по скорости передачи, могут вызвать весьма значительные нарушения в работе сети.
- применение только высокоскоростных (а значит и более дорогих) аппаратных и программных комплексов из-за наличия «узких» мест и непредвиденных факторов приведет к существенному и неоправданному недоиспользованию возможностей сети. Практика показала, что в реальности кпд сетей не сильно превышает 10%.

В любом случае необходимы предварительные исследования пропускной способности сегментов сети с получением численных результатов. Такие вычисления довольно трудоемкие и требуют значительного времени.

В данной работе предпринята попытка создания программного калькулятора для автоматизации оценочных расчетов характеристик маршрутизаторов при обработке пакетных данных с различным законом их поступления. С помощью этого калькулятора, задав исходные данные, можно рассчитать:

- среднюю скорость обслуживания;
- степень использования канала;
- вероятность отсутствия кадров в системе;
- вероятность отказов обработки пакетов;
- среднее число объектов;
- среднее число объектов в очередях;
- время ожидания в очереди;
- полное время ожидания.

Для проведения расчетов, например, прохождения пакетов через маршрутизатор, необходимо задать предполагаемый вид распределения поступления пакетов. В зависимости от выбранного распределения калькулятор определяет поступающую нагрузку в единой «метрике» в бит/с. Затем производится расчет необходимых результатов по описанным ниже формулам. Расчеты производятся для одного канала трафика. Расчеты в калькуляторе производятся на основе положений и формул из теории массового обслуживания для одноканальной системы с ожиданием и ограничением на длину очереди [1].

Получаемые результаты выводятся либо в виде таблиц и/или графиков.

Алгоритм вычислений, производимых разработанным калькулятором, представляет собой последовательность вычислений параметров обработки пакетов. Программная реализация калькулятора написана на языке Java с использованием объектно-ориентированного подхода в среде Eclips.

Приняты следующие обозначения:

N – число станций, создающих нагрузку;

K - число транзакций (пачек) от одной станции;

T – число часов работы станций в сутки;

B – процент пакетов, передаваемых за время ЧНН, относительно всего количества передаваемых пакетов за сутки;

L_k – размер пакета в байтах:

C_i – скорость передачи в сети, бит/с;

p – коэффициент использования канала;

Значение процента пакетов (B), передаваемых за время ЧНН, относительно всего количества передаваемых пакетов за сутки будет зависеть от вероятностного характера распределения пакетов.

В качестве примера работы калькулятора приведем результаты расчетов при распределении Парето.

При распределении вероятности поступления числа пакетов по зависимости Парето однозначно количество пакетов за время ЧНН заранее определить невозможно, поскольку пакеты поступают весьма неравномерно. Скорость их поступления может непредсказуемо и быстро измениться в несколько раз. Причем относительно низкая или высокая скорость может держаться некоторое время. При этом образуются пачки пакетов с примерно равными скоростями. Длительность таких пачек также непредсказуема и зависит от состояния загруженности окружающих сетевых элементов. Такой трафик иногда в литературе называют трафиком со сложной структурой [2].

При этом распределение пакетов и на высоких скоростях и на низких подобно закону Парето. Вдобавок возможны паузы поступления пакетов, то есть процесс подобен чередованию режимов «Включено», «Выключено» (ON/OFF).

В многоканальной передаче в паузах передачи одних каналов могут идти пакеты от других каналов. Если скорость передачи становится ниже некоторого порога, то можно также считать этот интервал как режим OFF.

Если обозначить R - среднюю скорость передачи (бит/с) в канале в режиме OFF, а S – среднюю скорость передачи (бит/с) в режиме ON, то удобно ввести параметр баланса вероятности в виде соотношения:

$$\gamma = R/S .$$

Задавая этот параметр и изменяя его, можно сравнительно просто варьировать режимами ON/OFF. Целесообразно также задавать длительности режимов ON/OFF. Пусть:

T_{ON} – длительность режима ON;

T_{OFF} – длительность режима OFF.

$T_\Sigma = n \cdot T_{ON} + j \cdot T_{OFF}$ – суммарная длительность режимов ON и OFF,

где - n, j – количество состояний соответственно ON и OFF в течении ЧНН.

Если расчет вести для ЧНН, то следует положить T_Σ = 1 час.

Теперь нетрудно определить, сколько пакетов придет за время ЧНН для одного канала:

$$n_p = R \cdot j \cdot T_{OFF} + S \cdot n \cdot T_{ON}.$$

Следовательно, для распределения Парето следует задавать следующие исходные данные:

$$R, S, T_{ON}, T_{OFF}, n, j .$$

Пример расчета параметров обработки трафика с распределением Парето

Распределение поступления пакетов подобным распределению Парето, имитируется чередованием режимов с высокой скоростью поступления (режим ON) и режима с небольшой скоростью поступления (режим OFF).

Для расчетов на калькуляторе примем конкретные данные для сети:

N = 400 – число станций, производящих посылку пакетов (производящих нагрузку);

K = 1000 – число транзакций от одной станции;

M_k = 80 – размер пакета в байтах:

C_i = от 16000 до 128000 бит/с – скорость передачи в сети (скорость обработки, доступная маршрутизатору);

Дополнительно:

R = 20 пакетов в секунду;

S = 100 пакетов в секунду;

T_{ON} = 0,08 секунд - длительность режима ON;

T_{OFF} = 0,28 секунд – длительность режима OFF;

n = 5000 пакетов с малой скоростью поступления за 1 час ЧНН;

$j = 1{,}143 \cdot 10^4$ пакетов с большой скоростью поступления за 1 час ЧНН;

$T_\Sigma = n \cdot T_{ON} + j \cdot T_{OFF}$ = 1 час – суммарная длительность режимов ON и OFF,

где - n, j – количество состояний соответственно ON и OFF в течении ЧНН.

Для заданных в этом примере начальных параметров с помощью разработанного калькулятора можно определить отдельно в режимах ON и OFF:

- степень использования канала (интенсивность нагрузки);
- среднее количество пакетов в очереди;
- среднее время ожидания в очереди;
- среднее время нахождения пакетов в маршрутизаторе;
- вероятность отказа в обслуживании.

Ниже приведены некоторые графики результатов этих расчетов в зависимости от производительности применяемого маршрутизатора. Под производительностью в данном случае понимается скорость обработки (в бит/с), на которую рассчитан данный маршрутизатор или иное устройство для обработки поступающих данных. Полагается, что скорость обработки соответствует скорости передачи в стандартной сети.

Зависимость интенсивности нагрузки на канал передачи данных, как отношение средней скорости поступления пакетов S или R к средней скорости обработки в данном устройстве, показан на рис. 1.

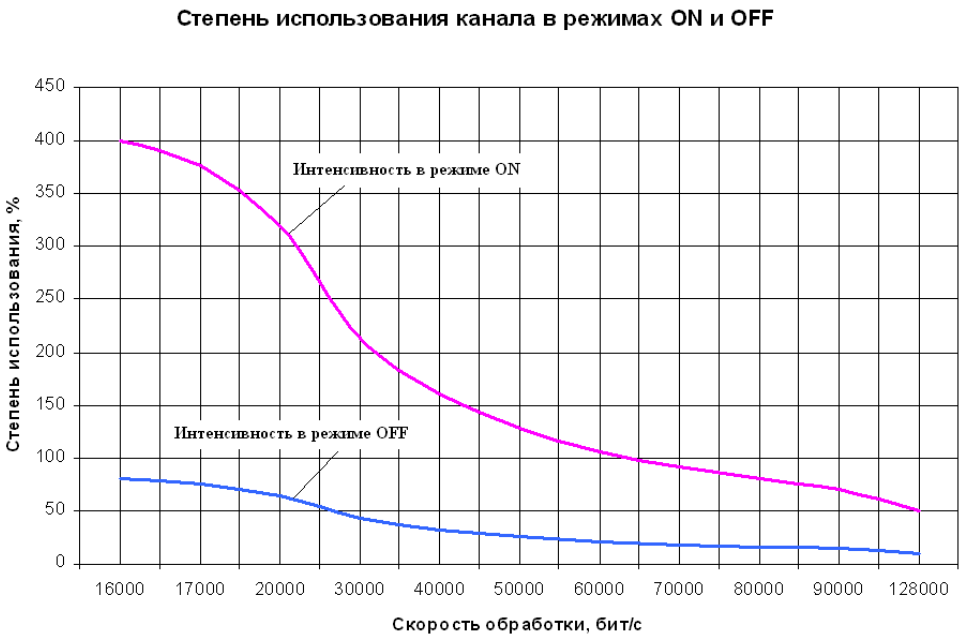


Рис. 1. Интенсивность нагрузки на канал в режимах ON и OFF

Видно, что при превышении скорости поступления пакетов над скоростью их обработки, загрузка канала выше 100 % и процессор не будет справляться с потоком. При более высокой производительности устройства загрузка канала будет менее 100 % даже для режима ON. Также из графика видно, что для устранения перегрузки канала в режиме ON скорость обработки пакетов должна быть не менее 65 Кбит/с. Исходя из этого и выбирается необходимый по быстродействию маршрутизатор. Однако при скоростях поступления пакетов в режиме OFF степень использования возможностей такого маршрутизатора окажется низкой. К сожалению, таковы условия работы маршрутизаторов в сетях с сильно неоднородной скоростью прихода пакетов.

На рис. 2 представлен пример графиков количества пакетов в очереди в режимах ON и OFF.

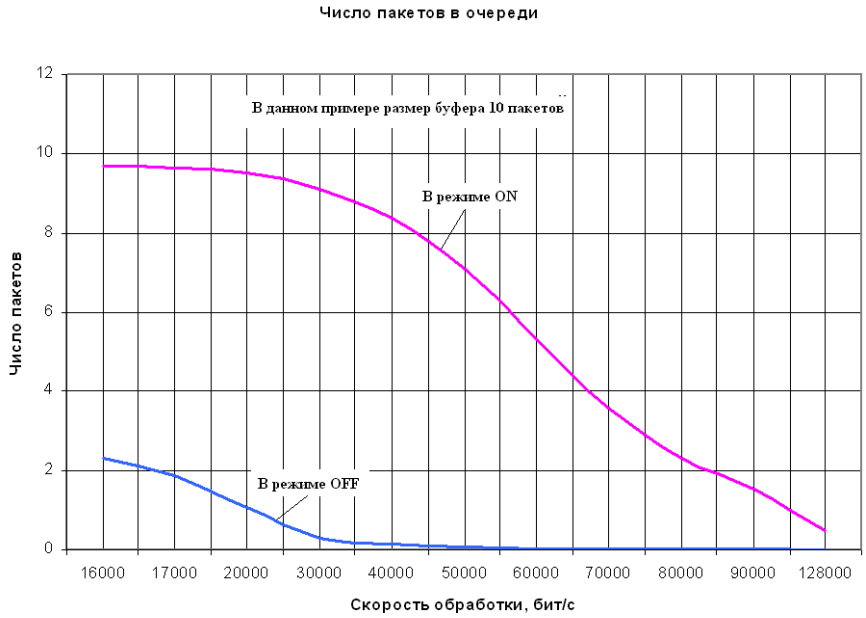


Рис. 2. Количество пакетов в очереди в режимах ON и OFF

Как видно из графиков, в режиме ON при низких скоростях обработки буфер практически заполнен. По мере обработки пакетов буфер освобождается со скоростью обработки пакетов C_i, однако в это же время записываются новые приходящие пакеты со скоростью v_{ion} и v_{ioff}. Состояние буфера определяется разностью скоростей поступления пакетов и их обработки. Поскольку в выбранном примере вплоть до скоростей обработки 65 Кбит/с скорость поступления в битах в режиме ON выше скорости их обработки, то буфер не успевает освобождаться и произойдут отбрасывания пакетов. Работа маршрутизатора в таком режиме недопустима. Нужен маршрутизатор с большей скоростью обработки. Такой пример выбран сознательно, чтобы видеть корректность работы калькулятора.

Чтобы обработать пакеты в очереди, необходимо время. На графиках рис. 3 приведены рассчитанные значения времени на обработку накопившихся в буфере пакетов в режимах ON и OFF. Причем для режима ON из графика исключены значения времени на обработку для случая скоростей обработки, меньших скорости их поступления.

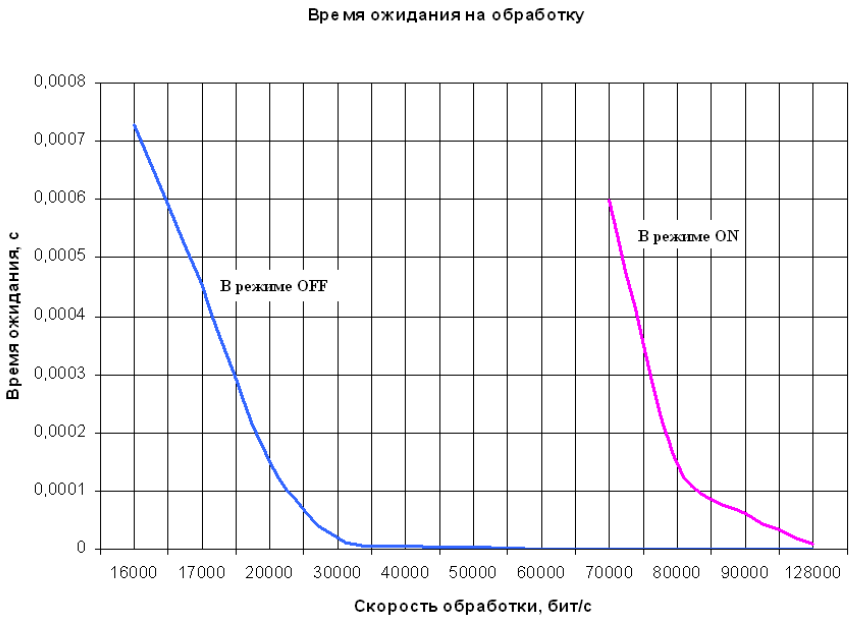


Рис. 3 Среднее время ожидания в очереди на обработку

Из этих графиков видно, что в режиме ON время на обработку очереди существенно больше, чем в режиме OFF.

Поскольку существует разница между скоростью поступления пакетов через буфер на обработку и скоростью их обработки, то существует вероятность отказа в обслуживании пакетов. Результаты расчета вероятности отказа в обслуживании пакетов в режимах ON и OFF приведены на рис. 4. Видно, что в случае скорости поступления пакетов в режиме ON выше скорости их обработки вероятность отказа близка к единице.

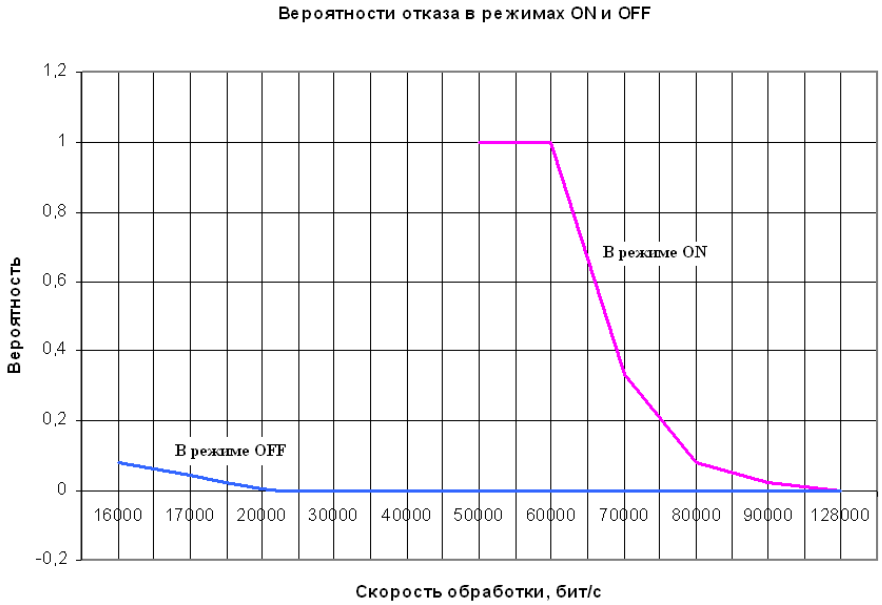


Рис. 4 Вероятности отказа в обслуживании пакетов в режимах ON и OFF

Используя программный калькулятор, можно произвести многократные расчеты с различными исходными данными и отследить, как меняются параметры обработки трафика. Можно исследовать два типа задач:

1. Задавая скорости обработки потока трафика в битах, по сути, выбираем маршрутизатор с разной производительностью. Очевидно, что чем выше скорость обработки маршрутизатором (или иным устройством) потока битов, тем меньше очередь и тем меньше вероятность отказа в обслуживании. Однако, стоимость высокопроизводительного устройства может быть неоправданно высокой. По расчетам на калькуляторе можно выбрать маршрутизатор с меньшей стоимостью, но вполне обеспечивающий достаточные параметры обработки трафика. Значит можно произвести оптимальный выбор оборудования по критерию цена – качество.
2. Второй тип задач предполагает исследования параметров обработки трафика для конкретного маршрутизатора с известной скоростью обработки и определенной емкостью входного буфера. В этом случае можно исследовать зависимость параметров обработки от соотношения скоростей поступления пакетов по отношению со скоростью обработки маршрутизатором. Это позволит определить допустимый верхний порог скорости поступления пакетов, и можно сделать выводы о возможной замене маршрутизатора на более производительный (более высокоскоростной).

Библиографический список

1. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания: учебное пособие. 2-е изд., испр. — Томск: Изд-во НТЛ, 2010. - 228 с.
2. Ушанев К. В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа Pa/M/1, H2/M/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой// Системы управления, связи и безопасности. 2015. №4. С. 215-250

V.G. Sukhorebrov, A.D. Syuvatkin

SOFTWARE CALCULATOR FOR CALCULATING THE FLOW CHARACTERISTICS OF THE PACKET DATA

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

The article is devoted to the development of algorithms for calculating the characteristics of batch data flow in arbitrary distributions. An example of the use of the developed software calculator in the distribution of incoming service requests under the Pareto law is given.

Keywords: multimedia traffic, packet data stream, router, Pareto distribution.

УДК 621.391.037.3

С.В. Шахтанов

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ И КОДОВЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Цель работы:Рассматривается проблема увеличения надёжности работы сенсорных сетей путём повышения их достоверности и энергоэффективности с использованием алгоритмических и кодовых методов.
Методология:В качестве решения задачи предлагается использовать перестановочное декодирование на основе мягких методов обработки данныхпринятых векторов избыточных блоковых кодов.
Результаты:На основе разработанной имитационной модели оценивается вероятность ошибочного декодирования комбинаций эквивалентных кодов, которые могут привести к ошибке восстановления комбинаций основного кода. Анализируется возможность оптимизации классического алгоритма перестановочного декодирования при применении когнитивной обработки кортежей символов, даётся сравнение вероятности ошибочного декодирования при одинарном приёме данных и их повторе.
Выводы:Метод перестановочного декодирования, применительно к системе двоичных избыточных кодов, позволяет решить задачу повышения достоверности и энергетического выигрыша кодирования, чтоснижает необходимость применения повторной передачи данных и экономит ресурс работы систем управления на основе беспроводных сенсорных сетей, который прямо пропорционально зависит от ёмкости батарей электропитания удалённых сенсорных датчиков.

Ключевые слова: сенсорные сети, достоверность, энергоэффективность, перестановочное декодирование, мягкие решения символов.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем обработки помехоустойчивых кодов в системах радиосвязи и сенсорных сетях является использование мягких алгоритмов декодирования принятых векторов избыточных кодов [1,2].Для решения этой проблемы была поставлена задачавыработки методики определения мягких решений символов (МРС) двоичных кодов с процедурой вычисления логарифма отношения правдоподобия [3]. Перспективным направлением для решения этой задачи является разработка имитационной модели с оценкой вероятности ошибочного декодирования комбинаций эквивалентных кодов, которые могут привести к ошибке восстановления комбинаций основного кода с однократным приёмом и с использованием канала обратной связи для запроса повтора информации при неудовлетворительном приёме кортежа символов.

Объект исследования

Отношение сигнал/шум на входе демодулятора является определяющим для оценки вероятности ошибочного приёма символа. Повышение передаваемой мощности датчиков беспроводных сенсорных сетей априори не приемлемо. Повысить вероятность и достоверность правильного приёма символа возможно при использовании помехоустойчивых коротких блоковых избыточных кодов с применением при декодировании МРС. Следовательно, появляется перспектива улучшения ряда характеристик работы беспроводной сенсорной сети: увеличение зоны охвата, увеличение скорости обмена, увеличение времени жизни датчиков, сокращение цикла управления. Всё это возможно при сохранении или даже росте заданных требований по надёжности и достоверности.

Разница отношений сигнал/шум при наличии и отсутствии кодирования и является энергетическим выигрышем кода (ЭВК). В системе мягкого декодирования помехоустойчивых кодов обеспечивается энергетический выигрыш до 3-х дБ по сравнению с жёсткими решениями символов (см. рис.1).

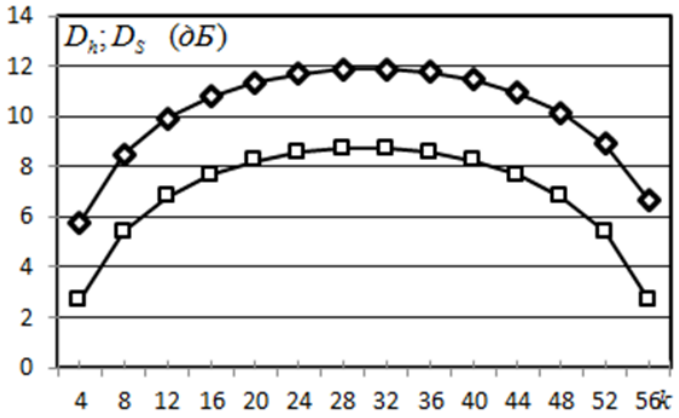


Рис 1. Выигрыш ЭВК при мягком декодировании относительно жёстких методов при различной длине кодовой комбинации

Процедура выработки МРС двоичных кодов заключается в вычислении логарифма отношения правдоподобия. Численные значения МРС (λ) оцениваются аналитическим выражением вида:

$$\lambda = 2E_b z / \sigma^2 \qquad (1)$$

где E_b – энергия сигнала, приходящаяся на бит, z – уровень принятого сигнала, σ^2 – дисперсия гауссовского шума. В общем случае параметр σ^2 неизвестен для корректного решения задачи. Требуется проведение предварительной оценки параметра, что усложняет и удорожает приёмное оборудование, а также увеличивает время обработки информации, что неприемлемо для многих современных и перспективных систем управления быстро текущими процессами, так как одним из важнейших требований является сокращения цикла управления элементами системы.

Отношение сигнал/шум в реальном канале при условии:

$$E_b / N_0 \to \infty \qquad (2)$$

в котором значение N_0 – спектральная плотность гауссовского шума, в случае жёстких решений и реализации алгоритма исправления t ошибок ЭВК оценивается выражением [2]:

$$D_h = 10\lg(R(t+1))\ \partial Б \qquad (3)$$

где k – число информационных символов в кодовом векторе длины n

$R = \frac{k}{n}$ - относительная скорость кода;

$t = \frac{d_{min} - 1}{2}$ - количество исправляемых кодом ошибок;

$d_{\min} = 2t + 1$ - метрика Хэмминга [2], минимальное кодовое расстояние.

При использовании алгоритмов исправления стираний (МРС), энергетический выигрыш определяется выражением:

$$D_s = 10\lg(Rd_{\min})\ \partial Б \qquad (4)$$

Отсюда следует, что при $E_b / N_0 \to \infty$, ЭВК в ходе исправления стираний в два раза выше, чем при обработке жёстких решений, поскольку параметр $d_{\min} = 2t + 1$, и поэтому при заданных условиях ЭВК составляет не более 3 $\partial Б$. Приведённые соотношения показывают, что безизбыточные кодирование при $n = k$, $t = 0$ и $d_{\min} = 1$ в системах обмена данными не дают какой-либо энергетический выигрыш [4].

Методы

В каналах с неизвестными параметрами для выработки МРС целесообразно использовать свойства стирающего канала связи с широким интервалом стирания в соответствии с аналитическим выражением:

$$\lambda_i(z) = \left| \frac{\lambda_{\max}}{\rho M_z} \times z \right| \quad (5)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное значение МРС, принятое для данной системы, M_z – математическое ожидание принимаемых сигналов, ρ – интервал стирания (обычно $0 \le \rho < 1$), а z – значение принятого сигнала с учётом влияния мешающих факторов [4].

Жёсткие решения символов в системе приёмника принимаются в виде нулей и единиц (битов). Мягкие решения принимаются в формате целочисленных оценок в соответствии с приведённой линейной функцией (2). На рисунке 2 представлены рабочие характеристики приёмника мягких решений для амплитудной (АМ) и двойной фазовой модуляций(ДФМ).

$$\lambda i = \left\| \left\lfloor \frac{\lambda_{max}}{\rho\sqrt{E}} * z \right\rfloor \right\| \quad (6)$$

В случае жёсткого декодирования код способен исправить одну ошибку. При использовании мягких методов, код исправляет два стирания. Таким образом, повышение кратности восстанавливаемых символов обеспечивает существенный рост ЭВК даже в условиях простейших видов модуляций АМ и ДФМ.

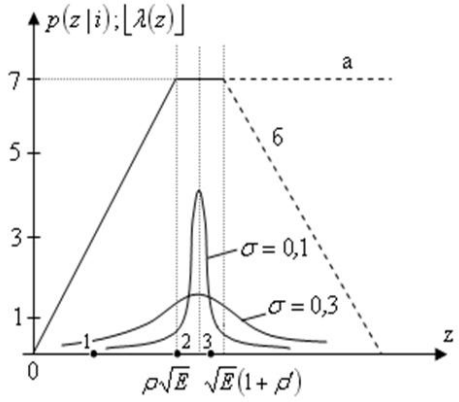


Рис 2. Модель стирающего канала связи с широким интервалом стирания а) использование АМ; б) использование ДФМ

Вычислительный процесс при реализации классического алгоритма перестановочного декодирования осуществляется по 12 стандартным шагам, описанным в прилагаемой литературе [3].

При реализации классического алгоритма перестановочного декодирования основные трудности заключаются в преобразованиях матриц на предмет выявления свойства невырожденности переставленной матрицы кода и приведения такой матрицы к систематической форме.

Проведение анализа алгоритма показывает, что при работе декодера на его входе кортежи символов из канала связи повторяются с некоторой периодичностью, зависящей от передаваемой информации.

Следовательно, имеется возможность запомнить повторяющиеся кортежи символов и при матричных преобразованиях МРС исключить их полную обработку из вычислительного процесса, ограничившись сокращённой обработкой с исключением шагов с 6 по 9 классического алгоритма.

Вариант технического решения с использованием функций перестановочного декодирования и предлагаемой когнитивной процедуры показан на рисунке 3.

Рис 3. Структурная схема приёмника с перестановочным декодером и когнитивной процедурой

При работе данного устройства можно выделить три режима: режим оперативного обмена данными с одновременным заполнением когнитивной карты декодера, режим обучения с использованием искусственной генерации данных и предварительный режим заполнения когнитивной карты декодера из устройств внешней памяти.

Анализ результатов

На рисунке 4 представлены результаты испытаний имитационной модели формирования МРС в соответствии с выражением (5) для ДФМ. В ходе испытаний оценивалась частота ошибочных решений P_λ для различных λ_i, при $i = \overline{1,7}$, для различных отношений E_b/N_0.

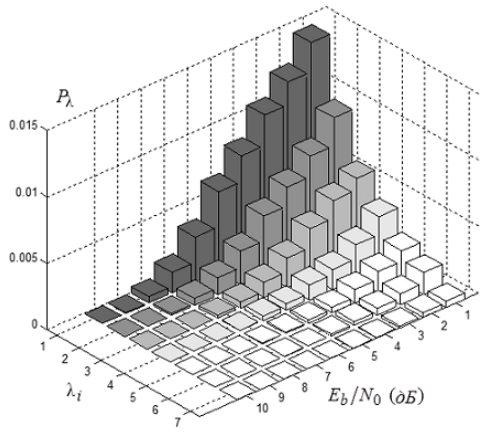


Рис 4. Гистограммы частоты ошибочной регистрации МРС с различными целочисленными значениями при использовании двойной фазовой модуляции

Оценивая значения принятых МРС, можно с определённой погрешностью, в зависимости от количества принятых МРС, оценить состояние канала связи, используя табличные данные вероятностных характеристик ошибочных МРС, определить степень доверия тем или иным МРС. В случае неудовлетворительного состояния канала связи целесообразно организовать повтор данных через канал обратной связи.

Результаты сравнения испытаний при одинарном приёме данных и при их повторе приведены на рис. 5.

Перестановочное декодирование является разновидностью мягкого декодирования блоковых помехоустойчивых кодов [5]. Оно основано на определении для каждого кодового вектора, переданного по каналу с ошибками, вектора эквивалентного кода, который образуется за счёт последовательного ранжирования мягких решений и создания биекции принятому вектору,

на основе которой вырабатывается непосредственно вектор эквивалентного кода, который передаётся уже по внутренним линиям, где отсутствуют помехи и нет ошибок.

E_b/N_0 ДФМ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
0 дБ	$5.2 10^{-3}$	$5.7\ 10^{-3}$	$4.6\ 10^{-3}$	$4.0\ 10^{-3}$	$3.1\ 10^{-3}$	$2.6\ 10^{-3}$	**$8.7\ 10^{-4}$**
0,46 дБ	$4.1\ 10^{-3}$	$4.4\ 10^{-3}$	$3.5\ 10^{-3}$	$3.0\ 10^{-3}$	$1.8\ 10^{-3}$	**$1.5\ 10^{-3}$**	**$6.0\ 10^{-4}$**
0,97 дБ	$3,0\ 10^{-3}$	$2.7\ 10^{-3}$	$2.6\ 10^{-3}$	$1.6\ 10^{-3}$	**$9.9\ 10^{-4}$**	$7.1\ 10^{-4}$	$3.0\ 10^{-4}$
1,55 дБ	$1.9\ 10^{-3}$	$2.1\ 10^{-3}$	$1.6\ 10^{-3}$	**$8.7\ 10^{-4}$**	$6.7\ 10^{-4}$	$4.1\ 10^{-4}$	$1.1\ 10^{-4}$
2,22 дБ	$9.9\ 10^{-3}$	**$8.4\ 10^{-4}$**	**$7.9\ 10^{-4}$**	$4.7\ 10^{-4}$	$2.4\ 10^{-4}$	$1.1\ 10^{-4}$	$4.0\ 10^{-5}$
3,01 дБ	**$4.9\ 10^{-4}$**	$4.0\ 10^{-4}$	$2.9\ 10^{-4}$	$2.6\ 10^{-4}$	$1.0\ 10^{-4}$	$4.0\ 10^{-5}$	**0**
3,98 дБ	$1.5\ 10^{-4}$	$9.0\ 10^{-5}$	$8.0\ 10^{-5}$	$5.0\ 10^{-4}$	$1.0\ 10^{-5}$	**0**	**0**
5,23 дБ	**0**	$1.0\ 10^{-5}$	$2.0\ 10^{-5}$	$1.0\ 10^{-5}$	**0**	**0**	**0**
6,99 дБ	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Граница при повторном приёме данных. Декодер с обратной связью

Граница при однократном приёме данных. Декодер без обратной связи

0 – вероятность ошибки исчезающе мала

Рис 5. Вероятностные характеристики ошибочных МРС при повторе данных (двойная фазовая модуляция)

Основой подобной реализации является создание когнитивной карты декодера в классической форме, которая позволяет выполнить вычисление эквивалентного кода по заранее подготовленному шаблону.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что за счёт эффекта ЭВК помехоустойчивое кодирование позволяет снизить мощности передатчика, следовательноиспользование в процессорах БСС механизма помехоустойчивого кодирования является перспективным направлением.

Наибольший эффект от применения избыточных кодов следует ожидать на пути использования перестановочного декодирования, демонстрирующего для двоичных кодов наибольший из возможных ЭВК. За счёт отказа от матричных вычислений в системе двоичного перестановочного декодирования по предварительным оценкам энергоёмкость процедуры декодирования может быть снижена от 20% до 35%[6].

Актуальной задачей использования средств перестановочного декодирования является поиск возможности отказа от эталонных матриц и исключение матричных преобразований, замены их соответствующими порождающими полиномами эквивалентных кодов, которые могут непосредственно применяться в сдвиговых регистрах при работе подобные кодов.

Библиографический список

1. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В. В. Деев. СПб. : Наука, 2007. – 267 с.
2. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса.– М. : Техносфера, 2005.–320 с.
3. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи // Ульяновск : УлГТУ, 2010.– 379 с.
4. Гладких А.А., Наместников С.М., Пчелин Н.А. Эффективное перестановочное декодирование

двоичных блоковых избыточных кодов / Журнал«Автоматизация процессов управления», № 1 (47), 2017. – С. 67 - 74.
5. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными. / Журнал «Электросвязь», №8, 2017 г. – С 52-56.
6. Гладких А.А., Наместников С.М., Пчелин Н.А. Повышение достоверности данных в системе беспроводных сенсорных сетей. / Журнал «Автоматизация процессов управления», №4 (50) 2017 г. С. 101-107

S.V. Shakhtanov

APPLICATION OF ALGORITHMIC AND CODE METHODS OF INCREASING RELIABILITY IN SENSOR NETWORKS

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics

Targeted work: The problem of increasing the reliability of sensor networks operation and increasing their reliability and energy efficiency using algorithmic and code methods is considered.
Methodology: As a solution to the problem, it is possible to use permutational decoding based on soft methods for processing the data of redundant block code vectors.
Results: Based on the developed simulation model, the probability of erroneous decoding of combinations of equivalent codes that can lead to the elimination of combinations of the main code is estimated. The possibility of optimizing the classical algorithm of permutational decoding with the use of cognitive processing of cortem symbols is analyzed, and the probability of erroneous decoding is compared with single data reception and their repetition.
Conclusions: The method of permutational decoding, applied to the system of binary redundant codes, allows to solve the problem of increasing reliability and energy gain. sensor sensors.

Key words: sensory networks, reliability, energy efficiency, permutation decoding, soft solutions.

УДК 621.398

И.В. Щелыканцев[1], А.В. Семашко[1], Ю.Г. Белов[1], И.В. Скрипник[2]

ОЦЕНКА РАДИУСА ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ НА ЗЕМНЫХ РАДИОВОЛНАХ

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, [2] ООО Научно-производственное предприятие "ПРИМА",

В статье приведена оценка максимальной дальности передачи информации в мобильных системах телеуправления, работающих на земных волнах. Представлен сравнительный анализ помехоустойчивости при использовании сигналов с ЧМн, ФМн и ОФМн для заданных вероятностей ложного срабатывания и правильного приема сообщений.

Ключевые слова: телеуправление, критерий Неймана-Пирсона, земная волна, подстилающая поверхность, отношение сигнал-шум.

Телемеханика является быстроразвивающейся областью техники сбора, передачи, обработки и отображения информации, необходимой для оперативного централизованного контроля и управления различными процессами. Это приводит к существенным изменениям, как в технических средствах, так и в методах передачи телемеханической информации.

Системы телемеханики должны обеспечивать высокую надежность передачи команд управления, поскольку ущерб от передачи неправильных команд или других оперативных могут привести к большим экономическим потерям [1].

Решение данной задачи с помощью радиорелейных и кабельных линий связи часто ограничено недостаточной живучестью данных систем в условиях чрезвычайных ситуаций.

Спутниковые системы связи позволяют решать задачи практически глобального территориального покрытия, но эти системы достаточно дороги в силу необходимости использования относительно большого числа спутников. В силу указанных обстоятельств, представляется целесообразным рассмотрение возможностей радиоканалов в других диапазонах частот: организация телеуправления посредством КВ-канала; организация телеуправления посредством поверхностных волн СВ-диапазона.

Первый вариант интересен тем, что пространственные (ионосферные) волны КВ-диапазона распространяются на большие расстояния (тысячи километров) и даже при сравнительно малой мощности передатчика способны огибать земной шар. Однако подобный канал является ненадежным вследствие нестабильности ионосферы. Поэтому имеет смысл оценить возможности второго варианта.

Средневолновому диапазону присущ ряд недостатков – малый частотный ресурс, высокий уровень атмосферных и промышленных помех, крупные габаритные размеры антенных устройств. Однако есть и существенные достоинства: возможность загоризонтной связи за счет явлений дифракции и рефракции, отсутствие замираний сигнала, возможность работы на фиксированной частоте в любое время суток

Значительный практический интерес представляет оценка потенциальных возможностей систем телеуправления (радиуса зоны обслуживания) объектами промышленности, работающих по радиоканалу средневолнового диапазона на земной волне, при использовании сравнительно недорогой приемо-передающей аппаратуры (передатчиков средней мощности и малогабаритных антенных систем).

Расчет помехоустойчивости системы телеуправления

Системы телеуправления 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.

Помехоустойчивость подобных систем 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 $K_{пу}$, равный отношению напряженности поля помех $E_п$ в полосе частот 1кГц к напряженности поля сигнала $E_с$ в точке приема, при котором $P_к = 0{,}5$ при заданной вероятности $P_л$.

В системах телеуправления команды обычно передаются кодом, состоящим из N блоков по n двоичных символов в каждом [2,3]. Переданная команда считается принятой правильно при верном приеме всех N блоков. Блок считается принятым верно при наступлении не более s ошибок, причем место ошибки в комбинации может быть любым. Количество ошибок s в приеме символов n-разрядной двоичной комбинации 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; P_c – вероятность правильного приема символа; $C_n^s = \dfrac{n!}{s!(n-s)!}$ — число сочетаний из n по s.

Вероятность ложного приема многоблочной команды за время $T_{сл}$ определяется по формуле [5]:

$$P_л = \left(\frac{\sum_{i=0}^{s} C_n^i}{2^n} \right)^N \frac{NT_{сл}}{T_к}. \qquad (1)$$

где $T_к$ – длительность команды.

Вероятность правильного приема многоблочной команды определяется выражением [5]:

$$P_к = \left(\sum_{i=0}^{s} C_n^s P_c^{n-s}(1-P_c^s) \right)^N. \qquad (2)$$

В соответствии с критерием Неймана-Пирсона из (1) определяется число допустимых ошибок s в блоке символов двоичной комбинации, при котором обеспечивается заданная $P_л$. Далее полученная величина s подставляется в (2). Из этого выражения при заданной вероятности правильного приема $P_к$ определяется требуемая вероятность $P_с$ правильного приема символа. При известной вероятности правильного
приема символа определяется отношение сигнал/шум (ОСШ) в полосе согласованного фильтра, а далее коэффициент помехоустойчивости $K_{пу}$ радиолинии.

Методика расчета радиуса зоны обслуживания

Для расчетов выберем следующие типы подстилающих поверхностей [6]:

- морская вода средней солености ($\varepsilon = 70$, $\sigma = 5$ См/м)
- холмы средней высоты со средним облесением ($\varepsilon = 13$, $\sigma = 6 \cdot 10^{-3}$ См/м)
- лес ($\varepsilon = 1.004$, $\sigma = 10^{-5}$ См/м).

Для нахождения значений напряженности полей использовалась компьютерная программа GRWAVE, рекомендованная Международным союзом электросвязи (МСЭ)[7].

Мощность сигнала на входе приемника в согласованном режиме (сопротивление приемника согласовано с сопротивлением антенны ($Z_{вх.пр} = Z_{вх.а}$)) определяется согласно [8] по формуле:

$$p_{пр.опт.} = \frac{E^2 l_д^2}{4R_{вх.а}} = \frac{E^2 l_д^2}{4R_{вх.пр.}} = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \frac{E^2 G_{пр}}{480} \qquad (3)$$

где $G_{пр.}$ – коэффициент усиления приемной антенны; E - напряженность поля, создаваемая произвольной передающей антенной; λ – длина волны.

На приемную антенную систему помимо сигнала от передающей радиостанции воздействуют помехи и шумы искусственного происхождения (индустриальные помехи, атмосферные шумы). При расчете необходимо также учитывать собственные шумы антенно-фидерного тракта.

Согласно [8,9] суммарная мощность шума $p_{ш.пр}$ на входе приемника определяется из соотношения:

$$p_{ш.пр} = kT_ш \Delta f_{пр}. \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $Tш$ - полная шумовая температура на входе приемника; T_0 – эталонная температура, принятая равной 290 К; $\Delta f_{пр}$ – ширина полосы пропускания приемной системы.

Опуская многочисленные преобразования можно показать, что с учетом (4) суммарная мощность шума на входе приемника определяется из соотношения (КПД фидера $\eta_ф = 1$):

$$p_{ш.пр} = kT_0 \Delta f_{пр}[1 - \eta_a + \frac{E^2_{вн.п} \lambda^2 \eta_a}{960\pi\kappa T_0}],$$

где $E_{вн.п}$ – напряженность поля внешних помех в полосе частот 1кГц (мкВ/м); η_a – КПД антенны.

Используя формулы (3), (4) и данные, приведенные в рекомендации ITU-R P.372 [10] для центральной России, определяем отношение мощности сигнала к мощности шума в полосе сигнала на разных дальностях от передатчика и сравниваем с минимально допустимым ОСШ, обеспечивающим телеуправление с заданными вероятностями ложного срабатывания и правильного приема. Расстояние до передатчика, на котором рассчитанное ОСШ оказывается равным пороговому, является искомой величиной радиуса зоны обслуживания системы телеуправления.

Расчет радиуса зоны обслуживания для мобильной штыревой антенны

Как отмечалось выше, недостатком СВ-диапазона являются большие габариты антенных систем, что затрудняет построение систем связи, работающих в этом диапазоне. Для практики представляет интерес рассмотреть возможности применения малогабаритных антенн, в частности антенны АШ-10. Значения коэффициента усиления, рассчитанные в программе MMANA [11], представлены в таблице 1. Для определенности значения суммарного внешнего шума взяты для сельской местности.

Таблица 1 – Коэффициент усиления антенны АШ-10 в диапазоне 0,5-5МГц

Частоты, МГц	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
G	0.006	0.03	0.15	0.35	0.70	1.20

Расчеты произведены для трех типов подстилающих поверхностей при использовании ФМн-сигналов и излучаемой мощности p = 100Вт в диапазоне частот 0,5-5МГц, длительность команды $T_к$ = 1 с, допустимая вероятность ложного приема команды $P_л = 10^{-5}$ за время $T_{сл}$ = 1 сут (86400 с.), вероятность правильного приема команды (надежность управления) $P_к$ = 0.999. На рисунках 5-7 показаны расчетные значения радиуса зоны обслуживания систем телеуправления для рассматриваемых типов подстилающих поверхностей на частоте 1 МГц.

Из представленных результатов видно, что при фиксированном количестве блоков N при увеличении разрядности n радиус зоны обслуживания D_{max} увеличивается. При фиксированной разрядности n увеличение количества блоков N приводит к уменьшению значения D_{max} уменьшается. Максимально возможный радиус зоны обслуживания достигается при использовании одноблочных команд (N = 1) максимальной разрядности (n = 1000). Однако при n>200 величина D_{max} растет незначительно. Те же закономерности наблюдаются и на других частотах.

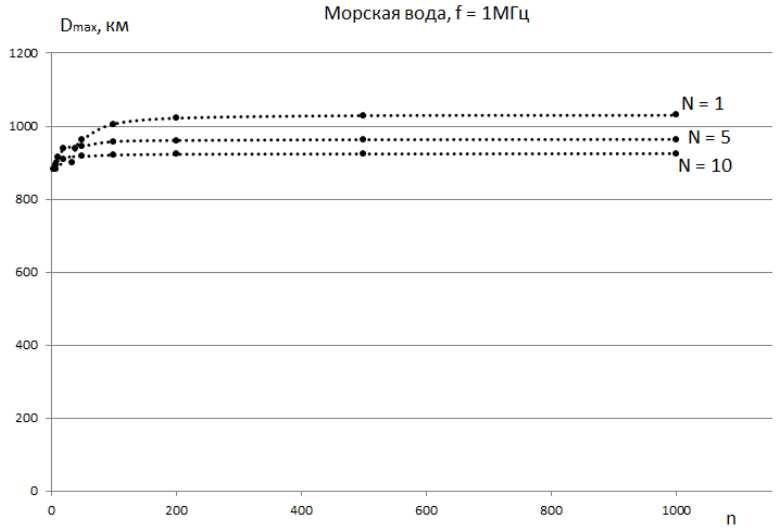


Рис. 1 – Радиус зоны обслуживания систем телеуправления для морской воды

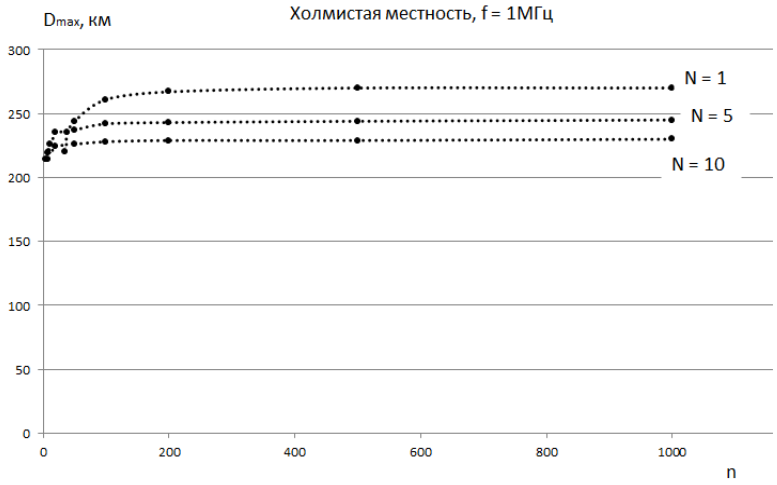


Рис. 2 – Радиус зоны обслуживания систем телеуправления для холмистой местности

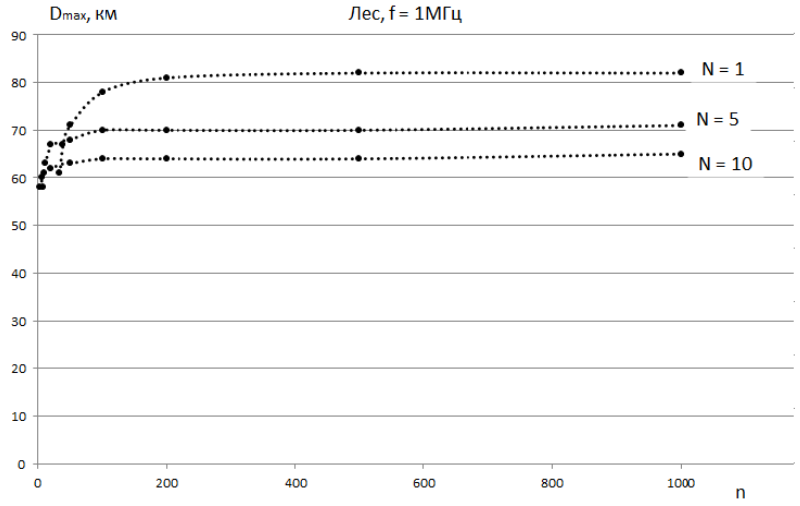


Рис. 3 – Радиус зоны обслуживания систем телеуправления для леса

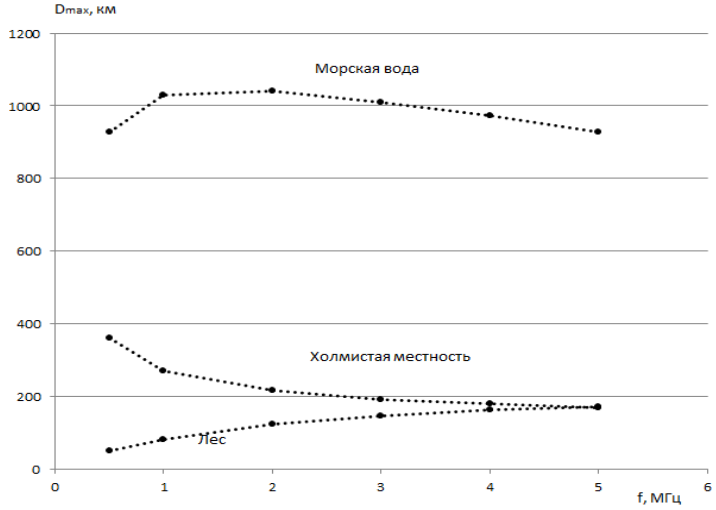


Рис. 4 – Максимальные радиусы зоны обслуживания для трех типов подстилающих поверхностей в диапазоне 0,5-5МГц при *N* = 1 и *n* = *1000*

На рис.1-4 показаны частотные зависимости радиуса зоны обслуживания систем телеуправления при N = 1, n = 1000 и заданных выше значениях $P_к$ и $P_л$ для рассматриваемых типов подстилающих поверхностей.

Очевидно, что для морской воды существует оптимальная частота $f_{опт}$ = 2МГц, на которой радиуса зоны обслуживания имеет максимальное значение в рассматриваемом диапазоне и составляет D_{max} = 1041 км. Для холмистой местности частота, на которой величина D_{max} принимает максимальное значение, составляет f = 0,5 МГц, несмотря на высокий шумовой уровень и низкую эффективность антенн на данной частоте (D_{max} = 360 км). Для леса величина D_{max} монотонно растет с увеличением частоты (при f = 5 МГц D_{max} = 170 км). При варьировании излучаемой мощности для леса и холмистой местности характер зависимости $D_{max}(f)$ не изменяется. Для морской воды имеет место смещение значения $f_{опт}$ в меньшую сторону при увеличении излучаемой мощности и наоборот.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при использовании СВ-радиоканалов, работающих на земной волне, для передачи телемеханической информации даже при небольшой излучаемой мощности и простых антеннах радиус зоны обслуживания систем телеуправления составляет от нескольких сотен до одной тысячи километров. Это выгодно отличает рассмотренные радиоканалы от ионосферных КВ-каналов, учитывая большие трудности организации ионосферной связи между радиостанциями, расположенными на небольших расстояниях друг от друга (100-500 км).

Список литературы

1 Горюнов А. Г. Телеконтроль и телеуправление: учебное пособие / С.Н. Ливенцов, А.А. Лысенок – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 130 с.
2 Телемеханика: Учеб. пособие для студентов вузов спец. «Автоматика и телемеханика».— 2-е изд , перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 1985.—423 с,ил.
3 Передача телемеханической информации / Васильев Р.Р., Шастова Г.А….– М.: Госэнергоиздат, 1960. - 146 с.
4 Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. — 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. — 664 с.
5 Ашимов Н. М. Методика оценки помехоустойчивости *n*-разрядных двоичных сигналов. Журнал «Электросвязь»,2009,№11 стр. 43-46.

6 Родос, Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн (распространение радиоволн): учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 90 с. 40 илл., 7 библ.
7 Recommendation ITU-R P.368-9. Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. [Электронный ресурс]. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-9-200702-I!!PDF-E.pdf.
8 Боков Л.А. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 410 с.
9 Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн: учебник для вузов связи. – М.: Радио и связь, 1984 – 272 с., ил.
10 Recommendation ITU-R P.372-11. Radio noise. [Электронный ресурс]. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-11-201309-S!!PDF-R.pdf.
11 Гончаренко И. В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002 – 80 с.: ил.

I.V. Shchelykantsev[1], A.V. Semashko[1], Y.G. Belov[1], I.V. Skripnik[2]

THE EVALUATION OF TELECONTROL DISTANCE OF TECHNICAL OBJECTS BY USING THE TERRESTRIAL RADIO WAVES

[1]Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
[2]Limited Liability Company Research&Production Enterprise PRIMA

In the article the evaluation of the maximum distance of a transmitting information in the mobile telecontrol systems working by using the terrestrial waves is given. The comparative analysis of a noise immunity with using the FSK-, PSK- and DPSK-signals for the defined probabilities of the false activation and the correct receiving of messages is presented.

Keywords: telecontrol, the Neumann-Pearson criterion, terrestrial wave, underlying surface, signal-to-noise ratio.

УДК 62-52-83:656.56

Е.В. Бычков, О.В. Крюков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА ГАЗА В ТРУБОПРОВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS CFX

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены исследования распространения возмущений в трубопроводах путем применения технологий вычислительного эксперимента с решением в виде комбинации стационарного решения и пульсационной составляющей.Решены задачи влияния различных неоднородностей в прямолинейных трубопроводах на процесс формирования и распространения пульсаций потока газа и распространения пульсаций в трубах с отводами.

*Ключевые слова:*Трубопроводные системы, магистральные газопроводы, поток газа, газоперекачивающий агрегат, вычислительный эксперимент.

Введение

Проектирование различных объектов газовой промышленности связано с необходимостью учета большого числа факторов [1-3], влияющих на эксплуатацию проектируемого объекта[4-6]. Известно, что на выходе из нагнетателей газоперекачивающих агрегатов [7-9] наблюдается пульсационный характер движения потока. Вместе с тем, внутри трубопроводной системы имеются различные неоднородности, такие как отводы, тройники, запорная арматура и т. п., которые могут приводить к появлению дополнительной неоднородности потока газа в трубопроводе [10-12].

Опубликованные экспериментальные данные по распространению возмущений в трубопроводах [13,14] весьма ограниченны и не могут быть адекватны во всех режимах и условно систематизированы. Теоретические исследования и модели являются одномерными, имеют большое количество гипотез и допущений и вряд ли могут быть надежно применены к анализу потока газа в реальных трубопроводах [15,16]. Поэтому вопрос распространения пульсаций потока газа вдоль трубопровода (трубопроводной системы) представляется слабо изученным как экспериментально, так и теоретически [17,18].

Для исследования распространения возмущений в реальных трубопроводах перспективным представляется применение технологий вычислительного эксперимента, базирующихся на прямом решении осредненных уравнений Навье-Стокса турбулентных течений вязкой сжимаемой жидкости. Применение этих технологий предполагает разработку методики численного моделирования и ее верификацию [19,20]. Именно эта цель ставятся в настоящей работе.

Аналитическая модель движения газа в прямолинейном трубопроводе

Рассмотрим фрагмент трубы с протекающим газом произвольного, но неизменного по длине трубы поперечного сечения длиной *dx* (рис. 1).

Согласно [1], нормальные напряжения в сжимаемом газе связаны с давлением и скоростями *V* соотношением:

$$\sigma_{xx} = -p + \frac{4}{3}\mu\frac{\partial V}{\partial x}, \qquad (1)$$

где μ– эффективная динамическая вязкость, представляющая собой сумму ламинарной и вихревой (турбулентной) вязкости. Поскольку течение одномерное, под турбулентной вязкостью понимается ее среднее по поперечному сечению трубы значение.

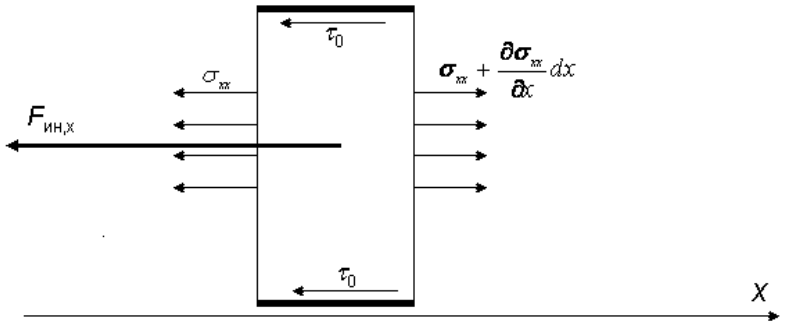


Рис. 1. Нагрузки, действующие на элементарный объем газа, протекающего в трубе: σ_{xx}– нормальные напряжения, причем, положительными считаются растягивающие напряжения, τ_0– касательные напряжения на стенке трубы, $F_{ин,x}$– сила инерции газа, движущегося в направлении оси *X* со скоростью *V* и положительным ускорением

Проектируя на ось X усилия, действующие на газ, находящийся в трубопроводе, а так же используя закон сохранения массы газа, при условии что давление *p* и плотность ρ связаны адиабатой Пуассона получим:

$$\left.\begin{aligned} \rho\left(\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}\right) &= -\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{4}{3}\mu\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{P}{S}\tau_0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho V) &= 0, \\ p-p_0 = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_0(\rho-\rho_0) &= c^2(\rho-\rho_0), \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где*c*– скорость звука.

Касательное напряжение τ_0 может быть представлено через коэффициент сопротивления *l* трубы

$$\tau_0 = \lambda\,\frac{\rho V^2}{8}. \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления трубы λ зависит от числа Рейнольдса и может быть определен экспериментально по потерям давления по длине трубы (т.е. с учетом режима течения, шероховатости, температуры и т.д.). Расчетно-экспериментальные значения λ приведены в справочниках по гидравлике для труб разного поперечного сечения. Например, для трубы круглого поперечного сечения может быть использована формула Никурадзе [12].

В случае малых возмущений решение представляется в виде комбинации стационарного решения и пульсационной составляющей. Проводя стандартную процедуру линеаризации, имеем:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+2u_0\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial t}+\left(u_0^2-c^2\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-\nu\left(\frac{\partial^3 u}{\partial t\partial x^2}+u_0\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)+\lambda\frac{P}{4S}u_0\left(\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{3}{2}u_0\frac{\partial u}{\partial x}\right)=0. \quad (4)$$

В уравнении (4) u_0, ρ_0, μ, λ, *P*, *S*– исходные данные. Для круговой трубы радиуса *R*,

$$\frac{P}{4S}=\frac{1}{2R}. \quad (5)$$

Достоинствами уравнения (4) являются возможность анализа поведения пульсационной составляющей скорости или давления для труб с различным поперечным сечением и возможность исследования влияния периметра поперечного сечения на характер изменения пульсационной составляющей скорости и давления.

Для исследования пульсационного характера движения газа в трубопроводе, ищем частное решение уравнения в виде $u = Ae^{-\gamma x}\cos(\omega t - kx)$. Это позволяет получить систему:

$$-\omega^2 + 2u_0 k\omega + \left(u_0^2 - c^2\right)\left(\gamma^2 - k^2\right) - \nu u_0 (3\gamma k^2 - \gamma^3) - \lambda u_0^2 \frac{3P}{8S}\gamma = 0; \quad (6)$$

$$2u_0\gamma\omega - 2\gamma k\left(u_0^2 - c^2\right) + \nu\omega\left(\gamma^2 - k^2\right) - \nu u_0\left(3\gamma^2 k - k^3\right) - \lambda u_0 \frac{P}{4S}\omega + \lambda u_0^2 \frac{3P}{8S}k = 0. \quad (7)$$

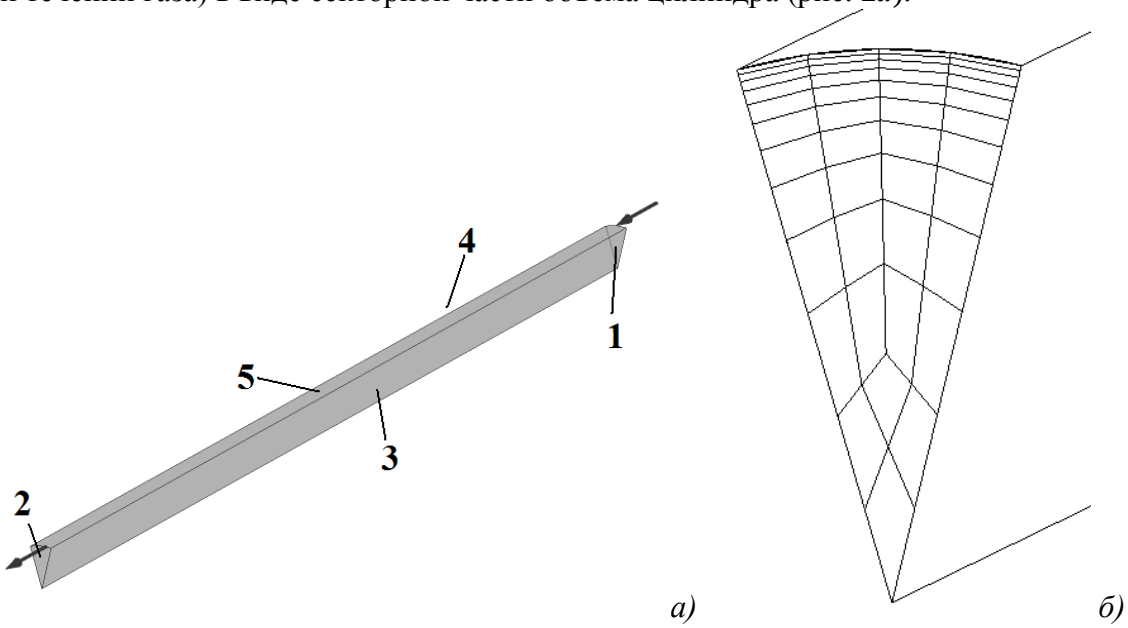
Уравнения (6), (7) можно рассматривать как систему уравнений относительно γ и kпри известныхu_0, ρ_0, μ, λ, P, S, ω. Нелинейная система алгебраических уравнений относительно коэффициента затухания возмущений γ и волнового числа k может быть решена численно, например, методом Ньютона средствами пакета Maple.

Численное моделирование затухания возмущений в прямолинейной трубе

Распространение возмущений в трубе изучалось методами вычислительного эксперимента с использованием программного комплекса ANSYS CFX (ANSYS, Inc., США). Программный комплекс ANSYS CFX базируется на методе конечных объемов и ориентирован на решение гидрогазодинамических и термодинамических задач.

В рамках модели турбулентного течения сжимаемой жидкости решается система уравнений количества движения, неразрывности и энергии [1,12]. Для замыкания системы используется составная модель турбулентности Ментера.

Версии программного комплекса не имеют 2D решателя, что приводит к избыточным вычислительным затратам при решении осесимметричных и плоских задач. При исследовании прямолинейного трубопровода оптимальным является моделирование расчетной области (области течении газа) в виде секторной части объема цилиндра (рис. 2*а*).



а) *б)*

Рис. 2. Расчетная область задачи*(а)*и фрагмент сеточной модели *(б)*

1 – входная граница; 2 – выходная граница; 3, 4 – плоскости секторной области; 5 – граница, имитирующая стенку трубы

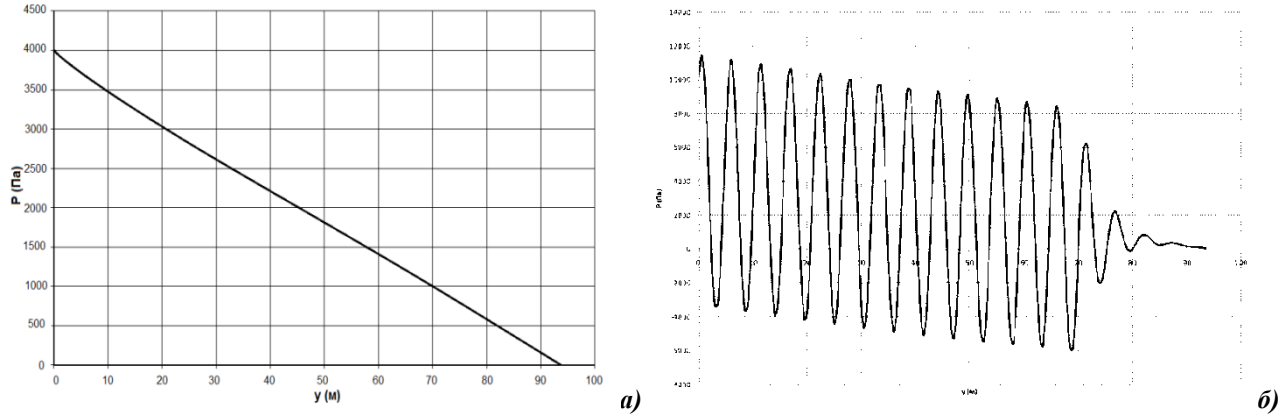
Угол сектора необходимо подбирать по результатам численного моделирования и с учетом поддержания приемлемого качества сетки – отсутствия элементов с чрезмерно острыми или тупыми углами между гранями.Геометрическая и сеточная модели строились в программном комплексе ANSYS ICEM CFD. Фрагмент сеточной модели представлены на рис. 2 *б)*.Узлы сетки в поперечном сечении расчетной области сгущаются к границе, имитирующей стенку трубы таким образом, чтобы ближайший к стенке узел оказался в зоне логарифмического распределения скоростей турбулентного пограничного слоя.

Расстояние между узлами в осевом направлении варьировалось с целью контроля над их влиянием на порождаемую схемную вязкость: проводилось сравнение результатов с одинарным и удвоенным межузловым расстоянием. По результатам вычислений проводился окончательный выбор межузлового расстояния.

На входной границе (граница 1 на рис. 2) задаются значения скорости ($u=f(t)$, $v=w=0$) и температура, на выходной границе 2 – средняя величина избыточного давления ($p_{ср}$= 0), на плоскостях 3, 4 секторной области – условия симметрии (V_n=0, $\partial T/\partial n$=0, где n – нормаль к соответствующей плоскости), на границе 5, имитирующей стенку трубы, задается условие прилипания ($\vec{V}=0$) и адиабатичности ($\partial T/\partial n$=0).

Решение задачи проводилось в два этапа. Первый этап – получение установившегося течения в трубе (на вход подается фиксированная скорость u_0). Второй этап – получение нестационарного решения при действии на вход гармонических возмущений (на вход подается скорость $u_0+ u_1 \cos(\omega t-kx)$). Интегрирование уравнений системы проводится методом Эйлера 2-го порядка с итерационной обработкой на каждом временном слое.

На рис. 3 представлены характерные результаты по распределению давлений вдоль оси трубы соответственно для первого *а)* и второго *б)* этапов решения задачи (здесь и далее давление p следует понимать, как избыточное давление относительно давления среды, в расчетах принималось 50 атм).



а) *б)*

Рис. 3. Распределение давлений вдоль оси трубы длиной 93,5 м: *а)* при стационарном течении газа; *б)*при подаче на вход трубыгармонических возмущений с частотой ω=512 $с^{-1}$.

Обработка результатов вычислительных экспериментов проводилась следующим образом. Из ординат осевого распределения давлений, полученных в некий момент времени при действии пульсаций частоты ω и ординат осевого распределения давлений при установившемся течении в трубе, строилась функция:

$$p^* = f(x,t^*) = \frac{P(x,t^*) - P_{стац}(x)}{P_{стац}(x=0)}, \quad P_{стац}(x=0) = \max P_{стац}(x). \qquad (8)$$

Далее строилась огибающая участка стационарных затухающих колебаний, откуда и получался коэффициент затухания γ. На рис. 4 показан типичный вид функции $f(x,t^*)$ (линия *1*)для ω=128 $с^{-1}$, на этом же рисунке показана экспоненциальная огибающая $e^{-\gamma x}$ (линия *2*), гдеγ-коэффициент затухания).

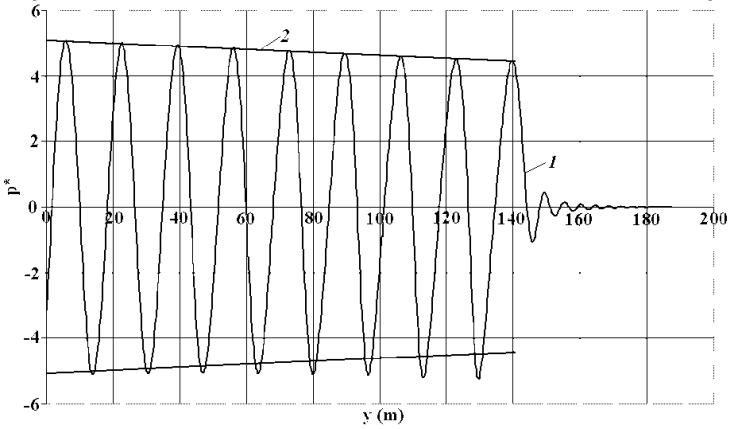


Рис. 4. К обработке результатов вычислительного эксперимента

Сравнение результатов моделирования с данными аналитического исследования

Расчеты по аналитической модели и вычислительные эксперименты с использованием программного комплекса ANSYS CFX проводились при следующих условиях.Рабочая среда – сжимаемый газ CH_4, находящийся в трубе под давлением порядка 50 атм в стандартных температурных условиях($T \cong 298$ К). Радиус трубы принят равным $R = 0.5$ м, скорость установившегося течения $u_0 = 20$ м/с, амплитуды пульсаций скоростей $u_1 = 0{,}4$ м/с. Расчеты проводились в диапазоне частот $128\ с^{-1} \le \omega \le 5026\ с^{-1}$.

На рис. 5 представлены характерные результаты вычислений по распространению возмущений вдоль трубы, для частоты подаваемых на вход трубы возмущений $\omega = 5026\ с^{-1}$.

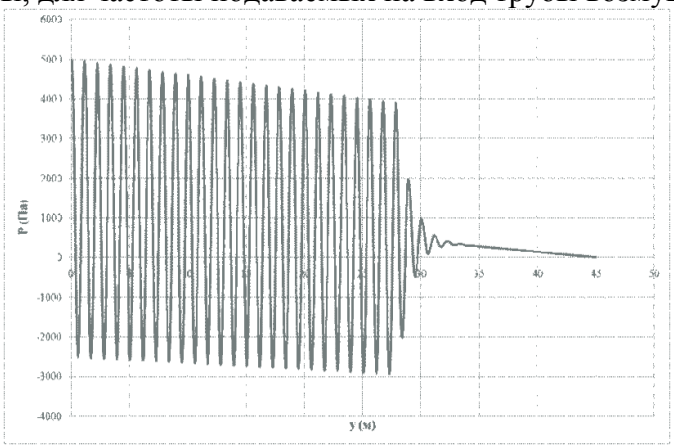


Рис. 5. Распределение давлений вдоль оси симметрии при подаче на вход трубы гармонических возмущений с частотой ω=2512 $с^{-1}$.

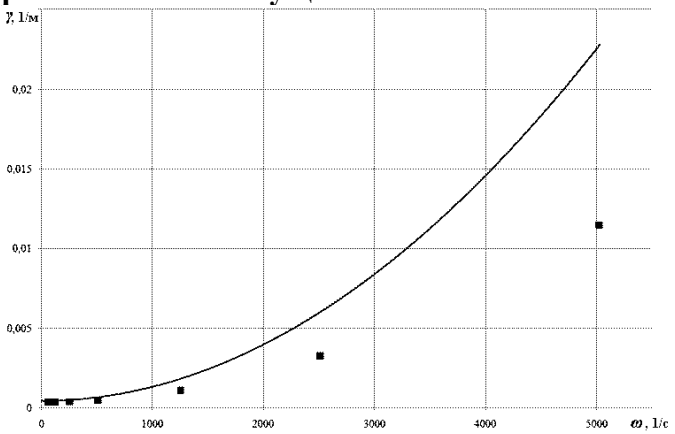


Рис. 6. Результаты аналитические (сплошная линия) и вычислительных экспериментов (точками) по коэффициенту затухания в зависимости от различных частот для трубы.

Расчеты по аналитической модели сводятся к решению нелинейной системы уравнений (2), (3), которое проводилось методом Ньютона с использованием пакета Maple. Обработанные по указанной выше методике результаты вычислительных экспериментов и результаты расчетов по аналитической модели сопоставлены в графическом виде на рис. 6как функции частоты подаваемых на вход трубы радиуса $R = 0{,}5$ мвозмущений ω.

Заключение

Результаты аналитического решения и вычислительного эксперимента в первом приближении соответствуют друг другу. Подтверждение одного результата другим позволяет использовать построенную методику вычислительного эксперимента с использованием программного комплекса ANSYS CFX для анализа распространения возмущений в более сложных задачах, для которых аналитическое исследование уже является проблематичным.К числу этих задач относятся задачи влияния различных неоднородностей в прямолинейных трубопроводах на процесс формирования и распространения пульсаций потока газа, исследование формирования и распространения пульсаций в трубах с отводами, в трубах с тройниками, в системах труб, исследование нестационарного течения газапри охлаждении за центробежным вентилятором и т.д.

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. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б.Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // В сборнике: Материалы конференции «Управление в технических и сетевых системах». Под ред. С.Н. Васильева. 2012. – С. 467-469.
4. Милов В.Р., Суслов Б.А., Крюков О.В. Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой отрасли //Автоматизация в промышленности. – 2009. – №12. – С. 16-20.
5. Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы автоматизации установок для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности.– 2008. – №6. – С.6-10.
6. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
7. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XI Международного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.
8. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. 2010. № 5. – С. 2-11.
9. Крюков О.В.Частотное регулирование производительности ЭГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39-43.
10. Бабичев С.А., Бычков, Крюков О.В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. 2010. №9. – С.30-36.
11. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 4 (29). С. 35-38.
12. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. 2007. – 260с.
13. Серебряков А.В., Крюков О.В. О новых возможностях технологий SmartGrid // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 2. – С. 47-48.

14. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. Т. 81. – № 12. – P. 649-655.
15. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // ВестникЮжно-Уральскогогосударственногоуниверситета. Серия: Энергетика. – 2016. – № 1. Т. 16. – С. 66-74.
16. 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.
17. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2 томах // Ответственный за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – Том 2. – С. 404-409.
18. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г.Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. – №2. – С. 5-10.
19. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SmartGrid для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №4. – С. 36-38.
20. KryukovO.V. Methodologyandtoolsforneuro-fuzzypredictionofthestatusofelectricdrivesofgas-compressorunits // RussianElectricalEngineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.

E.V. Bychkov, O.V. Kryukov

RESEARCH OF PULSATIONS OF THE FLOW OF GAS IN PIPELINES WITH USE OF THE PROGRAM ANSYS CFX COMPLEX

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

Researches of distribution of perturbations in pipelines by use of technologies of a computing experiment with the decision in the form of a combination of the stationary decision and the pulsation component are provided. Tasks of influence of different non-uniformity in rectilinear pipelines on process of formation and distribution of pulsations of a flow of gas and distribution of pulsations in pipes with leadoutsare solved.

Keywords: Pipeline systems, main gas pipelines, gas flow, gas-compressor units, computing experiment.

УДК 62-52-83:656.56

Е.В. Бычков, О.В. Крюков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И АППАРАТНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕХОДА НА ОБСЛУЖИВАНИЕ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
АО «Гипрогазцентр»

Представлен анализ принципов организации обслуживания и ремонта приводных электродвигателей электроприводных газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистрального транспорта газа. Рассмотрены эксплуатационные факторы, влияющие на надежности изоляции статорных обмоток высоковольтных электродвигателей. Показано, что внедрение современных и достоверных средств мониторинга технического состояния агрегатов и прогноза их ресурса на компрессорных станциях позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность и безаварийность работы в штатных режимах, а также осуществить переход к техническому обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию газоперекачивающих агрегатов.

Ключевые слова:компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, приводной электродвигатель, эксплуатационные факторы надежности.

Введение

В последнее время, после ряда крупных техногенных аварий в России на опасных производственных объектах (ОПО), многочисленными нормативными документами (НТД) установлены требования по оснащению их оборудования системами мониторинга для контроля состояния, диагностирования и прогнозирования ресурса[1-4].

В соответствии с Федеральным законом РФ «О промышленной безопасности» компрессорные станции (КС) являются ОПО[5-7]. Большинство электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА), эксплуатируемых на КС ПАО «Газпром», выработали нормативный срок эксплуатации или близки к этому[8-10] и поэтому к ним предъявляются особые требования по контролю состояния и продлению сроков эксплуатации[11-14].

В ПАО «Газпром» активно ведутся работы по созданию и внедрению систем мониторинга и прогнозированию состояния интегрированных в САУ КС. Такие системы развиты для газотурбинных ГПА и в меньшей степени для ЭГПА. Существующие системы мониторинга и прогнозирования ЭГПА построены по тем же принципам, что и системы для газотурбинные. В них основной акцент делается на механические узлы и элементы ЭГПА, практически отсутствуют системы мониторинга и современные методы оценки двигателя.

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность вопросов, связанных с развитием методов оценки показателей надёжности ЭГПА, совершенствованием существующих и разработкой новых методов оценки их технического состояния с использованием независимых многокритериальных универсальных систем мониторинга[15-17]. Актуальность этих задач подтверждается их соответствием приоритетным направлениям развития науки и техники, а также основными положениям энергетической стратегии России на период до 2020 года, Программой повышения надежности работы и эффективности КС с ЭГПА и вопросами, связанными с проблемами развития энергетики ПАО «Газпром».

При этом особое внимание уделяется именно дорогостоящим мощным приводным высоковольтным синхронным двигателям (ПВСД), требующим анализа и мониторинга показателей надёжности, а также исследованию работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях, включая безопасную и эффективную эксплуатацию.

Несмотря на большую актуальность, перечисленные задачи решаются медленно, так как процессы деградации элементов крупных электрических машин достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов. Кроме того, иссле-

дования надежности крупных ПВСД связаны с необходимостью проведения натурных испытаний (в том числе и разрушающих) на дорогостоящем оборудовании.

В соответствии с этим необходимо решить следующие задачи[18-21]:

1. Выполнить обзор и критический анализ современных средств и методов оперативной диагностики и мониторинга состояния ПВСД.
2. Произвести сбор, обработку и анализ исходных данных по аварийности ПВСД на КС ООО «ГП ТГ Нижний Новгород».
3. Исследовать режимы работы ПВСД, влияющие на ресурс изоляции, с оценкой изменения основных эксплуатационных факторов и определить их корреляции с наработкой до отказа.
4. Разработать оптимальную структуру ВСМП режимов работы ПВСД, приводящих к ускоренному старению изоляции, алгоритм ее функционирования и компьютерную модель наработки до отказа.

Модель старения высоковольтной изоляции статора ПВСД

Классификация причин отказов изоляции статоров ПВСД приведена на рис. 1, а их интенсивность в зависимости от наработки до отказа – на рис. 2.

Рис. 1. Классификация причин отказов ЭГПА.

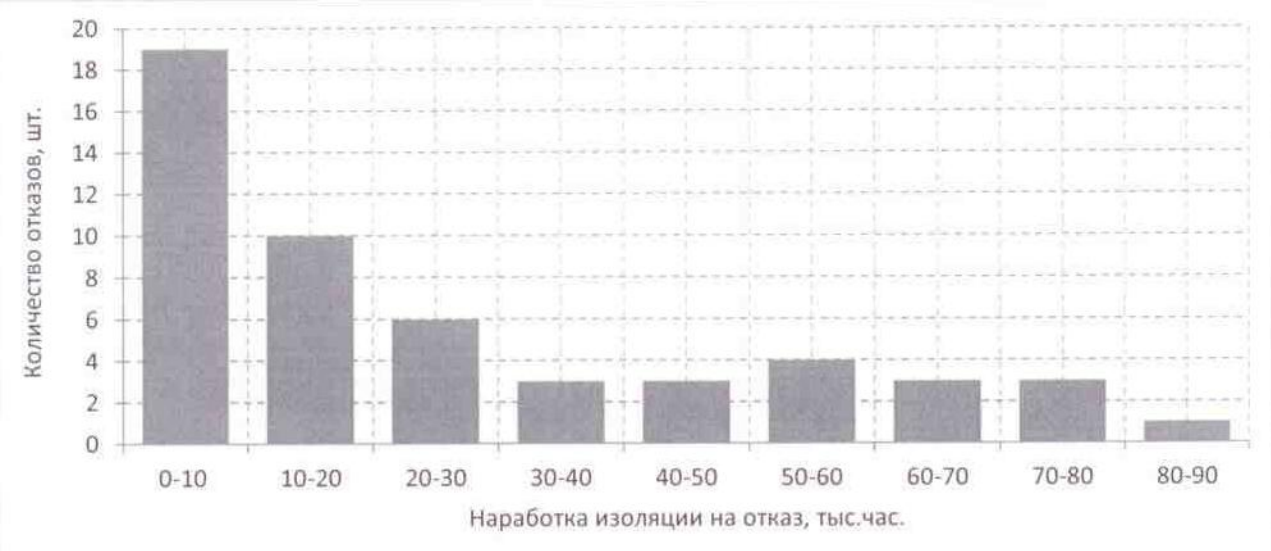


Рис. 2. Диаграмма частоты отказов изоляции статоров ПЭВД

Анализ характера гистограммы на рис. 2 позволяет выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения отказов. Для обоснования данной гипотезы и определения числовых характеристик надежности выполнена статистическая обработка результатов полученной классификации с решением следующих задач:

- определен вид функции плотности распределения;
- вычислены параметры полученного распределения;
- с помощью критерия согласия установлена степень совпадения эмпирического с теоретическим распределением.

Распределение вероятности безотказной работы во времени и средняя наработка для экспоненциального закона распределения описываются уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} P(t) = \exp[-\lambda t], T_{cp} = \frac{1}{\lambda}; \\ a(t) = \lambda \exp[-\lambda t], \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы, $a(t)$ – частота отказов, λ – интенсивность отказов, $T_{ср}$ – средняя наработка до отказа, t- интервал времени. При этом учитываем, что экспоненциальный закон является однопараметрическим с неизменной интенсивностью отказов λ=const на интервале нормальных режимов эксплуатации.

Для проверки гипотезы проведем расчет согласия экспоненциального распределения с теоретическим по критерию χ^2:

$$\chi^2 = \Sigma_{m-1}^{k} \frac{(h_m - N_p p_m)^2}{N_0 p_m}, \quad (2)$$

где k – число интервалов (группы выборки); h_m, $N_p p_m$ - эмпирическое и теоретическое значения абсолютной частоты отказов; N_0 – общее число наблюдаемых электродвигателей ЭГПА. Результаты расчетов сведены в табл. 1. В результате расчета для доверительной вероятности нормального распределения β = 0,95 и числа степеней свободы $r = k - 2$, получено значение $\chi^2 = 7{,}0573$. Расчетное значение $\chi_{расч}^2 < \chi_{табл}^2 = 14{,}1$ и гипотеза об экспоненциальном распределении наработки на отказ ПВСД не отвергается.

Таблица 1.

Теоретические расчеты наработки электродвигателей ЭГПА

№ инт	Граница интервала, тыс.час	Абсолют. частота	Относит. частота	Интервальная вероятность отказа	Эмпирическая частота	Теоретическая частота	Отношение частот
k	Δt_i	h_m	$e^{-\lambda t i}$	p_m	$N_0 \cdot p_m$	$(h_m - N_0 \cdot p_m)^2$	χ
1	0-10	19,000	1,000	0,318	16,523	6,137	0,371
2	10-20	10,000	0,682	0,217	11,273	1,620	0,144
3	20-30	6,000	0,465	0,148	7,691	2,859	0,372
4	30-40	3,000	0,318	0,101	5,247	5,050	0,962
5	40-50	3,000	0,217	0,069	3,580	0,336	0,094
6	50-60	4,000	0,148	0,047	2,442	2,426	0,993
7	60-70	3,000	0,101	0,032	1,666	1,779	1,067
8	70-80	3,000	0,069	0,022	1,137	3,471	3,053
9	80-90	1,000	0,047	0,015	0,776	0,050	0,065
	N_0, шт.	52,000				$\chi^2_{расч.}$	**7,057**
	$T_{ср}$, час	26.153				$\chi^2_{табл.}$	**14,10**
	λ	3,82E-05					

Различными авторами [2,18] проведены исследования, устанавливающих зависимости старения изоляции от температуры:

- эмпирические уравнения Монтзингера, в соответствии с которыми сроки службы изоляции (T_1 и T_2) при различных температурах (τ_1 и τ_2) связаны соотношением

$$\frac{T_1}{T_2} = 2^{-\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta v}}, \quad (3)$$

где Δv – постоянная, равная изменению температуры, вызывающему сокращение срока службы изоляции данного класса в 2 раза;

- закон Арениуса, описывающий процесс старения изоляции на основе кинетики химических реакций:

$$k = k_{макс} \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (4)$$

где k – коэффициент скорости химической реакции, W_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

В результате проведенных исследований, получены статистические данные о наиболее характерных диапазонах изменения температуры обмотки, охлаждающего воздуха в различных режимах.

На рис. 3приведена зависимость сработки ресурса изоляции ПВСД от среднегодовой температуры, полученная на основе уравнения Вант-Гоффа-Аррениуса:

$$\ln T_0 = \frac{B}{\theta} - G, \quad (5)$$

где T_0 – средний срок службы; θ – среднегодовая температура изоляции, К; B = 0,99 · 10^4 К, для микалентной изоляции G=14,33.

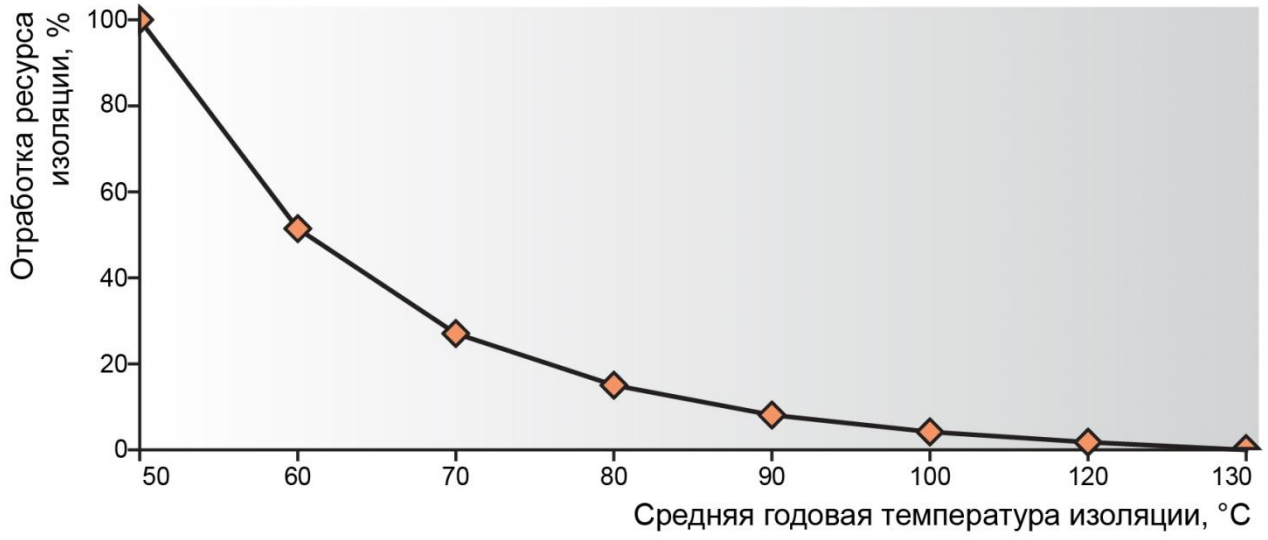


Рис. 4. Зависимость ресурса изоляции от среднегодовой температуры обмотки.

Поскольку в ходе проведения исследований установлено, что отказы изоляции чаще происходят на электродвигателях имеющих более высокую среднегодовую температуру обмотки, выражение (5) скорректировано с учетом статистического распределения среднегодовых температур обмоток статоров ПВСД на различных КС и распределения их средней наработки на отказ.

Экспериментальное обоснование перехода на ТОиР по фактическому состоянию

Для расчета функций принадлежности ПВСД ЭГПА используется метод парных сравнений Саати [2,16]. Суть его заключается в том, что для каждой пары элементов универсального множества эксперт оценивает преимущество одного элемента над другим, по отношению к свойству нечеткого множества.

На основе методики прогнозирования в системе MATLAB 7.11, создана модель прогнозирования отказов изоляции ПЭВД, позволяющая вычислять значение наработки до отказа.

В результате проведенных измерений ЧР на семи ЭГПА [16] было определено текущее состояние изоляции обмоток статоров приводных электродвигателей СТД-12500-2. На рис. 4 представлены диаграммы обработанных результатов экспериментальных замеров. Сравнительный анализ диаграмм показывает, что уровни ЧР обмотки статора СТД-12500-2 ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» КС-25 «Починковская» имеют относительно более высокие значения.

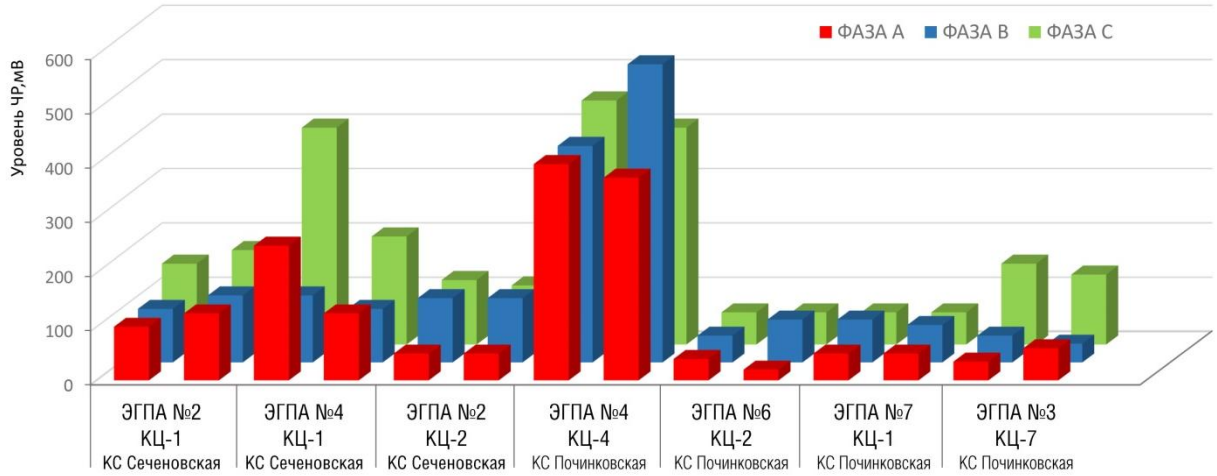


Рис. 4. Статистика измерений уровней ЧР на семи ПВСД ЭГПА.

Для выявления причин повышенной разрядности обмоток при помощи программы PD-View (IrisPower) проведен детальный анализ фазового распределения ЧР электродвигателя ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» КС-25 «Починковская». За счет своевременного мониторинга ТС ПВСД ЭГПА удалось избежать повреждения обмотки и снизить время простоя с 8760 час. до 720 час, а также значительно снизить затраты на его ремонт путем замены капитального ремонта текущим, что позволило снизить затраты на 2,5 млн. руб.

Выводы

Рассмотренная выше методика позволяет в режиме реального времени контролировать ТС ПЭВД по характеристикам ЧР, выявлять существенные изменения в трендах амплитуды и интенсивности ЧР. При увеличении показателей в два и более раза при идентичных параметрах работы ПВСД выполняется анализ фазового распределения импульсов ЧР и выявляется причина с прогнозом.

Внедрение разработанных мероприятий по мониторингу технического состояния ПЭВД позволяет сократить время простояЭГПА в среднем до 2160 час./год. При этом вероятность срыва плановогозадания, составит $P_{\text{нпз}}$ = 0,08, что приводит к снижению ожидаемогоущерба в 1,9 раза ($У_{\text{нпз}}$= 24 млн.руб./год).Внедрение разработанных методов мониторинга технического состояния позволяет в среднем в 4 раза сократить время нахождения ЭГПА времонте и на 30-50% затраты на капитальный ремонт ПВСД.

Библиографический список

1. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. A system of online diagnostics of the technical condition of power plants. RussianElectricalEngineering. – 2015. – Т. 86. № 4. – С. 208-212.
2. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 10. – С. 50-53.
3. Милов В.Р., Суслов Б.А., Крюков О.В. Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой отрасли //Автоматизация в промышленности. – 2009. – №12. – С. 16-20.
4. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. Т. 81. – № 12. – P. 649-655.

5. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
6. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокомпрессорных станций // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29-31.
7. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. 2010. № 5. – С. 2-11.
8. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // ЕлектромеханічніЕенергозберігаючісистеми. – 2012. – № 3 (19). – С. 209-212.
9. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2 томах // Ответственный за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – Том 2. – С. 404-409.
10. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.
11. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. – 2007. – 260с.
12. Крюков О.В. Регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21-25.
13. Крюков О.В.Частотное регулирование производительности электроприводных ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39-43.
14. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
15. KadinS.N., KazachenkoA.P., KryukovO.V., ReunovA.V. Questionsrelatedtothedevelopmentofmetrologicalassuranceinthedesignofgazpromfacilities // MeasurementTechniques. – 2011. – № 8. Т. 54. – С. 944-952.
16. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
17. KryukovO.V., SerebryakovA.V. Artificialneuralnetworksoftechnicalstatepredictionofgascompressorunitselectricmotors // ВестникЮжно-Уральскогогосударственногоуниверситета. Серия: Энергетика. – 2016. – № 1. Т. 16. – С. 66-74.
18. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014.– № 2. Т. 1. – С. 32-37.
19. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
20. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
21. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Труды XII МНПК. – Липецк: ИПУ РАН. – 2017. – С. 153-158.

E.V. Bychkov, KryukovO.V.

THEORETICAL AND HARDWARE OPPORTUNITIES OF TRANSITION TO SOFTWARE MAINTENANCE TO ACTUAL STATE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, JSC Giprogazcenter

The analysis of the principles of the organization of service and repair of drive electric motors of electric drive gas-distributing aggregates at compressor stations of trunk transport of gas is provided. The operational factors influencing reliabilities of insulation the stators of windings of high-voltage electric motors are considered. It is shown that implementation of the modern and authentic monitors of technical condition of aggregates and the forecast of their resource at compressor stations allows to cut considerably operational costs and to increase safety and fail-safety of operation in the normal modes and also to realize transition to maintenance and repair on actual state of gas-distributing aggregates.

*Keywords:*Compressor station, gas-distributing aggregate, drive electric motor, operational factors of reliability.

УДК 62-52-83:656.56

А.Б. Васенин, О.В. Крюков

ЭТАПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ НА УРАЛЬСКОМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ

АО «Гипрогазцентр»

Рассмотрена актуальность и техническая возможность создания поверочных установок нового типа, обеспечивающих точное измерение расхода природного газа в рабочих условиях. Представлены задачи, технологические процессы измерений и результаты реализации трех стадий проектов метрологического центра. Показано, что создание Уральского метрологического центра является одним из значимых шагов по реализации Стратегии обеспечения единства измерений в России.

*Ключевые слова:*средства измерений, поверочная схема, метрологический центр, расход природного газа, единство измерений.

Введение

В настоящее время в соответствии со статьей 9 ФЗ-№261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» Государственное регулирование осуществляется путем установления хозяйствующим субъектам РФ обязанности по учету используемых энергетических ресурсов и средств измерений (СИ)[1-3].

В соответствии со Стратегией обеспечения единства СИ в России ожидается[4-7]:

- повышение точности воспроизведения и передачи размеров СИ в среднем в 3 - 5 раз;
- расширение диапазонов измерений на порядок и более;
- увеличение производительности поверочных работ в 1,5-2 раза;
- повышение уровня МеО на приоритетных направлениях науки;
- обеспечение адекватности мировому уровню измерений.

Определённые на государственном уровне задачи в области энергосбережения и обеспечения единства измерений находят свою реализацию в газовой отрасли[8-11]. В 2010 году Правление ПАО «Газпром» утвердило «Комплексную целевую программу МеО ПТП добычи, транспортировки, переработки, подготовки, хранения и поставки газа и жидких углеводородов в ПАО «Газпром» на период 2011-2020 гг.». Одной из задач ее являлось повышение точности измерения расхода газа путём создания эффективных узлов измерения расхода газа, а также создания современных СИ их поверки и калибровки – метрологических газоизмерительных центров[12-15].

Техническая необходимость создания поверочных установок нового типа обусловлена отсутствием воздушных установок, обеспечивающих необходимые расходы среды для таких счётчиков. Необходимо учесть, что физические свойства природного газа при рабочем давлении магистрального газопровода (МГ) отличаются от свойств воздуха при атмосферном давлении.

Первая очередь УРМЦ – новый тип объектов ПАО «Газпром»

Для решения этой задачи ДО «Мострансгаз» и «Уралтрансгаз» в районе г. Челябинск построены, введены в эксплуатацию и успешно работают первые 2 очереди Уральского расходоизмерительного метрологического центра (УРМЦ). Таким образом, УРМЦ – первый действующий объект подобного рода в РФ и странах СНГ, реализовавший процедуру поверки счётчиков на высоком давлении газа. Это новое направление оказания сервисных услуг, предоставляемых ПАО «Газпром». Уникальное оснащение УРМЦ позволяет осуществить:

- сравнительные испытания СИ расхода и количества газа;
- поверку (калибровку) СИ расхода и количества газа, принцип измерения которых основан на разных методах;
- взаимное сличение эталонов расхода газа с ведущими метрологическими расходоизмерительными центрами мира;

- научные и экспериментальные исследования;
- хранение и передачу единицы СИ расхода природного газа.

УРМЦ создан на базе действующей ГИС «Долгодеревенская» Челябинского ЛПУ МГ ООО «ГП ТГ Екатеринбург» и позволяет проводить поверку (калибровку), испытания оборудования, НИР в течение всего года при давлениях от 5,6 до 7,5 МПа (рис. 1).

Первая очередь испытательной площадки УРМЦ, сданная в эксплуатацию в 2007 году, включает в себя 4 измерительных трубопровода (ИТ) DN150, DN200, DN300 и DN400, которые оснащены рабочими эталонами ElsterInstromet по одному на каждый ИТ. Эталоны представляют собой турбины семейства SM-R-I с номиналами G-400, G-1000, G-2500, G-6500, что позволяет перекрыть диапазон расхода газа от 32 $м^3$/час до 10000 $м^3$/час при рабочих условиях. На этих же ИТ последовательно с рабочими эталонами устанавливаются испытуемые СИ. Это – турбинные, ультразвуковые (УЗ), вихревые, ротационные, лазерные, термоанемометрические и другие типы счетчиков.

Технологическая схема первой очереди УРМЦ предусматривает подачу части газа с выхода КС на вход УРМЦ, далее через ИТ на вход КС. Перед проведением калибровки, в технологическую обвязку УРМЦ подается газ и по специальным алгоритмам проверяется герметичность системы. Во время проведения работ по калибровке, поверке или испытаний СИ природный газ при рабочем давлении от 5,6 до 7,5 МПа и температуре от +5 °С до +50 °С проходит последовательно через рабочий эталон и испытуемое СИ расхода газа. Показания приборов эталона фиксируются промышленным контроллером и обрабатываются с учетом других параметров природного газа по отечественным или международным методикам.

Показания поверяемого СИ фиксируются на АРМ оператора УРМЦ. Для турбинных расходомеров поверка производится посредством прямого сличения показаний первичных преобразователей расхода эталона и поверяемого СИ (импульсов турбинки). Испытания прочих СИ, не определяющих расход газа в рабочих условиях прямым способом, производится путем сравнения полного прошедшего за некий промежуток времени объема газа, приведенного к нормальным условиям, по показаниям эталонных счетчиков и испытуемого СИ. В случае испытаний комплексов расхода с вычислителями расхода газа, цифровой выход вычислителя подключается к АРМ расходомера на базе ПК с модулями расширения по вводу дискретных сигналов. В АРМ расходомера загружается ПО расходоизмерительного комплекса. Данный процесс поверки, калибровки СИ может проводиться только по 1 из ИТ.

Поток газа должен быть с малыми значениями пульсаций по расходу.Для возможности варьирования расхода при заданном давлении в технологической схеме УРМЦ введены два клапана-регулятора фирмы Mokveld. Первый DN400 стоит на входе испытательной площадки, второй DN500 – на выходе. Расход и давление газа на ИТ задается путем регулирования клапанов-регуляторов Mokveld.Так как испытательные секции УРМЦ при своей работе перепускают газ с выхода на вход КС «Долгодеревенская» и соответственно влияют на режимы работы КС, допустимые объемы (расход) рециркуляции газа по КС через УРМЦ согласовываются с ДС КС.УРМЦ аккредитован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии на право проведения поверки и калибровки, а также в качестве гос. центра испытаний СИ.

Вторая очередь УРМЦ – расширение возможностей центра

Создание второй очереди УРМЦ направлено на расширение возможностей центра - организацию испытаний, поверки (калибровки) расходомеров DN500, 700, 1000, обеспечение расходов газа до 47тыс. $м^3$/ч.Вторая очередь УРМЦ расположена после ГИС (рис. 1).

В состав технологической части второй очереди входят:

- измерительный цех, включающий в себя три ИТ DN500, DN700 и DN1000, на которые устанавливаются испытуемые СИ;
- три клапана-регулятора фирмы Mokveld переменной пропускной способности, установленных на байпасной линии для последовательной цепочки из блока эталонов и измерительного цеха поверяемых (испытуемых) расходомеров;

- блок эталонов, состоящий из семи счетчиков мастер-класса фирмы ElsterInstromet и контроллера для обработки информации;
- клапан-регулятор фирмы Mokveld переменной пропускной способности, установленный последовательно с запирающим краном после ИТ для задания малых расходов.

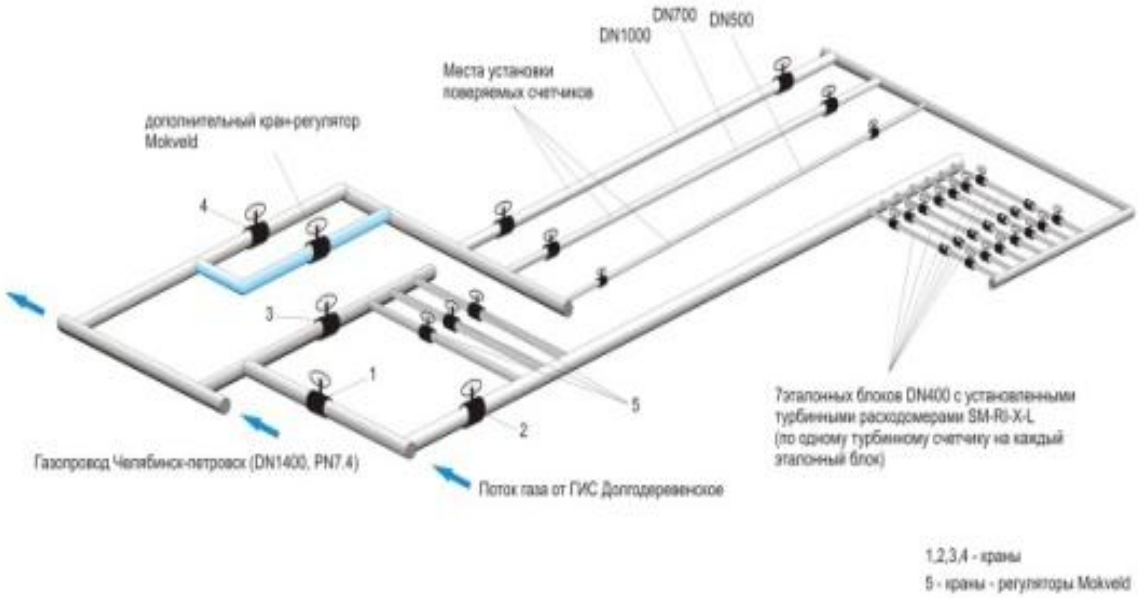


Рис. 1. Структурная схема технологической части второй очереди УРМЦ

Подача газа на 2-ю очередь осуществляется с выходного коллектора ГИС, далее через входной кран на блок эталонов. Непосредственно за входным краном параллельно установлены три клапана-регулятора Mokveld, через которые газ подается в МГ «Челябинск-Петровск» в обход блока эталонов и измерительного КЦ №2.

Расход газа через блок эталонов задается путем открытия необходимого числа ниток с эталонами и регулированием положения байпасных клапанов-регуляторов Mokveld. Таким образом, СИ, поверяемые во втором измерительном цехе, могут испытываться при давлении выхода КС (с учетом потерь давления на ГИС и входе УРМЦ) и различных расходах от нулевого (когда байпасные клапаны-регуляторы полностью открыты и расход регулируется клапаном, стоящим после измерительного цеха) до максимального, равного пропускной способности ИТ, по которому проводятся измерения (клапаны-регуляторы Mokveld прикрыты).

Особенностью 2-й очереди УРМЦ является ее расположение на действующем МГ, поэтому основным требованием к САУ является обеспечение стабильности работы МГ и КС «Долгодеревенская» в процессе испытаний расходомеров.

Для обеспечения централизованного контроля и управления технологическими объектами 1-й и 2-й очереди УРМЦ с единого пульта оператора, размещаемого в пультовой производственного корпуса разработана АСУ ТП УРМЦ на базе ПТС поставки фирмы "Метран". Составной частью АСУ ТП является система контроля и регистрации процессов поверки и калибровки СИ расхода газа «ElsterInstromet», поставляемая с эталонным оборудованием.

АСУТП предназначена для управления процессами поверки, калибровки и проведения испытаний в автоматическом или автоматизированном режимах управления. Метрологические процедуры поверки расходомерных устройств для 1-й и 2-й очереди УРМЦ одни.

АСУТП на базе ПТС "Метран" управляет процессом в целом, изменением расходами, стабилизацией давления и расходов в заданной точке. ПТС ElsterInstromet осуществляет набор данных, необходимых для построения калибровочных линий. Синхронизация процедур испытания между ПТС ЗАО ПГ "Метран" и ПТС ElsterInstromet осуществляется сигналами старт/стоп по каждому расходу и всей процедуре в целом.

Для передачи на диспетчерский пункт Челябинского ЛПУ текущих технологических расхо-

дов газа по первой и второй очереди, сигналов согласования режимов работы УРМЦ и КС предусматривается цифровой канал связи от АСУ ТП УРМЦ в диспетчерский пункт. Для возможности аварийного останова первой или второй очереди УРМЦ при отказе основных ПТС, в составе системы управления предусмотрен релейный блок экстренного аварийного останова (БЭАО), сохраняющий независимо свою работоспособность.

Предусматриваются следующие режимы работы УРМЦ:типовая процедура поверки расходомеров (в дневное время);специфические испытания расходомеров на погрешности СИ;испытания стабильности МХ расходомеров в течение длительного времени (недели, месяцы) и останов УРМЦ, исходя из обеспечения режима работы КС "Долгодеревенская".

Технологическое оборудование УРМЦ как первой, так и второй очереди (рис. 2) может работать кратковременно (в 1-2 смены), либо длительно, либо быть остановлено.

В производственном корпусе размещён ряд лабораторий: электро-радиотехнических измерений, кладовая химреактивов, хроматографическая, помещение физико-химических измерений, тепло- и линейно-угловых измерений. Назначение лабораторий – обслуживание рабочих эталонов и датчиков, а также выполнение калибровки соответствующих видов рабочих средств измерений. В настоящее время 1-я и 2-я очереди являются законченным функционирующим объектом и утверждено проектирование 3-ей очереди УРМЦ.

Рис. 2. Блок рабочих эталонов 2-й очереди УРМЦ

Третья очередь УРМЦ – организация поверки и испытаний на низком давлении газа, создание эталонов высокой точности

АО «Гипрогазцентр» выполнил оценку стоимости и эксплуатационных затратЗ-го пускового комплекса УРМЦ, расчёт затрат на итоговое сравнение вариантов:работа по кольцевой схеме 5 ГПА в реконструируемом цехе «А» КС «Долгодеревенская»;работа по кольцевой схеме с новыми ЭГПА в реконструируемом цехе «А» КС Долгодеревенская;работа по проточной схеме с использованием сброса газа на выход ГРС г. Челябинск.

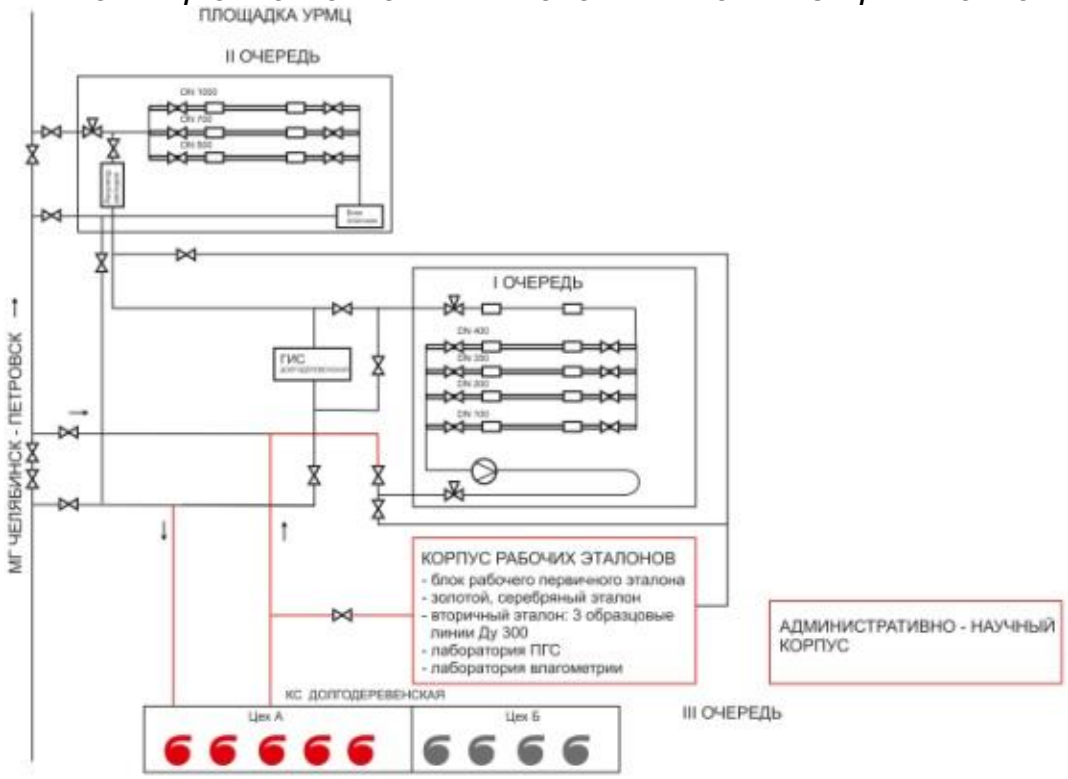


Рис. 3. Структурная схема первой, второй и третьей очереди УРМЦ

В результате рассмотрения был выбран первый вариант с использованием существующих ГПА и организацией работы по кольцевой схеме[16-21], т.к. он характеризующийся наименьшими дисконтированными затратами на создание и дальнейшую эксплуатацию.

В состав третьей очереди предложено включить (рис. 3):

1.Корпус рабочих эталонов в составе: блока рабочего первичного эталона кубического метра газа;блока золотого и серебряного эталонов; блока вторичных эталонов Dy 300 с прямыми участками;лаборатории по изготовлению поверочных газовых смесей и влагометрии.

2.Административно-научный корпус в составе: аудитории, комнаты для совещаний, учебного кабинета, бытовых комнат и технических помещений.

3.Реконструируемый цех «А» КС Долгодеоревенская в составе: существующих ГПА с заменой проточных частей, АСУ и АВО газа.

Итогом технико-экономического сравнения стала разработка технического задания на проектирование выбранного варианта третьей очереди УРМЦ.

Заключение

Создание УРМЦ является одним из значимых шагов по реализации Стратегии обеспечения единства измерений в России.После строительства 3-й очереди УРМЦ будет представлять многофункциональный центр по выполнению широкого спектра услуг в области измерений количества и параметров качества газа.Создание такого центра приобретает особую актуальность в свете создания ЕврАзЭС и вступления России в ВТО. Можно ожидать, что Россия в процессе гармонизации своих национальных стандартов в области измерения расхода газа с европейскими стандартами перейдёт на выполнение калибровки расходомеров на рабочем давлении газа, как это делается в странах Европы. Эталоны расхода газа УРМЦ, позволят получать размер единицы кубометра природного газа от государственного эталона расхода, эталонов ОМРИЦ, участвовать в сличениях эталонов ведущих европейских стран.

Библиографический список

1. 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.
2. Запевалов Д.Н., Маянц Ю.А., Алфимов А.В. Актуальные вопросы совершенствования нормативной документации для объектов нефтегазового комплекса // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»». – 2016. – № 2. – С. 90-93.
3. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // В сборнике: Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO`12. – ИПУ. – 2012. – С. 222-236.
4. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б.Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // В сборнике: Материалы конференции «Управление в технических и сетевых системах». Под ред. С.Н. Васильева. 2012. – С. 467-469.
5. Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами КС при случайных воздействиях // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64-70.
6. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа //В сборнике: Труды VIII Международной конференции АЭП-2014 в 2 томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 404-409.
7. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
8. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
9. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
10. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 10. – С. 50-53.
11. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SmartGrid для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №4. – С. 36-38.
12. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XI Международного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.
13. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
14. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию состояния ЭГПА // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
15. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24-31.
16. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными ГПА // В сборнике: Труды МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации» АИТА- 2011. – С. 329-350.
17. BabichevS.A., KryukovO.V., TitovV.G. Automatedsafetysystemforelectricdrivinggaspumpingunits // RussianElectricalEngineering. – 2010. Т. 81. – № 12. – P. 649-655.
18. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов МГ // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. – 2014. – С.409-414.
19. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Труды XII МНПК. – Липецк: ИПУ РАН. – 2017. – С. 153-158.

20. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2-11.
21. KryukovO.V., SerebryakovA.V. Artificialneuralnetworksoftechnicalstatepredictionofgascompressorunitselectricmotors // ВестникЮУрГУ. Энергетика. – 2016. № 1. Т. 16. – С. 66-74.

A.B. Vasenin, O.V. Kryukov

STAGES OF THE ORGANIZATION OF CHECKING OF MEASURING INSTRUMENTS CONSUMPTION OF NATURAL GAS IN OPERATING CONDITIONS ON THE URAL METROLOGICAL CENTER

JSC Giprogazcenter

The relevance and technical capability of creation of the testing installations of new type providing exact measurement of a consumption of natural gas in operating conditions is considered. Tasks, technological processes of measurements and results of realization of three stages of projects of the metrological center are presented. It is shown that creation of the Ural metrological center is one of significant steps on a realization of Strategy of ensuring unity of measurements in Russia.

Keywords: measuring instruments, testing scheme, metrological center, consumption of natural gas, unity of measurements.

УДК 62-52-83:656.56

А.Б. Васенин, О.В. Крюков

НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ОТРАСЛЕВОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА ПАО «ГАЗПРОМ»

АО «Гипрогазцентр»

Показано, что повышение точности измерения расхода газа приводит к снижению его потерь. Технической основой повышения точности должен стать центр, решающий проблемы измерения этих величин. Создание испытательной и эталонной базы ПАО «Газпром» в области измерения расхода газа, создание новых высокотехнологичных центров, развития кооперации стран и последующее проведение взаимных сличений их эталонов с эталонами европейских стран позволит снизить негативные последствия разности требований стандартов стран импортёров и экспортёров газа и потери в газопроводах.

Ключевые слова: расход природного газа, точность измерений, проточная и кольцевая схемы, расходоизмерительный центр, эталон, магистральный газопровод.

Введение

В своей производственной деятельности ПАО «Газпром» решает вопросы организации технологических процессов добычи, транспортировки, распределения, переработки и хранения газа и газового конденсата, жидких углеводородов[1-3]. С этой целью на объектах ПАО «Газпром» эксплуатируются сотни тысяч систем и СИ, многие из которых обеспечивают измерение количества и параметров качества углеводородов. Чем достовернее и точнее выполняются измерения, тем меньше риски поставщика при выполнении поставок[4-7].

Проведённые исследования показали, что повышение точности измерения расхода газа приводит к снижению его потерь [8-10]. При поставках газа с учётом его калорийности повышение точности измерений калорийности даёт возможность уменьшить количество поставляемого газа [11-13]. Эти положения составляют экономическую основу целесообразности повышения точности измерения количества и параметров качества газа. Технической основой повышения точности должен стать центр, который бы глубоко, на международном уровне занимался проблемами измерения этих величин[14-16].

ПАО «Газпром» на протяжении ряда лет занимается созданием научной и испытательной базы в этой области. Одним из научно-производственных центров должен стать Отраслевой метрологический расходоизмерительный центр (ОМРИЦ) в г. Щёлково Московской области. Он создается как международный объект с функциями[17-20]:

- метрологического поверочного центра средств и СИ расхода газа, в том числе поверки расходомерных устройств и комплексов, датчиков давления, перепада давления, температуры, плотности, состава газа, влажности газа, массы и геометрических размеров;
- создания базы данных в области измерений;
- сертификации и установления стандартов измерения газа;
- исследовательской станции для анализа влияния условий перекачки, геометрических размеров труб и различных сопротивлений на структуру потока и погрешность измерений расхода;
- для обучения и повышения квалификации специалистов.

Структура ОМРИЦ

Для реализации этих задач в тесной кооперации с инофирмами-поставщиками оборудования (ElsterInstromet) был разработан перечень и состав рабочих эталонов, эталонов переносчиков и эталонов различных физических величин. С учётом выбранного места размещения ОМРИЦ была разработана технологическая схема и схема подачи и сброса газа для основного технологического процесса, определены размеры и состав основных сооружений и многое другое.

С2010 г.АО «Гипрогазцентр» разрабатывал проектную документацию[10,21-22]. Основными технологическими элементами ОМРИЦ являются (рис. 1): корпус вторичных эталонов, газоизмерительная станция (ГИС), узел редуцирования (УР), поршневой компрессор (ПК), газоперекачивающий агрегат (ГПА), аппарат воздушного охлаждения газа (АВО) и трубопроводная обвязка.

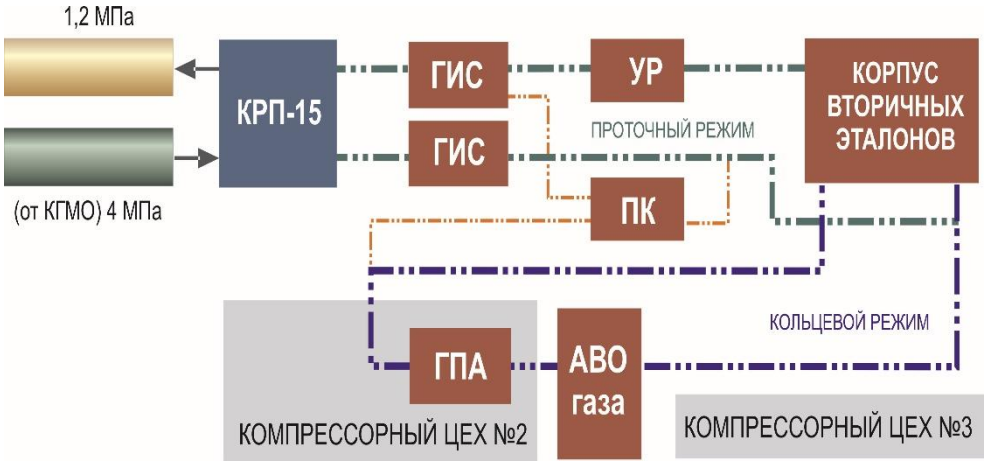


Рис. 1. Структура и основные агрегаты ОМРИЦ:
КРП - контрольный редуцирующий пункт, УР – узел редуцирования, ГПА – газоперекачивающий агрегат, ГИС – газоизмерительная станция, АВО – аппарат воздушного охлаждения газа, ПК – поршневой компрессор, КГМО – кольцевой газопровод Московской области.

Корпус вторичных эталонов является основным элементом технологической схемы, в котором сосредоточено высокоточное оборудование: первичный эталон, система вторичного эталона, образцовые и тестовые секции, испытательное оборудование, прецизионный теплообменник, регуляторы давления и расхода газа. Структурная схема эталонов расхода газа показана на рис. 2.

Для достижения малой неопределённости измерения расхода газа первичным и вторичным эталонами, сравнимой с лучшими европейскими эталонами, потребовалось применение высокоточных приборов и инновационных технических решений.

Основными технологическими процессами при работе ОМРИЦ являются поверка, проведения испытаний расходомеров и НИР. Для обеспечения этих процессов запроектированы два режима работы: проточный и кольцевой. При работе в проточном режиме газ из КГМО через КРП поступает на ГИС, где измеряется его количество.

После ГИС газ поступает в корпус вторичных эталонов, в котором выполняются основные ТП поверки расходомеров или их испытания. Прошедший через тестовые секции газ поступает в УР, где его давление понижается до допустимого давления КРП, и сбрасывается в КГМО низкого давления (1,2 МПа).

При работе в кольцевом режиме проточная схема отключается, и образуется кольцевой газопровод, основными элементами которого являются: оборудование корпуса вторичных эталонов, ГПА и АВО газа. Газ в кольцо закачивается с помощью ПК до необходимого рабочего давления. Движение газа с необходимой скоростью осуществляется с помощью ГПА.

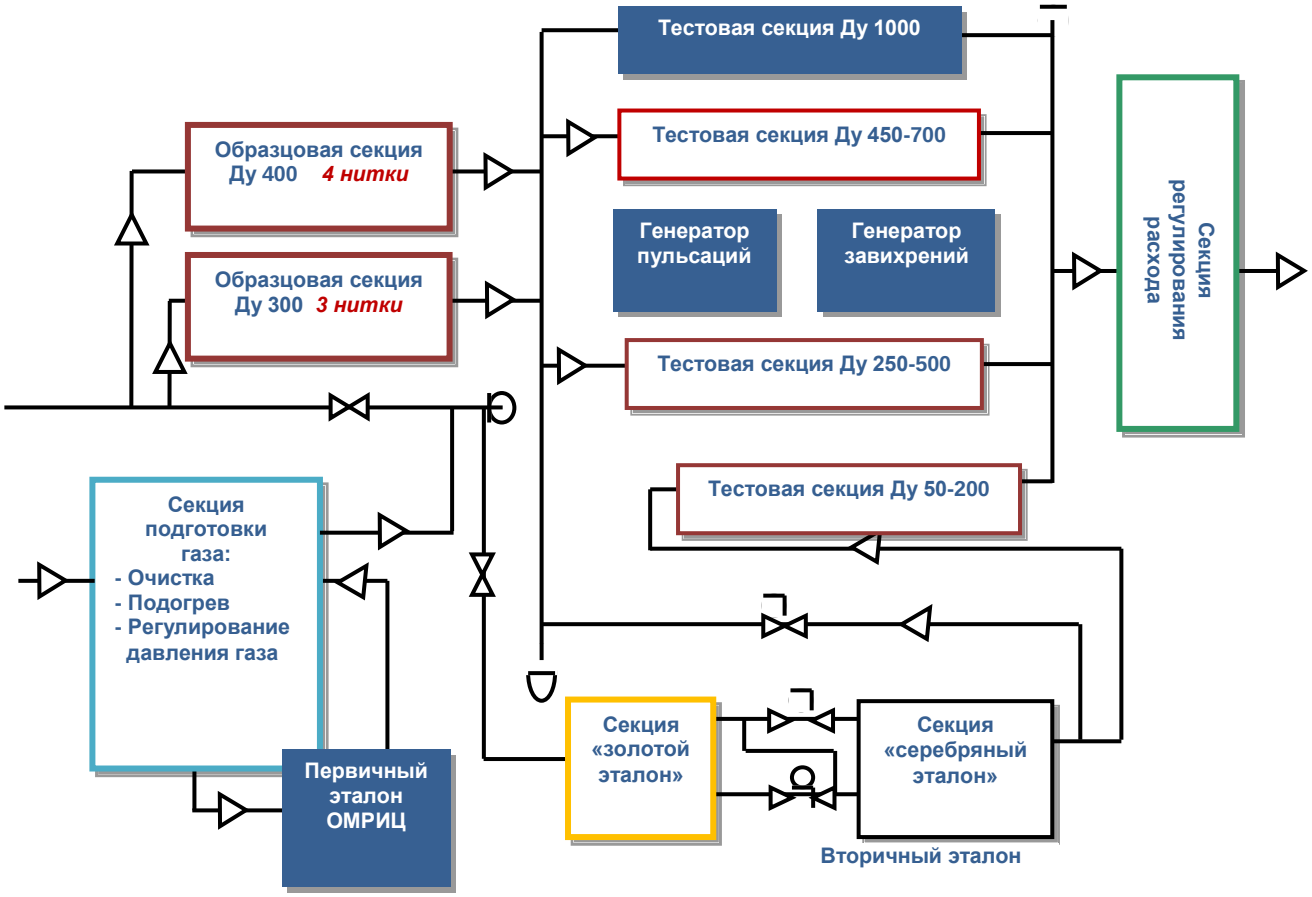


Рис 2.Структурная схема эталонов расхода газа

Необходимо отметить, что данная схема, сочетающая проточный и кольцевой способы движения газа не типична для подобного рода испытательных центров.

Так, известен стенд "*Pigsar*" в Дорстене (Германия) [2,16], который имеет проточную схему и один из самых больших диапазонов расходов и давлений в Европе. Известна также новая испытательная установка высокого давления "Euroloop" (Голландия) [17], построенная по кольцевой схеме. Установка включает газовый компрессор переменной производительности, АВО, набор эталонных турбинных счетчиков, два измерительных участка для установки калибруемых счетчиков, систему трубопроводов и запорную арматуру, участок для подключения эталонов высшей точности. Технологическая схема установки позволяет изменять параметры потока в широких пределах, но она существенно сложнее установки, построенной по проточной схеме.

Учитывая условия газоснабжения в месте размещения ОМРИЦ, предложенная проточно-кольцевая схема позволила достичь широкого диапазона изменения давлений и расходов, а также высокой эффективности использования оборудования для испытаний и поверки счётчиков газа различных типов. В табл. 1 показаны основные параметры потоков газа в кольцевом и проточном режимах.

Таблица 1.

Параметры ГИС ОМРИЦ

P (МПа)	**Режим работы ОМРИЦ**	
	Проточный (млн. $м^3$/ч)	Кольцевой (млн. $м^3$/ч)
1,2	1,3	0,1
4,0	2,0	1,0
7,4	-	1,0

Для обеспечения заданных потоков газа в контуре и его температурной стабильности был выполнен ряд расчётов. Расчеты по определению потребляемой мощности ГПА для обеспечения циркуляции заданного потока газа по контуру проводились в 2 этапа.

На первом этапе выполнено построение 3D-модели трубопроводной системы ОМРИЦ. На ее основе проведен гидравлический расчет по программе *BentleyPlantFLOW* с целью определения потерь давления в системе при максимальных значениях давления нагнетания (P = 7,4 МПа) и потока газа в контуре (q = 24 млн м^3/сут).

На втором этапе по программному комплексу *HYSYS* выполнен расчет потребляемой мощности ГПА, необходимой для обеспечения циркуляции заданного потока газа по контуру. По результатам расчетов определено, что для всех возможных режимов работы достаточно установки газоперекачивающего агрегата мощностью 4 МВт со степенью сжатия в пределах 1,1.

Количество и тип устанавливаемых АВО газа определены на основании данных, полученных в результате теплогидравлического расчета процесса компримирования газа и требований по обеспечению температурного режима перед измерительными и эталонными нитками. Особенностью температурного режима замкнутого контура является поддержание постоянной температуры на выходе АВО при условии малой протяженности трубопроводной системы и практически полного отсутствия снижения температуры газа за счет его расширения и теплообмена с внешней средой.

Для обеспечения работы первичного и вторичных эталонов, снижения неопределенности измерения параметров ОМРИЦ, влияющих на измерения расхода газа, в составе центра используется ряд эталонов (часть из них является нестандартными изделиями), сопоставимых по уровню неопределенности с Гос. эталонами РФ. Параметры эталонов ранее представлены в [10].

Крупные газовые компании США, Германии, Франции, Великобритании и сравнительно небольшие компании Голландии и Азии имеют в своем составе ОМРИЦ, которые обеспечивают единство измерения расхода и стимулируют прогресс развития перспективных рабочих СИ для коммерческого учета расхода газа.

Выводы

Создание испытательной и эталонной базы ПАО «Газпром» в области измерения расхода газа, создание новых высокотехнологичных ОМРИЦ, развития кооперации стран и последующее проведение взаимных сличений их эталонов с эталонами европейских стран позволит снизить негативные последствия разности требований стандартов стран импортёров и экспортёров газа и потери в МГ.

Учитывая уникальную возможность работы по «проточной» и «кольцевой» схемам, высокие технические характеристики эталонов, возможности проведения НИР и накопления опыта в процессе поверки и испытаний расходомеров можно надеяться, что создаваемый ОМРИЦ ПАО «Газпром» займёт достойное место в ряду ведущих исследовательских центров Европы, станет центром исследований в области измерения количества и параметров качества природного газа в газовой отрасли России, позволит существенно повысить уровень знаний в этих областях.

Библиографический список

1. Петров Н.Г., Запевалов Д.Н., Глазов Н.Н. Состояние и перспективы развития в нормативном фонде ПАО «Газпром» комплекса стандартов «Защита от коррозии» // Коррозия Территории Нефтегаз. – 2010.– № 3.– С. 8-12.
2. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов МГ // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. – 2014. – С.409-414.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления автономными энергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 45-49.

4. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. 2007. – 260с.
5. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering.– 2010. – Т. 81. № 12. – P. 649-655.
6. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию состояния ЭГПА // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
7. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24-31.
8. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа //В сборнике: Труды VIII Международной конференции АЭП-2014 в 2 томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 404-409.
9. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2-11.
10. 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.
11. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
12. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. 2014. № 712. С. 84-87.
13. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SmartGrid для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №4. – С. 36-38.
14. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. С. 458-463.
15. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г.Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. – №2. – С. 5-10.
16. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б.Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // В сборнике: Материалы конференции «Управление в технических и сетевых системах». Под ред. С.Н. Васильева. 2012. – С. 467-469.
17. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными ГПА // В сборнике: Труды МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации» АИТА- 2011. – С. 329-350.
18. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
19. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // ВестникЮУрГУ. Энергетика. – 2016. № 1. Т. 16. – С. 66-74.
20. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
21. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Труды XII МНПК. – Липецк: ИПУ РАН. – 2017. – С. 153-158.
22. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных ЭГПА // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 в 2-х томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С.157-163.

A.B. Vasenin, O.V. Kryukov

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATION OF BRANCH METROLOGICAL RASKHODOIZMERITELNY CENTRE OF PJSC GAZPROM

JSC “Giprogazcenter”

It is shown that increase in measuring accuracy of the expenditure of gas leads to lowering of its losses. The center solving problems of measurement of these values shall become a technical basis of increase in accuracy. Creation of testing and reference facilities of PJSC Gazprom in the field of measurement of the expenditure of gas, creation of new hi-tech centers, development of cooperation of the countries and the subsequent carrying out mutual checkings of their standards with standards of the European countries will allow to lower negative consequences of a difference of requirements of standards of the countries of importers and exporters of gas and loss in gas conduits.

Keywords: expenditure of natural gas, accuracy of measurements, flowing and ring diagrams, flow-measuring center, standard, main gas pipeline.

УДК 621.398 + 621.391

И.Р. Бухвалов, С.В. Евсеев

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается вопрос оценки возможности применения стандартных протоколов обмена данными для систем линейной телемеханики в соответствии с техническими требованиями ПАО «Газпром». Показаны способы оптимизации обмена данными и дифференцирования информации на примере протокола обмена данными в телемеханике УНК ТМ.

Ключевые слова: телемеханика, протокол обмена, транспорт газа, обработка информации.

Одной из важнейших проблем в современных условиях является экономически эффективная и безопасная транспортировка газа для обеспечения бесперебойных поставок потребителям. Решение этой проблемы проводится путем автоматизации газотранспортных предприятий. Одним из основных элементов автоматизации является система линейной телемеханики. Применение систем телемеханики на линейной части многониточных магистральных газопроводов (МГ) решает целый ряд важных задач:

- повышение надежности газоснабжения потребителей, путем постоянного контроля технологического процесса транспорта газа;
- оптимизация и снижение затрат на транспортировку путем оперативности дистанционного управления потоками газа по МГ;
- оперативное обнаружение нештатных ситуаций типа утечки газа или разрыва МГ;
- эффективная локализация нештатных ситуаций, позволяющая существенно снизить экономические и экологические последствия.

Для применения на объектах ПАО «Газпром» к системам телемеханики предъявляются жесткие требования в части надежности аппаратно-программной платформы, условиям эксплуатации, информационной емкости и быстродействию.

В данной работе решается проблема быстродействия системы телемеханики с использованием низкоскоростных систем связи, от которой в большей степени зависит способность обнаружения и локализации аварийных ситуаций.

Рассмотрим поподробнее требования ПАО «Газпром» к системам телемеханики в данном аспекте. Так, информационная емкость системы должна обеспечивать не менее 8-ми независимых направлений связи, при не менее 256-ти КП в системе, в том числе до 63 КП на каждом направлении связи. При этом должны обеспечиваться такие характеристики, как время доставки единичного аварийного телесигнала (ТСА) при максимальном количестве КП ТМ на направлении связи - не более 3 секунд и сбор полного объема технологической информации при цикле опроса с линейной части не более 2 минут.

Таким образом, для передачи сигнала ТСА при 63 КП на направлении связи и времени доставки ТСА не более 3 секунд на опрос одного КП по протоколу обмена типа «master-slave» приходится 47 мс.

Рассмотрим системы связи для систем телемеханики, использующиеся в северных регионах. Большинство систем выполнено с использованием радиоканала УКВ-диапазона (р/м «Integra-TR», р/м «Gardian», р/с «Будафон») или каналов радиорелейной линии связи с

использованием модемов со скоростью передачи данных телемеханики 1200-9600 Бод по протоколам обмена типа «master-slave».

Диаграмма работы данных протоколов приведена на рис. 1.

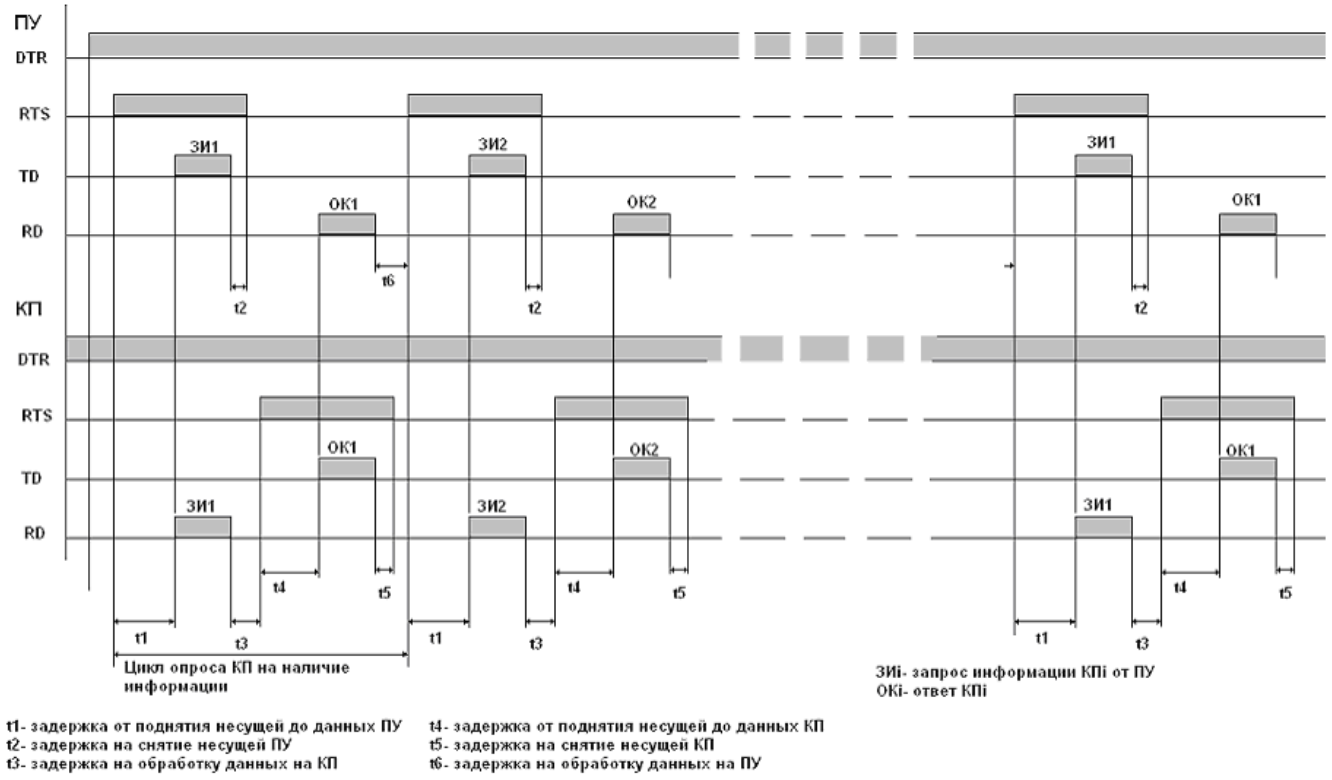


Рис. 1

Как видно из диаграммы работы для передачи пакетов информации требуется время для поднятия несущей частоты передатчика, как со стороны ПУ(t1), так и со стороны КП(t4), составляюще от 10 до 50 мс. Остальные временные задержки, как правило, достаточно незначительные и ими можно пренебречь, поэтому время обмена данными с одним КП составит

$$Tki = t1 + t4 + Tзи + Tок,$$

где: - $tб$ – время передачи одного байта; - $Tзи = Kзи \cdot tб$, Кзи - количество байт в запросе информации КП; - $Tок = Kок \cdot tб$, Кок - количество байт в ответе КП.

Таким образом, максимальное количество байт в информационном обмене с одним КП при минимальных значениях t1 и t4 составит:

$$Kб = 47 - (t1 + t4)/tб,$$

что при применении скорости обмена 9600 бод эквивалентно 27 байтам информации, а время на доставку сигнала ТСА при числе КП = N составит

$$Tтса = \sum_{i=1}^{N} Tki$$

Часть систем телемеханики используют для обмена информацией протокол Modbus RTU, в котором стандартная команда запроса информации КП составляет 8 байт, а оболочка ответа 5 байт, что делает возможным передачу не менее чем 13 байт сопроводительной информации, плюс,

требуемые по протоколу Modbus, задержки 7 байт, плюс актуальные данные, составляющие для КП с минимальным количеством параметров 16 байт. Таким образом, Ттса = (10+10+8+5+7+16) · 63 = 3628 мс, что превышает требуемое значение. Поэтому для обеспечения требований по передаче ТСА по протоколу Modbus RTU требуется, либо замена системы связи на более быстродействующую, что требует больших капиталовложений, либо уменьшение количества передаваемых данных, что невозможно, либо замена протокола обмена, на более быстродействующий. Именно по данному пути и проводилось развитие системы телемеханики УНК ТМ, разработки ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (в настоящее время - филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»).

Рассмотрим работу магистрального газопровода. Более 90% времени МГ работает в стационарном режиме, т.е. параметры давления, температуры газа и др. не меняются, или меняются на незначительные значения. Тоже касается и параметров телесигнализации. Возникает законный вопрос: – Зачем передавать параметры, которые не изменяются, не правильнее ли передавать параметры только изменившиеся? Второй вопрос: - Зачем нужен длинный запрос на КП, если передавать только изменившиеся параметры?

Фактически при решении проблемы первого вопроса для запроса информации КП потребуется только 2 байта информации:

Номер байта	0								1
Содержание	Запрос –информации (3 бита) + код Хемминга (5 бит)								Адрес абонента 1-256
	П1	П2	П3	Х4	Х3	Х2	Х1	Х0	

а для передачи команды формируется сообщение:

Номер байта	0	1	2 -:- N-1	N	N+1,N+2
Содержание	Признак команды	Длина информации	Поле команды	Адрес абонента	CRC-16

Ответ КП тоже можно представить в виде 2-х видов сообщений:
короткого

Номер байта	0								1
Содержание	Ответ – нет информации (3 бита) + код Хемминга (5 бит)								Адрес абонента 1-256
	О1	О2	О3	Х4	Х3	Х2	Х1	Х0	

или длинного:

Номер байта	0	1	2 -:- N-1	N	N+1,N+2
Содержание	Тип информации	Длина информации	Поле информации	Адрес абонента	CRC-16

В первом байте команды и длинной информации первые 3 бита аналогичны короткому запросу, а биты занятые кодом Хемминга занимаются номером команды или типом ответной информации.

Остается определить значения полей команды и информации.

Поле команды определятся произвольно, и обычно состоит из номера объекта, типа команды и значений параметров. Сложнее ситуация состоит для передачи ответной информации.

Поскольку отличительной особенностью протокола является то, что при передаче КП – ПУ передаются только изменившиеся параметры или телеграмма об отсутствии изменений на КП, то применяются особенности обработки информации от аналоговых датчиков. Для каждого из датчиков в базе данных КП вводятся два поля – допуск изменения и количество усреднений. Если подключить осциллограф к измерительным каналам датчика давления, температуры и других, на экране можно наблюдать достаточно широкую сплошную полосу. Истинное значение измерений находится в середине этой полосы. Если проводить только единичное измерение параметра, то код, получаемый посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигналов, будет изменяться от минимального до максимального значения. Поэтому в системе УНК ТМ ведется постоянный съем значений по всем датчикам. В одну секунду производится от 6 до 1000 измерений каждого датчика, в зависимости от типа аппаратуры КП. После проведения заданного количества измерений по датчику, производится усреднение показаний. Для определения необходимости передачи измеренного значения на ПУ производится сравнение измеренного в предыдущем цикле значения (опорного) с полученным значением на превышение пределов допуска по изменению. Если разница не превысила допустимые пределы, измерение на ПУ не передается, если превысила допустимое значение, измерение передается на ПУ, при этом опорное значение заменяется на новое.

В качестве примера можно рассмотреть вычисление допуска L для датчика давления, установленного на МГ, со следующими данными: диапазон D измерений датчика – от 0 до 10 MPa; тип датчика – токовый с пределами измерения P – от 4 до 20 мА; разрядность R преобразователя АЦП – 12 разрядов; диапазон измерений сигнала S – от 0 до 20 мА; фиксация на ПУ с точностью T – 0.02 MPa. Допуск изменения L вычисляется по формуле:

$$L = \{ [(T \cdot (P_{max} - P_{min}) \cdot 2^R] / [(D_{max} - D_{min}) \cdot (S_{max} - S_{min})] \} + 1.$$

Таким образом, для данного типа датчика допуск будет равен 7 дискретам АЦП.

При этом датчики, не влияющие непосредственно на процесс транспорта газа, должны иметь максимально возможный допуск изменения.

В случае срабатывания одного датчика в поле информации передается его номер и значение, а в случае группового срабатывания, или запроса полной информации, передается набор датчиков.

При обработке информации от дискретных датчиков для всех сигналов следует ввести характеристику вероятности срабатывания. Опрос всех дискретных сигналов ведется с частотой, аналогичной частоте сбора данных об аналоговых параметрах. Поскольку в реальных ситуациях возможны единичные выбросы, изменения состояний дискретных сигналов с 0 на 1 и наоборот, в системе УНК ТМ постоянно вычисляется вероятность нахождения параметра в определенном состоянии. В случае превышения заданной вероятности информация об изменении состояния передается на ПУ с наивысшим приоритетом.

В случае срабатывания одного параметра в поле информации передается его номер и значение, а в случае группового срабатывания, или запроса полной информации, передается набор параметров.

Измененный таким способом протокол обмена данными позволяет передать информацию и команды с минимальными задержками, удовлетворяет всем требованиям ПАО «Газпром» к системам телемеханики и подтвердил свою работоспособность на объектах ПАО «Газпром».

Выводы

Применение протокола Modbus RTU для передачи данных в существующих каналах связи систем телемеханики газотранспортных предприятий не соответствует действующим техническим требованиям ПАО «Газпром» в части времени передачи единичного аварийного телесигнала.

Разработка специализированных протоколов обмена для систем телемеханики с использованием предварительной обработки информации на уровне КП позволяет создавать сложные структуры передачи данных, удовлетворяющих требованиям ПАО «Газпром».

Библиографический список

1. Многоуровневые информационно-управляющие системы реального времени для топливно-энергетического комплекса России: Монография / Под ред. В.Е. Костюкова. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2007. – 243 с.
2. Бухвалов И.Р. Аппаратно-программный комплекс диспетчерского пункта магистрального газопровода. – Сборник научн. трудов «Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона», выпуск 5. – Березники, 2006, С. 231 – 243.
3. Патент № 29594 на полезную модель «Комплекс телемеханики» от 20.05.03.

S.V. Evseev, I.R. Bukhvalov

OPTIMIZATION OF DATA TRANSFER IN TELEMECHANICS SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The issue of assessing the possibility of using standard data exchange protocols for linear telemechanics systems in accordance with the technical requirements of PJSC Gazprom is considered. The ways of optimization of data exchange and differentiation of information on the example of the Protocol of data exchange in telemechanics of UNK TM are shown.

Key words: telemechanics (remote control), Protocol exchange, gas transport, information processing.

УДК 62-52-83:656.56

П.А. Захаров, О.В. Крюков

РАЗВИТИЕ ЭТАЛОННОЙ И ИСПЫТАТЕЛЬНЙ БАЗЫ ПАО «ГАЗПРОМ» ДЛЯ ПОВЕРКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ РАСХОДОМЕРОВ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена стратегия развития эталонной базы газовой отрасли. Показано, что использование новых метрологических центров по поверке, калибровке и испытанию новой измерительной техники позволит увеличить точность и снизить потери на транспортировку природного газа.

Ключевые слова:испытательная база, магистральный газопровод, эталон, кольцевая и проточная схема, расходомер, точность измерений.

Введение

Важнейшими задачами, стоящими перед любой отраслью промышленности является повышение качества выпускаемой продукции, ресурсосбережение, охрана окружающей среды[1-3]. Успешное их решение напрямую зависит от качества измерительной информации, поступающей от измерительных систем и средств измерений (СИ). При этом качество этой информации определяется достигнутым уровнем достоверности и точности измерений.

В своей производственной деятельности ПАО «Газпром» решает широкий круг вопросов в области организации технологических процессов добычи, транспортировки, распределения, переработки и хранения газа и газового конденсата. С этой целью на объектах ПАО «Газпром» эксплуатируются сотни тысяч систем и СИ, являющихся частью общей системы метрологического обеспечения (МеО) отрасли. Часть СИ и систем обеспечивает измерение количества и параметров природного газа и жидких углеводородов[4-7].

С целью поддержания высокого уровня измерений, а также соблюдения требований ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности…» в ПАО «Газпром» создана система МеО, создаётся научная база в области измерений параметров природного газа и жидких углеводородов.

Предпосылки создания эталонной и испытательной базы.

Техническая. Создание инструмента для выполнения поверки, калибровки, испытаний широкой номенклатуры СИ расхода природного газа, эксплуатируемого в ПАО «Газпром» и предлагаемого к применению различными производителями [8-11].

Отсутствие у крупнейшего в мире экспортера газа ПАО «Газпром» метрологических центров (МРИЦ) на рабочих средах делает невозможным дальнейшее кардинальное повышение точности измерений расхода газа при коммерческом учете, решение проблемы существенной экономии энергетических ресурсов как для внутреннего потребления, так и при экспорте и создает опасные предпосылки попадания отрасли в зависимость [12-16].

По мере освоения газоконденсатных и нефтегазовых месторождений растут объемы добычи, транспортировки и переработки углеводородов. В ближайшем десятилетии объемы добычи углеводородов в ПАО «Газпром» возрастут от 11 до 25 миллионов тонн в год.

Однако, при кажущемся многообразии МеО СИ жидкости на базе эталонных установок для калибровки и поверки расходомеров, эти решения используют локальные поверочные схемы с применением приборов и вспомогательных средств от других схем. Использование в отрасли новейших зарубежных СИ расхода, состава и свойств газа и жидкости может привести к невозможности поверки этих СИ на отечественном эталонном оборудовании, апробации перспективных разработок, проведения теоретических и экспериментальных исследований по изучению погрешностей и влияющих на результаты измерений факторов, вплоть до нарушения единства измерений и связей с эталонной базой России, что чревато значительными экономическими потерями.

Научная. Получение результатов исследований влияния параметров потока газа на неопределённость измерений позволит оптимизировать технологические схемы построения узлов измерений расхода газа и жидких углеводородов, применить гасители пульсаций для снижения негативного влияния пульсаций (эпюры потока), создаваемых ГПА на расходомеры. В европейских странах подобные НИР проводятся систематически[17-21].

Экономическая. Снижение затрат на поверку и калибровку СИ за счёт работ силами организаций ПАО «Газпром» вместо оплаты услуг сторонних организаций. Вовлечение в коммерческий оборот дополнительных объёмов газа и жидких углеводородов за счёт сужения зоны неопределённости измерения расхода газа. Годовые затраты на выполнение работ по поверке, калибровке и ремонту средств измерений ПАО «Газпром» (рис. 1, 2) составляли более 500 млн. руб. При этом затраты на поверку СИ составляют около 52% от общей суммы затрат, хотя количество СИ, подвергающихся поверке, не превышает 24%. В целях уменьшения оттока финансовых средств метрологическими службами ведется работа по аккредитации на право поверки и по расширению области аккредитации на право калибровки СИ. Более 75% всех СИ подвергаются метрологическому обслуживанию силами ДО. Калибровке подлежат более 60 % всех СИ, 15 % СИ переведены в разряд индикаторов. Количество СИ, подвергающихся калибровке взамен поверки, неуклонно растет.

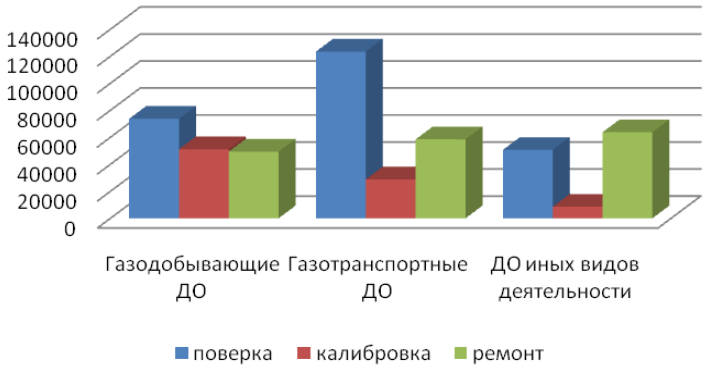


Рис. 1. Соотношение годовых затрат ПАО «Газпром» на поверку и ремонт СИ

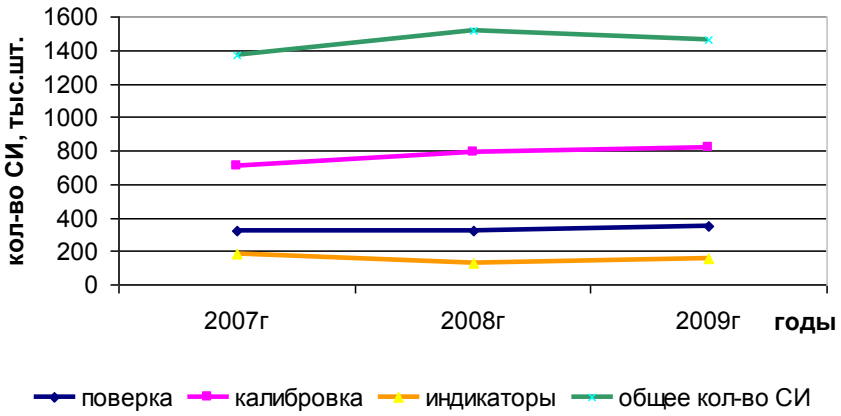


Рис. 2.Метрологическое обеспечение СИ

Проведение поверки СИ обходится ПАО «Газпром» в сумму не менее 250 млн. руб ежегодно. При этом большая часть СИ, из-за ограниченных возможностей эталонной базы Общества для поверки СИ, поверяется с привлечением сторонних организаций. Вовлечение в коммерческий оборот дополнительных объёмов газа и жидкости за счёт сужения зоны неопределённости измерения расхода газа проиллюстрировано на рис. 3.

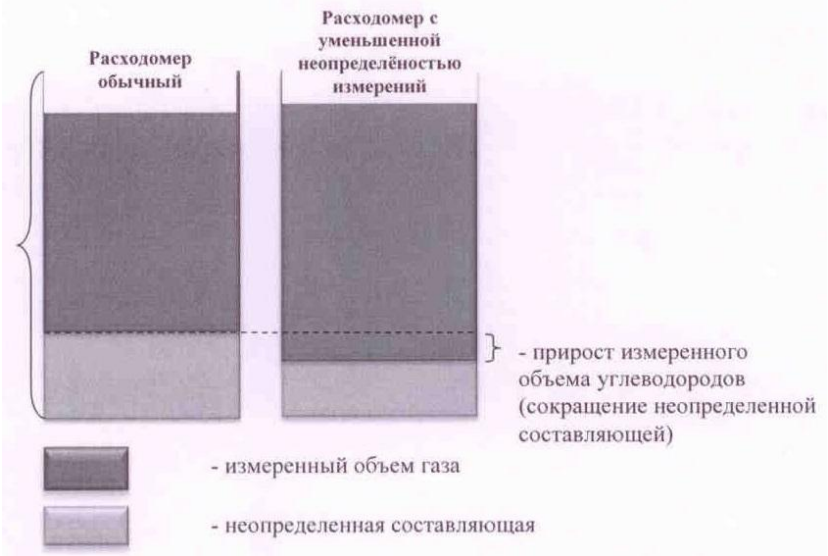


Рис. 3. Сужение зоны неопределённости измерения расхода газа.

Мероприятия по совершенствованию метрологического обеспечения в добыче газа приводит к более точному измерению объемов добытого газа и, следовательно, к снижению объемов добываемого газа, который невозможно учесть на настоящий момент из-за несовершенства метрологического обеспечения.

Политическая. Создание оборудования, позволяющего проводить проверку положений нормативных документов, в частности, документов федерального и отраслевого уровня в области измерения расхода газа и жидкости, проверку положений иностранных стандартов, предполагаемых к внедрению в РФ. Создание инструмента, позволяющего доказывать достоверность и заданную неопределённость выполнения измерений при решении вопросов поставки газа странам импортёрам.Гармонизация требований и правил в метрологии — важный фактор, содействующий устранению технических барьеров в международной торговле и интеграционным процессам во всем мире.

Программы МеО в ПАО «Газпром»

В соответствии с программой создания МРИЦ в ДО «Мострансгаз» и «Уралтрансгаз», Председателем Правления ПАО «Газпром» А.Б.Миллером и «Комплексной целевой программой МеО ПТП добычи, транспортировки, переработки, подготовки, хранения и поставки газа и жидких углеводородов в ПАО «Газпром» на 2011-2020 гг.», утверждённой постановлением Правления ПАО «Газпром» № 33 от 8.06.2010 г. в ПАО «Газпром» создаются 4 МРИЦ, ориентированных на решение проблем измерения количества и параметров качества природного газа:Отраслевой метрологический расходоизмерительный центр (ОМРИЦ);Уральский региональный метрологический центр (УРМЦ);Кавказский метрологический расходоизмерительный центр (КМРЦ);Дальневосточный региональный метрологический центр (ДРМЦ).

Приняты решения по созданию отраслевого метрологического центра по жидкости (ОМЦЖ) на базе ООО «ГП добыча Уренгой и двух региональных центров на базе ООО «ГП добыча Астрахань» и ООО «ГП добыча Оренбург» связанные единой поверочной схемой.

Принцип специализации заключается в том, что их задачи разнятся, например, по диаметрам обслуживаемых расходомеров, по рабочему давлению и т.п. Техническая специализация центров представлена в табл. 1, а в табл. 2 – функции и характеристики метрологического центра по жидкости.Главным отличием ОМРИЦ и ОМЦЖ от других являются расширенные функциональные возможности и круг решаемых задач. Наличие первичного эталона позволяет решить проблемы хранения, воспроизведения единиц расхода и передачи их рабочим эталонам региональных центров, а также проведение взаимных сличений эталонов расхода между ведущими метрологическими центрами мира.

Таблица 1.

Зоны обслуживания метрологических центров

Наименование метрологического центра	Обслуживаемые предприятия	Направление расширения услуг
Рабочая среда – природный газ		
Отраслевой метрологический расходоизмерительный центр (ОМРИЦ)	ГП Д Уренгой, Ямбург ГП ТГ Н.Новгород, Ухта, Самара, Казань, Москва	Белоруссия, Латвия, Эстония
Уральский региональный метрологический центр (УРМЦ)	ГП Д Ноябрьск, Оренбург, ГП ТГ Екатеринбург, Уфа, СургутЧайковский, Томск,	Республика Казахстан
Кавказский метрологический расходоизмерительный центр (КМРЦ)	ГП Д Астрахань, ОАО Чеченгазпром, ГП ТГ Махачкала, Ставрополь	Грузия, Азербайджан, Армения
Дальневосточный региональный метрологический центр (ДРМЦ)	ГП ТГ Томск	ОАО Дальтрансгаз, ОАО Сахалинморнефтгаз
Рабочая среда - жидкость (вода, жидкие углеводороды)		
Отраслевой метрологический центр по жидкости на базе ООО «Газпром добыча Уренгой» (ОМЦЖ)	ГП Д Уренгой, Ямбург, Астрахань, Оренбург, Краснодар ГП Переработка	ОАО Севернефтегазпром,ОАО Нордгаз, ОАО Газпром нефть,ООО Юрхаровнефтегаз
Метрологический центр для калибровки и поверки расходомеров жидкости Астраханского ГК	ГП Д Астрахань ГП Д Краснодар	ОАО «Роснефть»
Региональный поверочный расходоизмерительный центр по жидкости ОНГКМ	ГП Д Оренбург	ЗАО «Стимул» ОАО «Салаватнефтеоргсинтез»

Описание отраслевого и региональных центров по жидкости

ОМЦЖ на базе ООО «Газпром добыча Уренгой» создается как постоянно действующий объект, аттестованный на право выполнения работ по МеО оборудования, используемого для коммерческого и технологического измерения расхода количества жидкости (жидкие углеводороды, вода, ингибиторы), а также проведения НИР с целью установления метрологических характеристик СИ.

Передача размера единиц объёма и массы жидких углеводородов будет проводиться в соответствии с отраслевой поверочной схемой, которая будет интегрирована в государственную поверочную схему с учётом специфики измеряемых сред. Поверочная схема будет построена на базе ОМЦЖ ООО «ГП добыча Уренгой» с первичной эталонной установкой высшей точности и РМЦ по жидкости ООО «ГП добыча Астрахань» и ООО «ГП добыча Оренбург» с рабочими эталонами для проведения поверки рабочих СИ расхода.

Для решения этих задач метрологическое оборудование ОМЦЖ конструктивно будет реализовано на основе двух параллельно взаимосвязанных блоков. Первый блок - это водяная башня, аналог российской УВТ; второй блок - два плунжерных прувера и установка массового расхода, которые являются аналогами российский проливочных установок. Комплекс оборудования позволит обеспечить поверку и калибровку СИ с МХ (табл. 2).

Передача размера единицы объема жидкости рабочим СИ, с учетом оборудования и характеристик ОМРИЦ дана на рис. 3. Рабочей средой для работы эталонного оборудования

ОМЦЖ является подготовленная водопроводная вода. Для подтверждения возможности калибровки и поверки УЗ-расходомеров на воде и последующим применением на рабочих углеводородных средах группой «KROHNE» были предоставлены результаты научно-экспериментальных исследований в данном направлении и сертификаты. Результаты НИР подтверждены ведущими метрологическими международными институтами NMI и PTB.

Таблица 2.

Типы поверяемого оборудования

	Размер (DU)		**Расход (м³/ч)**		**Погрешность**
	Мин	**Макс**	**Мин**	**Макс**	
ТПУ, компакт-пруверы	80	300	40	3000	0.05%
Ультразвук – AltoVR (рабочий эталон 2)	100	300	0.06	3000	0.07%
Ультразвук - многолучевые (рабочие СИ)	100	300	0.06	3000	0.15%
Ультразвук, Турбинные (рабочие СИ)	50	300	0.06	3000	0.15÷0.5%
Турбинные, роторные, лопастные	12	50	0.06	100	0.15÷0.5%
Кориолисовые (массомеры)	20	150	0.06 т/ч	300 т/ч	0.1÷02%

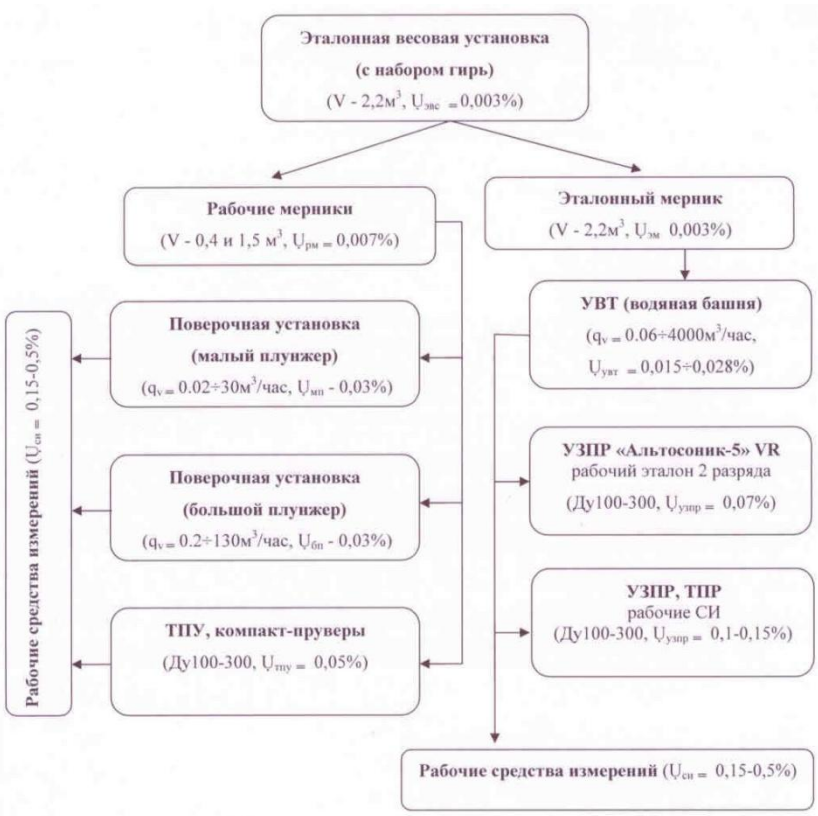


Рис. 3. Передача размера единицы объема жидкости рабочим СИ

Заключение

Учитывая высокие технические характеристики эталонов, возможность проведения НИР, возможность накопления опыта в процессе поверки и испытаний расходомеров можно надеяться, что создаваемые метрологические центры ПАО «Газпром» займут достойное место в ряду ведущих исследовательских центров Европы, станут центрами исследований в области измерения количества и параметров качества газа и жидких углеводородов.

Библиографический список

1. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
2. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // В сборнике: Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды IVВНПК // Под общей редакцией В.Ю. Островлянчика. Новокузнецк, 2010. – С. 38-45.
3. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. 2011. Т. 72. No. 6. С. 175-180.
4. Петров Н.Г., Запевалов Д.Н., Глазов Н.Н. Состояние и перспективы развития в нормативном фонде ПАО «Газпром» комплекса стандартов «Защита от коррозии» // Коррозия Территории Нефтегаз. – 2010. – № 3.– С. 8-12.
5. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию состояния ЭГПА // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
6. 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.
7. KryukovO.V. Electricdrivesystemsincompressorstationswithstochasticperturbations // RussianElectricalEngineering, March 2013, Vol. 84, Issue 3, pp. 135-140.
8. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. 2014. № 712. С. 84-87.
9. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа //В сборнике: Труды VIII Международной конференции АЭП-2014 в 2 томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 404-409.
10. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов МГ // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. – 2014. – С.409-414.
11. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. 2007. – 260с.
12. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 3-6.
13. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
14. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. 2010. № 5. – С. 2-11.
15. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
16. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С.52-60.
17. BabichevS.A., KryukovO.V., TitovV.G. Automatedsafetysystemforelectricdrivinggaspumpingunits // RussianElectricalEngineering. – 2010. – Т. 81. № 12. – P. 649-655.
18. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // ВестникЮУрГУ. Энергетика. – 2016. № 1. Т. 16. – С. 66-74.
19. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Труды XII МНПК. – Липецк: ИПУ РАН. – 2017. – С. 153-158.
20. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.

21. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. С. 458-463.

P.A. Zakharov, O.V. Kryukov

DEVELOPMENT REFERENCE AND ISPYTATELNY OF THE BASIS OF PJSC GAZPROM FOR CHECKING OF HIGH-PRECISION FLOW METERS IN OPERATING CONDITIONS

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

The strategy of development for a reference basis of gas industry is offered. It is shown that use of new metrological centers on checking, calibration and test of new measuring technique will allow to increase accuracy and to reduce losses on transportation of natural gas.

Keywords: testing facilities, main gas pipeline, standard, ring and flowing diagram, flow meter, accuracy of measurements.

УДК 62-52-83:656.56

П.А. Захаров, О.В. Крюков

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ ПАО «Газпром»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены актуальные вопросы организации поверочных испытаний и поверки счетчиков расхода газа. Представлены возможности улучшения метрологических характеристик при использовании новых методик измерений и технических средств в рамках метрологических расходоизмерительных центров. Приведены примеры особенностейреализации трех очередей Уральского метрологического расходоизмерительного центра.

Ключевые слова: счетчик расхода газа, поверка, метрологические характеристики, расходоизмерительный центр, магистральный газопровод.

Введение

В настоящее время в РФ при выпуске из производства, а также в процессе эксплуатации, поверка и калибровка счётчиков газа выполняется на давлении близком к атмосферному, а в качестве рабочей среды используется воздух[1-3]. Используется также метод «сухой» калибровки ультразвуковых счётчиков без движения рабочей среды.Вместе с тем эксплуатация счётчиков газа производится при давлениях, существенно превышающих атмосферное, и в качестве рабочей среды используются различные газы[4-6]. В ПАО «Газпром» эксплуатируется значительное количество счётчиков различных принципов действия: турбинные, ультразвуковые, ротационные, вихревые. Диапазон рабочих давлений 0,3-9,8 МПа. Основная доля счётчиков укладывается в диапазон условных диаметров 50-700 мм[7-9].

Поверочные установки заводов-изготовителей состоят из воздушного компрессора, работающего на нагнетание или отсос, создающего поток воздуха, комплекта трубопроводной арматуры для стабилизации потока, места установки рабочего и эталонного счётчика, а также компьютерной системы для сравнения их показаний и вычисления метрологических характеристик (МХ) рабочих счётчиков[10-12].

Однако различие параметров рабочей среды при поверке и при эксплуатации приводит к дополнительной систематической погрешности измерения расхода и количества газа.

Как показывают исследования, «отмечается увеличение относительной погрешности измерений объёмного расхода газа при использовании счётчика с калибровочными коэффициентами, рассчитанными при условиях, отличных от условий измерений. Можно предположить несколько причин такого поведения: паразитные акустические сигналы, изменение коэффициента усиления акустического сигнала или деформация отдельных узлов счётчика и корпуса в целом под влиянием среды»[13-16].

Типичными для современных УЗ-преобразователей являются следующие виды корректировки показаний, основанные на оценке их МХ, полученных в динамических условиях: корректировка по средневзвешенному, полиномиальная корректировка и кусочно-линейная интерполяция. Применение данных видов корректировки показаний УЗ-преобразователей позволяет существенно снизить погрешность измерений расхода газа во всём диапазоне расходов на рабочем давлении.Для турбинных счётчиков существует эффект расширения диапазона расходов с установленной погрешностью при увеличении рабочего давления газа.

Теоретическое обоснование методов улучшения МХ счетчиков

Из теории и практики известно[13-16], что диапазон измерения расхода можно расширить за счёт снижения минимального расхода при повышении рабочего давления, что становится особенно актуальным для обеспечения режимов газопотребления типа «зима – лето». Так, в зоне малых расходов, с уменьшением числа Рейнольдса на коэффициенте преобразования счётчика, а, следовательно, и на его погрешности, начинает всё сильнее сказываться влияние вязкости изме-

ряемой среды и момента сопротивления узла редуктора. Для снижения данного влияния необходимо увеличить число Рейнольдса.

В дополнение к этому можно отметить, что, если определена погрешность счётчика в точке расхода Q_1 при давлении близком к атмосферному $P_{абс1}$ =0,1 МПа, которым соответствует» определённое «число Рейнольдса, то счётчик будет иметь аналогичную погрешность при работе на абсолютном давлении $P_{абс2}$ =0,4 Мпа ($P_{изб2}$ =0,3 МПа) на расходе Q_2 равном:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{1+\frac{P_{изб2}}{P_{абс1}}} = \frac{Q_1}{1+\frac{300}{100}} = 0{,}25Q_1. \quad (1)$$

Это означает, что поверка счётчиков, выполненная при давлении близком к атмосферному в диапазоне расходов 1/20, является достаточной для счётчика, работающего при избыточном давлении 0,3 МПа в диапазоне расходов 1/80. Специалистами ООО «ЭЛЬСТЕР Газэлектроника» в рамках сертификационных испытаний турбинных счётчиков газа TRZ, проведённых на базе аттестованной и аккредитованной метрологической лаборатории ElsterGmbh (Германия), были подтверждены теоретические выводы о возможном расширении диапазона измерений счётчика TRZ».

Несмотря на острую необходимость в поверочных и испытательных установках на реальном давлении природного газа, в России такие установки большая редкость.В ПАО «Газпром» в настоящее время действует одна такая установка в УРМЦ – «Уральском региональном метрологическом центре» в Челябинском ЛПУ ООО «ГП ТГ Екатеринбург» (рис. 1).

Рис. 1. Измерительные линии первой очереди УРМЦ

Основные задачи расходоизмерительных центров

ПАО «Газпром» на протяжении ряда лет занимается созданием системы метрологических расходоизмерительных центров.Для этого разработана Программа создания метрологических расходоизмерительных центров в дочерних обществах «Мострансгаз» и «Уралтрансгаз», и Комплексная целевая программа МеО ПТП добычи, транспортировки, переработки, подготовки, хранения и поставки газа и жидких углеводородов в ПАО «Газпром» на 2011-2020 гг. В соответствии с этими программами в ПАО «Газпром» создаются четыре метрологических расходоизмерительных центра по газу: Отраслевой метрологический расходоизмерительный центр (ОМРИЦ), Уральский региональный метрологический центр (УРМЦ), Кавказский метрологический расходоизмерительный центр (КМРЦ), Дальневосточный региональный метрологический центр (ДРМЦ) (табл. 1).

Для расширения диапазона рабочих давлений и расходов на ряде центров в дополнение к традиционной проточной схеме работы, применена кольцевая. Специализация центров проявляется в их различном территориальном расположении по регионам России, в разности задач, диаметров обслуживаемых расходомеров, рабочего давления и т.п.

Таблица 1.

Специализация метрологических центров.

Функции	ОМРИЦ	УРМЦ 1-2 очередь	УРМЦ 3 очередь	КМРЦ	ДРМЦ
Диаметры условного прохода обслуживаемых счётчиков, мм	50 - 1000	50 - 1000	50 - 1000	100 - 700	50-700
Схема работы	проточно-кольцевая	проточная	кольцевая	проточная	кольцевая
Поверка калибровка счётчиков газа (Р = 0,3 – 4,0 МПа)	+		+	+	+
Поверка калибровка счётчиков газа (Р= 4,0 – 7,4 МПа)	+	+			+
Поверка калибровка счётчиков газа (Р = 10 МПа)					+
Поверка калибровка СИ и сигнализаторов довзрывных концентраций					+
Обслуживание, поверка сужающих устройств	+	+		+	+
Поверка, калибровка СИ давления, температуры	+	+		+	+
Поверка, калибровка СИ электрических величин	+			+	+
Поверка, калибровка СИ вибрации				+	+
Поверка, калибровка СИ влажности	+		+	+	+
Поверка, калибровка СИ физико-химических параметров газа	+		+	+	+
Выпуск ГСО природного газа	+		+	+	+
Выпуск ГСО влажности газа	+		+	+	
Обучение специалистов	+		+		+
Апробирование МВИ расхода, объема, показателей качества газа	+	+	+	+	+
Эксплуатация эталона расхода газа высокой точности	+		+		
Сличение эталонов расхода газа	+	+	+	+	+
Испытания на МеО надёжность	+	+	+	+	+
Исследования СИ расхода газа	+		+	+	

Принцип иерархии заключается в том, что по основным измерительным задачам отраслевой центр является головным и передаёт размеры единиц региональным центрам. Например, размер единицы 1 м^3 природного газа передаётся от первичного эталона ОМРИЦ региональным МЦ. Основные параметры эталонов расхода газа ОМРИЦ показаны в табл. 1, а потока газа – в табл. 2.Указанные параметры центра позволяют проводить поверку, калибровку различных типов расходомерных устройств и счётчиков газа. Для проведения исследовательских работ на ОМРИЦ предусмотрена возможность установки взамен рабочих секций *D*y 200 и *D*y 400 исследовательских секций, содержащих эталонные расходомеры, прямые участки измерительных трубопроводов различной длины до и после испытываемых расходомеров, измерительные преобразователи

давления, датчики температуры и давления. Прямые участки могут заменяться на различные местные сопротивления (расширитель потока, поворот потока на 90° в двух плоскостях и другие).

Таблица 2.

Основные параметры эталонов расхода газа ОМРИЦ

	Гос. первичный эталон расхода газа(ГОСТ Р 8.618-2006)	Первичный эталонОМРИЦ	Вторичный эталон ОМРИЦ
Рабочая среда	Воздух	Природный газ	Природный газ
Диапазон давлений	1 атм	0,1÷7,5 МПа	0,1÷7,5 МПа
Диапазон расходов основная установка, приросте диапазона, $м^3/ч$	0,003÷100 0,003÷10000	5÷120 5÷4000	2÷54000
Расширенная неопределенность измерений, %	0,035÷0,05	0,06	0,22÷0,25

Предусмотрена возможность устанавливать оборудование по искусственному возмущению потока газа (рис. 2-3):

- различные конфигурации трубопроводов, создающие местные сопротивления по международному стандарту *OIMLR* 137.
- устройство закручивания потока газа;
- устройство измерения скорости потока газа в различных точках потока;
- устройство для генерации и обнаружения пульсаций газа.

Таблица 3.

Параметры потока газа в кольцевом и проточном режимах

Давление Р (МПа)	Режим работы ОМРИЦ	
	Проточный (млн. $м^3/ч$)	Кольцевой (млн. $м^3/ч$)
1,2	1,3	0,1
4,0	2,0	1,0
7,4	-	1,0

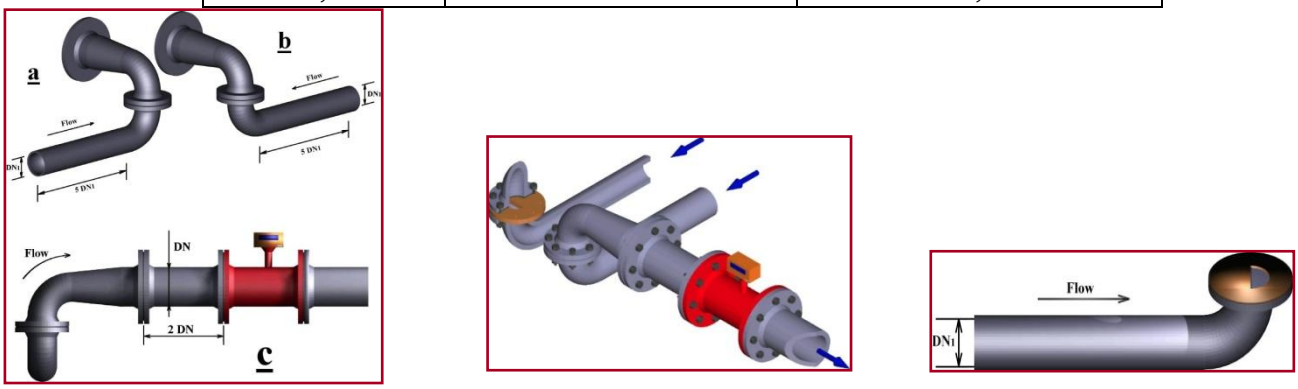


Рис 2. Различные конфигурации трубопроводов по OIMLR 137

Рис. 3. Устройство закручивания потока газа

Первая очередь испытательной площадки УРМЦ (рис. 1), сданная в эксплуатацию, включает 4 измерительных трубопровода (ИТ) *DN* 150, 200, 300 и 400, которые оснащены рабочими эталонами ElsterInstromet по 1 на каждый ИТ. Эталоны представляют собой турбинные счётчики семейства SM-R-I с номиналами G-400, G-1000, G-2500, G-6500 позволяющие перекрыть диапазон расхода газа от 32 до 10000 м^3/ч при рабочих условиях. Диапазон рабочих давлений составляет от 5,6 до 7,5 МПа.Вторая очередь позволяет проводить поверку, калибровку, испытания расходомеров с расходом до 47 тыс м^3/ч при том же давлении. Испытательные секции предназначены для установки расходомеров условными диаметрами от *D*у 500 до *D*у 1000. Третья очередь УРМЦ планируется для создания возможности проводить испытания расходомеров на «низком» давлении природного газа (0,3 МПа, 0,6 МПа, 1,2 МПа, 4,0 МПа). Кроме того создание третьей очереди позволит организовать систему передачи размера единицы м^3 природного газа от первичного эталона ОМРИЦ.

Перспективные задачи и возможные пути их реализации.

– *Включение в систему единства измерений РФ.* В табл. 3 даны параметры эталонов ОМРИЦ и первичного гос. эталона расхода газа. Неопределённость измерения их 1 м^3 имеет один порядок. Для передачи размера единицы от гос. эталона в ОМРИЦ предусматривается установка с комплектом критических сопел.

–*Проведение сличений эталонов м^3 газа метрологических центров ПАО «Газпром» с эталонами европейских стран.*Сличение эталонов может быть проведено с помощью переносных сдвоенных ротационно-поршневых пруверов, а также критических сопел РИЦ.

–*Обеспечение поверки и калибровки парка счётчиков газа различного типа и размера в различных регионах РФ.* Поверка и калибровка счётчиков на рабочем давлении будет востребована для счётчиков повышенной точности, УЗ-счётчиков диаметров *D*у 400 и выше и расходомеров, используемых при высоких давлениях газа.

–*Проведение различных испытаний и исследований счётчиков.*

Технологическое оборудование создаваемых центров позволяет проводить ряд исследований расходомеров в рамках *OIMLR* 137, но по мере освоения методов испытаний будут проведены исследования, имеющие важность для газовой отрасли. Это в первую очередь исследования новых типов счётчиков и расходомеров, планируемых к применению, а также - испытания с целью оптимизации длин прямых участков до и после расходомеров для случаев различных нестандартных местных сопротивлений. Оборудование центров позволит выполнять широкий спектр НИР в области расходометрии: разработка методики выполнения измерений УЗ-расходомерами для давлений газа выше 7,5 МПа, разработка методов снижения влияния температуры и влажности газа на неопределённость измерения расхода газа, разработка методов снижения пульсаций давления и расхода на неопределённость измерения газа, определение потерь давления на счётчиках и измерительных трубопроводах и т.п.

Заключение

В настоящее время поверка счётчиков на рабочем давлении газа, некоторые испытания и исследовательские работы выполняются на первой очереди УРМЦ. Построена вторая очередь УРМЦ, проектируется третья. Выполнена проектная документация на ОМРИЦ. Кавказский и Дальневосточный центры находятся в стадии проектирования. После ввода в эксплуатацию основными направлениями деятельности центров должны стать научные задачи по изучению различных физических эффектов в области расходометрии, в частности, исследования и испытания счётчиков и расходомеров газа. Задачи поверки и калибровки должны выполняться для накопления статистических данных о метрологической надёжности счётчиков и обеспечения самоокупаемости.

Библиографический список

1. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // В сборнике: Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15 / М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. – 2015.– С.368-386.
2. 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.
3. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т. 81. № 12. – P. 649-655.
4. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 6. – С. 3-6.
5. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В., Киянов Н.В.Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44-47.
6. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию состояния ЭГПА // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
7. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
8. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
9. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
10. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // ВестникЮУрГУ. Энергетика. – 2016. № 1. Т. 16. – С. 66-74.
11. Петров Н.Г., Запевалов Д.Н., Глазов Н.Н. Состояние и перспективы развития в нормативном фонде ПАО «Газпром» комплекса стандартов «Защита от коррозии» // Коррозия Территории Нефтегаз. – 2010. – № 3.– С. 8-12.
12. Крюков О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С.52-60.
13. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
14. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
15. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа //В сборнике: Труды VIII Международной конференции АЭП-2014 в 2 томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 404-409.
16. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24-31.
17. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. No. 6. – С. 175-180.
18. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. – 2007. – 260с.
19. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2-11.
20. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.

P.A. Zakharov, O.V. Kryukov

DEVELOPMENT PERSPECTIVES OF METROLOGICAL FLOW MEASURING CENTRES OF PJSC “Gazprom”

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

Topical issues of the organization of testing tests and checking of counters of the expenditure of gas are considered. Possibilities of improving of metrological characteristics when using new measurement techniques and technical means are provided within metrological the flow measuring centers. Examples of features of implementation of three queues of the Ural metrological flow measuring center are given.

*Keywords:*counter of the expenditure of gas, checking, metrological characteristics, the flow measuring center, main gas pipeline.

УДК 621.313.3

В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов, О.В. Мещерякова

ФОРСИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ИНВЕРТОРА ТОКА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Липецкий государственный технический университет

Рассматриваются принципы построения асинхронного электропривода на базе автономного инвертора тока с релейным регулятором тока с векторным управлением и результаты исследований процесса пуска с форсированием напряжения.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, инвертор тока, векторное управление, математическая модель, форсирование напряжения

Введение

Системы асинхронного электропривода с векторным управлением находят широкое применение на механизмах циклического действия – подъемно-транспортных механизмах, мобильных роботах и др., работающих в повторно-кратковременных режимах с регулированием скорости в заданном диапазоне. Для таких механизмов важным является стабилизация пускового момента, обычно превышающего номинальный момент в 1,4-1,7 раз. Силовая часть систем частотного электропривода большой мощности во многих случаях выполняется на базе автономного инвертора тока (АИТ). В системе векторного управления осуществляется непрерывный контроль и управление переменными двигателя, в качестве которых обычно принимаются продольная (намагничивающая) и поперечная (моментообразующая) составляющие тока статора, а также его частота [1,4-7]. При качественной настройке контуров регулирования переменных пусковой момент поддерживается на заданном уровне с требуемой точностью.

Теоретический анализ и описание работы электропривода.

Величина момента двигателя может быть определена по формуле

$$\mathrm{M} = \frac{3}{2}\frac{L_m}{L_2'} \cdot p_n \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q} \qquad (1)$$

где Ψ_{2d} - вектор потокосцепление ротора, расположенный на оси d; I_{1q} – проекция вектора тока статора на ось q; L_m – индуктивность основного контура намагничивания; L_2' - индуктивность ротора; p_n – число пар полюсов двигателя.

Величину тока статора можно определить на основании уравнения баланса напряжений

$$\dot{U}_1 = R_1\dot{I}_1 + \frac{d}{dt}\dot{\Psi}_1 \qquad (2)$$

Потокосцепления обмоток статора, ротора и главное потокосцепление связаны выражениями

$$\dot{\Psi}_1 = L_1\dot{I}_1 + L_m\dot{I}'_2 \qquad (3)$$

$$\dot{\Psi}_2 = L_m\dot{I}_1 + L'_2\dot{I}'_2 \qquad (4)$$

$$\dot{\psi}_2 = \dot{I}'_2 \cdot (L_m + L'_{2\sigma}) + \dot{I}_1 \cdot L_m = \dot{I}'_2 \cdot L'_2 + \dot{I}_1 \cdot L_m \qquad (5)$$

$$\dot{\psi}_m = \left(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2\right)L_m = \dot{I}_m \cdot L_m \qquad (6)$$

Из выражения (2) видно, что для обеспечения кратковременного увеличения кратности пускового момента при пуске (до значений 1,5 и более) необходимо либо увеличивать напряжение питания, либо ослаблять магнитный поток.

В инверторе тока увеличение напряжения, подводимого к обмотке статора двигателя, может быть осуществлено за счет накопления энергии в сглаживающем дросселе с последующей отдачей в конденсаторный фильтр, что реализуется путем изменения алгоритма управления

ключами инвертора. В течение очень малого интервала времени включаются два ключа в разных плечах одной фазы инвертора, при этом ток через сглаживающий реактор возрастает, в нем происходит накопление электромагнитной энергии. В следующем интервале времени ЭДС, накопленная в сглаживающем дросселе складывается с выпрямленным напряжением питающего выпрямителя. В результате такой работы инвертора повышается напряжение, подводимое к обмотке статора двигателя.

Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением и системой коррекции намагничивающей составляющей тока статора приведена на рисунке 1.

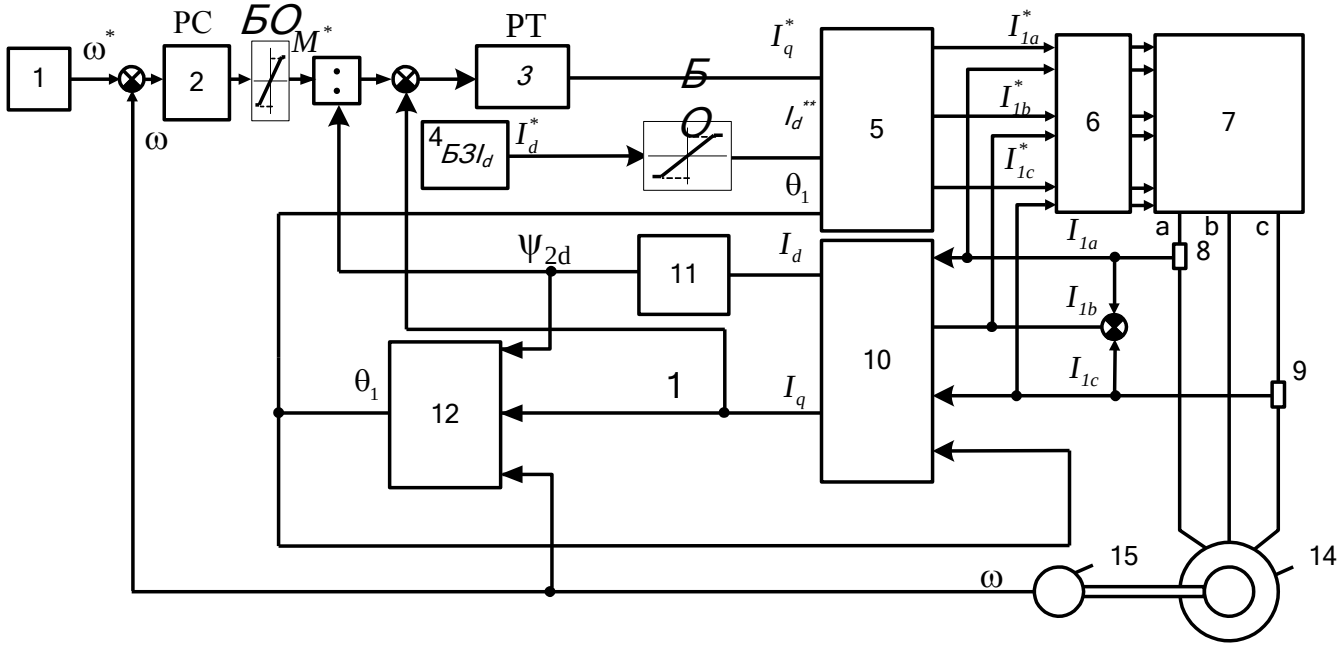


Рис. 1 Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением и системой коррекции сигнала задания намагничивающей составляющей тока статора

Система векторного управления асинхронным двигателем может быть выполнена на базе автономного инвертора тока (АИТ) [2,3,6,8]. При использовании АИТ, содержащих полностью управляемые ключевые элементы, например, IGBT-транзисторы или GTO-тиристоры, за счет реализации релейного регулирования можно получить выходной ток, питающий двигатель, наиболее близкий по форме к синусоидальному с минимальным уровнем высокочастотных составляющих.

На рисунке 2 показана схема инвертора тока, на базе которого построена система векторного управления асинхронным двигателем 1. При выполнении инвертора тока на базе типовых IGBT- транзисторов с обратными диодами, он должен быть оснащен последовательно включенными дополнительными высокочастотными отсекающими диодами 2, на выходе инвертора тока устанавливаются фильтрующие конденсаторы 4, в звено постоянного тока включен дроссель 5.

Математическое описание и моделирование системы электропривода

Инвертор тока формирует на выходе фазные токи статора с помощью контуров регулирования, в состав которых входят релейные регуляторы тока (РРТ).

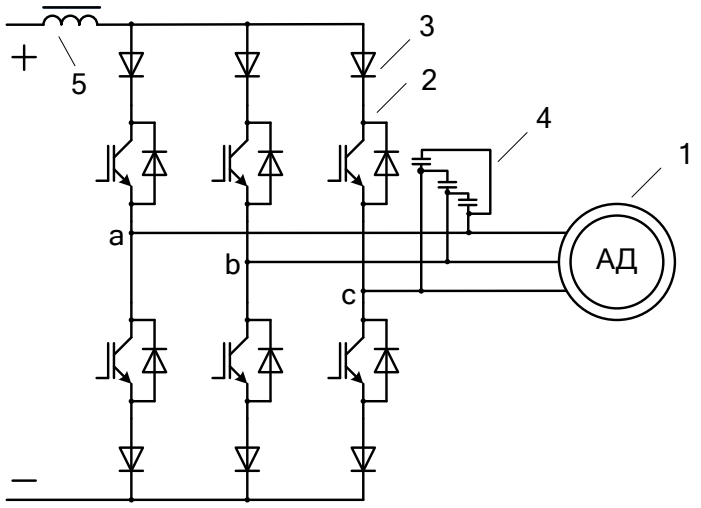


Рис. 2 Схема АИТ на базе IGBT – транзисторов с дополнительными отсекающими диодами

Блок-схема двухпозиционного гистерезисного регулятора тока приведена на рисунке 3. В релейных регуляторах тока, формирующих переключающие сигналы для транзисторов IGBT-модуля, задается пороговый уровень рассогласования ΔI заданного и измеренного значений фазных токов статора. Выходы РРТ имеют следующие состояния:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta I_1 \le -\tau/2, \text{ на выходе активное состояние (0);} \\ \text{если } \Delta I_1 \ge \tau/2, \text{ на выходе активное состояние (1);} \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{2}\cdot I_{1н}}{100}, \quad (9)$$

где τ - ширина зоны гистерезиса; $I_{1н}$ - действующее значение номинального тока статора.

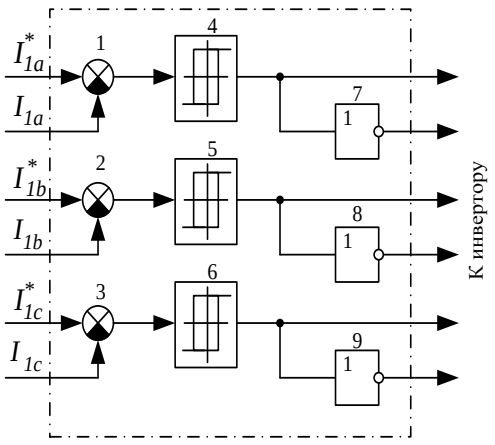


Рис. 3 Функциональная схема блока трехфазного двухпозиционного релейно-гистерезисного регулятора тока

Внешний замкнутый контур управления скоростью двигателя имеет обычную структуру, применяемую в системах управления асинхронными электроприводами с регулятором скорости ПИ-типа [1,4,5].

В случае работы электропривода в таком оптимальном режиме при заданной производительности работы, ток статора снижается в среднем на 5%.

Динамические пусковые характеристики электропривода были получены методом математического моделирования с помощью пакета прикладных программ MATLAB приложение Simulink. Схема имитационно модели показана на рисунке 4, где приведены укрупненные блоки асинхронного электропривода на базе АИТ с векторным управлением. Моделирование проводилось для двигателя тип АДЧР 355 МА 6, мощностью 200 кВт, номинальный момент 1924 Нм.

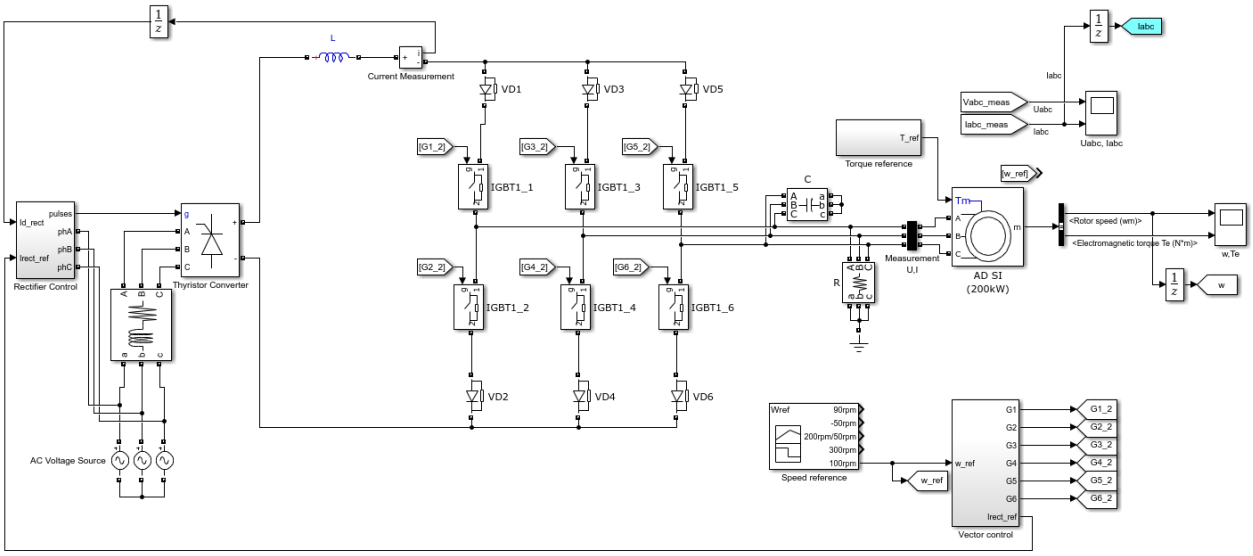


Рис. 4 Имитационная модель исследуемой системы в приложении Simulink

Результаты моделирования процесса пуска электропривода приведены на рисунке 5. Из графиков, приведенных на рисунках 5, г и 5, д видно, что на интервале времени от t_1 до t_2 происходит форсирование напряжения, достигаемого за счет реализации алгоритма управления ключами инвертора с кратковременным повышением тока в сглаживающем дросселе. В этом случае нет необходимости изменять соотношение между продольной и поперечной составляющими тока статора, уменьшая намагничивающую составляющую тока статора в процессе разгона двигателя в области частот вращения, близких к номинальному значению, т.к. в процессе увеличения эдс статора происходит автоматическое возрастание питающего напряжения до необходимого увеличенного примерно на 8% уровня по отношению к максимально возможному для инверторов напряжения значению.

Выводы

1. В АИТ при изменении алгоритма управления ключевыми элементами достигается форсирование напряжения питания статора двигателя, что обеспечивает возможность разгона двигателя с повышенным пусковым моментом без снижения намагничивающей составляющей тока статора.

2. При релейном управлении мгновенными значениями токов в обмотках статора в системе асинхронного электропривода на базе АИТ при отклонениях тока от гладкой составляющей первой гармоники на заданном уровне не более 5%, отклонения напряжения от гладкой составляющей первой гармоники не превышают 15%.

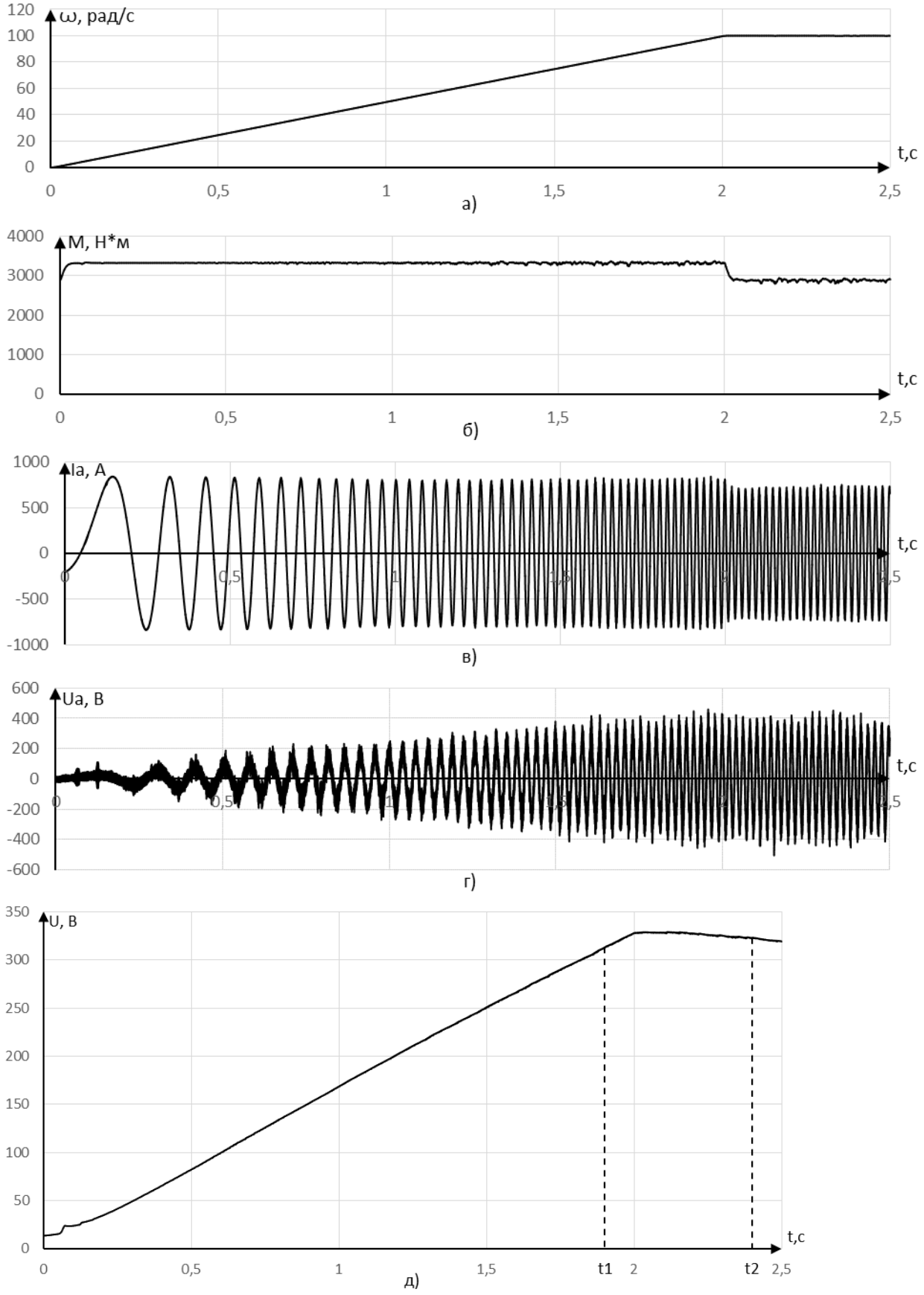


Рис.5 Графики переходных процессов

Библиографичекий список

1. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко // Кишинев: Штиинца, 1982. 223 с.
2. Шрейнер Р.Т. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока / Р.Т. Шрейнер и др. // Электротехника, 2004, №10.
3. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н., Мещерякова О.В. Вентильный электропривод для робототехнических систем с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Материалы 10-ой Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления. Т1. Дивноморское. 2017. С. 167-171.
4. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом // Системы управления и информационные технологии. №3 (61), 2015. – С. 36-38.
5. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения / Вестник ЛГТУ. 2017. №1. С.24-28.
6. Мещеряков В.Н., Копаев Ю.П., Ласточкин Д.В. Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления. Вести вузов Черноземья. 2016. №2. С.13-18.
7. Синюкова Т.В. Энергосбережение в системах управления электроприводами производственных механизмов / Т.В. Синюкова, П.П. Левин, А.В. Синюков // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах Тезисы докладов 3-й Международной конференции с элементами научной школы. 2016. С.138-139.
8. Meshcheryakov V.N. Voekov V.N. Vector control bazed on self commutated current with relay voltage regulation in rectifier drive / Вести вузов Черноземья. 2016. №4. С.28-36.

V.N. Meshcheryakov, V.V. Danilov, O.V. Meshcheryakova

VOLTAGE BOOST FOR STARTING ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BASED ON CURRENT INVERTER WITH VECTOR CONTROL

Lipetsk State University

The principles of constructing an asynchronous electric drive based on the autonomous current inverter with the current relay controller and vector controls as well as the results of studies of the starting process with voltage forcing are considered.

Keywords: asynchronous electric drive, current inverter, vector control, mathematical model, voltage boost

УДК 621.313.3

В.Н.Мещеряков, Д.В. Ласточкин

ЧАСТОТНО-КАСКАДНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ИНВЕРТОРА ТОКА С РЕЛЕЙНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Липецкий государственный технический университет

Рассматривается принципы построения системы частотно-каскадного электропривода, приведена функциональная схемы электропривода, дано описание работы электропривода и динамические механические характеристики.

Ключевые слова: каскад, электропривод, частотное управление, математическая модель, динамические характеристики

Вводная часть

В системах частотно-каскадного электропривода (ЧКЭ) обмотки статора и ротора соединяются гальванически в общую цепь, в состав которой входят вентильные преобразователи, формирующие звено постоянного тока, что позволяет передавать энергию скольжения из цепи ротора в цепь обмотки статора [1,2,3]. При построении систем ЧКЭ на базе автономного инвертора тока (АИТ), выполненного на полностью управляемых ключевых элементах, например, IGBT-транзисторах или GTO-тиристорах, при использовании принципа релейного регулирования выходного напряжения [4], можно получить форму выходного напряжения, наиболее приближенную к синусоидальной при обеспечении диапазона регулирования выходной частоты до 1:10. Система управления инвертором может быть выполнена скалярной двухканальной с каналами регулирования частоты и напряжения, датчик скорости не требуется. В системах ЧКЭ применяться типовые элементы: асинхронный двигатель с фазным ротором, нерегулируемый выпрямитель, подключенный к обмотке ротора двигателя, автономный инвертор тока, подключенный к обмотке статора, питающий выпрямитель, который в большинстве известных систем ЧКЭ является регулируемым [2,3].

Теоретический анализ и описание работы электропривода

В системе ЧКЭ в пусковом режиме осуществляется управление путем изменения тока в выпрямленной цепи в функции напряжения на выходе инвертора тока. Уравнение баланса напряжений, при условии приведения всех параметров и переменных системы к цепи постоянного тока, запишется:

$$E_{d0} - I_d \cdot R_{d0} - \left(E_{d1} - I_d \cdot R_{dэ1}\right) + \left(E_{d2} - I_d \cdot R_{dэ2}\right) - I_d \cdot \Delta R_d - I_d R_{др} - \frac{dI_d}{dt} \cdot L_{dэ} = 0, \quad (1)$$

где E_{d0} - выпрямленная эдс регулируемого выпрямителя; E_{d1} - выпрямленная противо-эдс обмотки статора; E_{d2} - выпрямленная эдс обмотки ротора; I_d - выпрямленный ток; $R_{dэ0}$ - приведенное к выпрямленной цепи эквивалентное сопротивление источников питания; $R_{dэ1}$ - приведенное к выпрямленной цепи эквивалентное сопротивление обмотки статора двигателя; $R_{dэ2}$ - приведенное к выпрямленной цепи эквивалентное сопротивление обмотки ротора двигателя; ΔR_d - суммарное сопротивление вентилей схемы; $R_{др}$ - активное сопротивление сглаживающего дросселя; $L_{др}$ – индуктивность сглаживающего дросселя; $L_{dэ}$ - эквивалентная индуктивность цепи постоянного тока.

На рис. 1 приведена функциональная схема электропривода, в которой использованы нерегулируемый питающий выпрямитель 1, диодный выпрямитель 26, подключенный к обмоткам ротора, АИТ 2, подключенный к обмоткам статора, реактор 3, силовой коммутатор - запираемый транзистор 27, введенный в звено постоянного тока. Нерегулируемы питающий выпрямитель применен для обеспечения коэффициента мощности системы ЧКЭ на уровне близком к единице, а

для управления выпрямленным током использован дополнительный коммутатора в выпрямленной цепи, работающий в импульсном режиме. Система управления обеспечивает согласованную работу инвертора, питающего обмотку статора двигателя, и силового коммутатора в звене постоянного тока, регулирующего мощность, подводимую к входу инвертора тока.

Инвертор выполнен по мостовой схеме на полностью управляемых вентилях - IGBT-транзисторах 5. В анодную и катодную группы инвертора последовательно с управляемыми вентилями включены дополнительные отсекающие диоды 6 и 7, и дополнительные буферные блоки конденсаторов 8 и 9, подключенные к точкам соединения отсекающих диодов и управляемых вентилей между каждым диодным и IGBT-транзисторным полумостом. К выходам инвертора подключена фильтрующая конденсаторная батарея 10. На выходах инвертора 2 установлен блок датчиков фазных напряжений статора 11, выходы которого соединены с отрицательными фазными входами релейного регулятора напряжения 12, имеющего узлы сравнения фазных напряжений 13,14,15 и релейный блок формирования импульсов 16 на IGBT-транзисторы. На положительные входы узлы сравнения 13,14,15 поступают сигналы задания мгновенных значений напряжения с выхода формирователя напряжений 17, который соединен с блоком 18 - задания сигналов управления.

Сигнал задания напряжения на выходе инвертора сравнивается с измеренным сигналом напряжения на узле 30, сигнал рассогласования поступает на вход релейного регулятора 29, формирующего сигналы задания на включение и отключение транзисторного коммутатора 27.

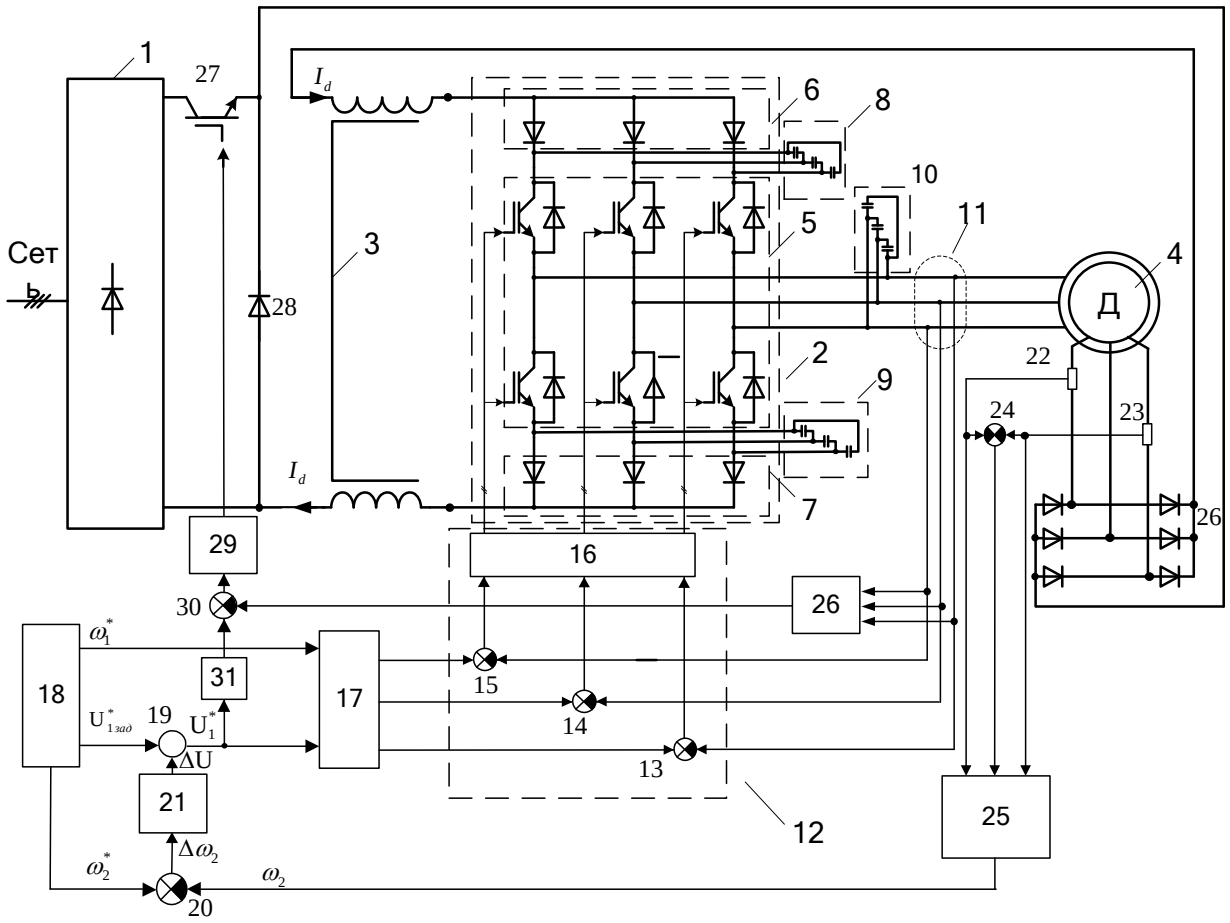


Рис. 1. Функциональная схема частотно-каскадного электропривода на базе инвертора тока с релейным регулятором напряжения

Электропривод работает следующим образом. Инвертор тока 2 питает статорные обмотки асинхронного двигателя 4, вырабатывая релейно-модулируемые пульсации силового тока, длительность которых определяется управляющими пульсациями, поступающими с выхода

релейного блока 16, осуществляющего регулирование напряжения по синусоидальной огибающей с отклонением от нее на величину зоны нечувствительности релейного блока 16.

На положительные входы сумматоров 13,14,15 релейного регулятора напряжения 12 поступают с выхода блока 17 сигналы задания на напряжение каждой из фаз u_{1a}*, u_{1b}*, u_{1c}* в виде синусоидального сигнала требуемой амплитуды U_1* и частоты ω_1*

$$\begin{cases} u_{1A}^* = U_1^* \cdot \sin(\omega_1^* \cdot t); \\ u_{1B}^* = U_1^* \cdot \sin(\omega_1^* \cdot t - 2\pi/3); \\ u_{1C}^* = U_1^* \cdot \sin(\omega_1^* \cdot t + 2\pi/3). \end{cases} \quad (2)$$

С выхода блока 11 на отрицательные входы сумматоров 13,14,15 релейного регулятора напряжения 12 поступают сигналы обратной связи по напряжению фаз u_{1a}, $u_{1в}$, u_{1c}. В результате сравнения этих сигналов на выходах блоков 13,14,15 получаем разницу между заданным и действительным значениями напряжения в фазах статора:

$$\begin{cases} \Delta u_{1a} = u^*_{1a} - u_{1a} \\ \Delta u_{1B} = u^*_{1b} - u_{1b} \\ \Delta u_{1C} = u^*_{1c} - u_{1c} \end{cases}. \quad (3)$$

Полученные сигналы поступают на входы релейного блока 16 имеющего гистерезис, и включающего вентиль инвертора, если рассогласование на входе релейного регулятора превышает зону гистерезиса, и выключающего вентиль инвертора, если рассогласование на его входе не превышает зону гистерезиса.

Релейный регулятор напряжения работает по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta u_1 \prec \Delta/2, & \text{на выходе активное состояние (0);} \\ \text{если } \Delta u_1 \succ /2, & \text{на выходе активное состояние (1),} \end{cases} \quad (4)$$

где Δ - модуль гистерезиса, задаваемый из условия точности поддержания напряжения статора и устойчивости работы системы регулирования.

Величина модуля гистерезиса может быть принята:

$$\Delta = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1н} \cdot \gamma}{100}, \quad (5)$$

где $U_{1н}$ - действующее значение номинального напряжения статора; γ - коэффициент, определяющий закон регулирования напряжения ПЧ.

Блок 16 формирует сигналы управления вентильными ключами, например IGBT-транзисторами, инвертора 2. При нарушении верхней границы Δ напряжения U_1* включается соответствующий вентиль одной группы инвертора 2 и формируется отрицательный импульс тока, который разряжает в соответствующей фазе конденсатор 10, понижая напряжение на нем и в фазе статора двигателя. В случае нарушения нижней границы Δ напряжения U_1* включается соответствующий вентиль другой группы инвертора 2 и формируется положительный импульс тока, конденсатор соответствующей фазы 10 заряжается, повышая напряжение соответствующей фазы статора двигателя.

Сигнал с выхода блоков гистерезиса поступает на выход управления силовыми ключами соответствующей фазы, выходные сигналы определяют частоту переключений для каждого из ключей. Частота переключений силовых ключей может составлять более 2500 Гц. Сигналы требуемой амплитуды $U_{1зад}$* и частоты ω_1* формирует блок задания сигналов управления 18 в соответствии с запрограммированным в этом блоке законом частотного управления U_1^*=f (ω_1^*), рассчитанным на номинальную нагрузку. Сигнал задания частоты ω_1* поступают на один вход блока формирования мгновенных значений фазных напряжений 17, на другой вход которого поступает сигнал с выхода сумматора 19, на входы которого поступают сигналы - со второго

выхода блока 18 задания $U_{1зад}$* и сигнал коррекции напряжения ΔU, и на выходе сумматора 19 формируется сигнал $U_1^* = U_{1çàä}^* + \Delta U$. Блок задания 18 формирует также величину сигнала задания частоты тока ротора ω_2^*, и соответственно, скольжения. В блоке 25 на основании сигналов с датчиков тока определяется частота тока ротора ω_2. Сигнал рассогласования $\Delta\omega_2 = \omega_2^* - \omega_2$ поступает с выхода узла сравнения 20 на вход блока 21, в котором рассчитывается сигнал коррекции задания на напряжение ΔU. Блок 21 плавно изменяет сигнал на выходе ΔU при наличии рассогласования $\Delta\omega_2$ и оставляет сигнал на выходе неизменным, когда сигнал рассогласования становится равным нулю. Поддержание постоянства $\Delta\omega_2$=0 позволяет поддерживать на постоянном уровне частоту тока ротора и, следовательно, разницу между частотой вращения поля статора и частотой вращения ротора. Поэтому при изменении нагрузки на валу при постоянстве частоты вращения поля статора поддерживается постоянство частоты вращения ротора.

Выпрямитель 1 выполнен из диодов, поэтому напряжение на его выходе не регулируется. Управляемый транзистор 27 работает в импульсном режиме, поддерживая за цикл переключений необходимый уровень входного тока и напряжения на входе инвертора, достаточных для формирования требуемого напряжения на выходе инвертора, подаваемого на обмотки статора двигателя. Запираемый вентиль 27 получает сигнал управления от релейного регулятора 29, на вход которого поступает с выхода узла сравнения 30 сигнал рассогласования действующих заданного и измеренного напряжений статора. Если сигнал рассогласования заданного и измеренного напряжений статора превышает зону нечувствительности релейного регулятора 29, подается сигнал на включение транзистора 27, а на выключение транзистора 27 - если сигнал рассогласования не превышает зону нечувствительности релейного регулятора 29. Сигнал задания амплитуды фазного напряжения статора U_1^* с выхода сумматора 19 поступает также на пропорциональный блок 31, формирующий сигнал задания действующего значения напряжения статора $U_{1Д}= U_1^*/\sqrt{2}$, с выхода блока 31 сигнал поступает на положительный вход узла сравнения 30. Сигнал измеренного действующего напряжения статора вырабатывается блоком 26, на вход которого поступают сигналы с датчиков напряжения 11.

Реализация силовой части АИТ с релейными регуляторами выходных фазных переменных на базе типовых IGBT-транзисторов, выпускаемыми в сборке с обратными диодами, требует введения в силовую часть ключа с односторонней проводимостью дополнительных отсекающих диодов, что позволяет получить запираемые ключевые элементы с односторонней проводимостью (рис. 1). Выполненные исследования показали, что для улучшения работы инвертора и снижения требуемой частоты коммутации его ключевых элементов, в силовую схему целесообразно ввести дополнительные отсекающие диоды, подключаемые последовательно к IGBT-транзисторам, и демпфирующие конденсаторы, подключаемые к точкам соединения IGBT- транзисторов и отсекающих диодов (рис. 1). Конденсаторная батарея 10 фильтрует высокочастотные составляющие токов на выходе преобразователя частоты.

При работе электропривода, включенного по схеме ЧКЭ, энергия скольжения двигателя передается из цепи ротора в звено постоянного тока и затем в цепь обмотки статора, при этом ток ротора равен току статора. Управляемый вентиль 27 работает в импульсном режиме, при его включенном состоянии напряжение питающего выпрямителя 1 складывается с выпрямленным напряжением, поступающим в звено постоянного тока через выпрямитель 26 от обмотки ротора. При выключенном состоянии управляемого вентиля 27 через обмотки двигателя и звено постоянного тока, а именно через обмотки реактора 3 и диод 28, продолжает протекать ток, создаваемый суммой эдс наведенной в обмотках статора, эдс в обмотках вращающегося ротора и эдс, индуктируемой обмотками реактора 3. При росте нагрузки на валу двигателя и в процессе пуска режиме скольжение увеличивается, в результате чего возрастает эдс ротора, и ротор подпитывает обмотку статора энергией скольжения.

В электроприводе в пусковом режиме осуществляется регулирование напряжения и частоты на выходе инвертора и рекуперация энергии скольжения через звено постоянного тока в цепь

обмотки статора. Установившееся значение скорости двигателя определяется величиной частоты на выходе АИТ.

Результаты исследований электропривода на имитационной модели

Динамические механические характеристики системы ЧКЭ с замкнутым контуром регулирования напряжения, полученные на имитационной компьютерной модели, представленные в относительных единицах, показаны на рис. 2.

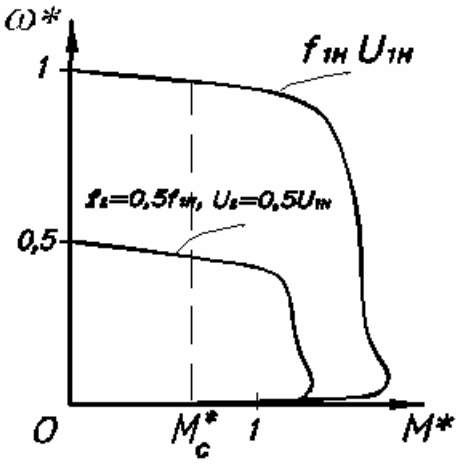


Рис. 2. Динамические механические характеристики частотно-каскадного электропривода с замкнутым контуром регулирования напряжения

Механические характеристики имеют вид близкий к «экскаваторным» с явно выраженными пусковым и рабочим участками. Если двигатель работает в области малых скольжений, величина эдс в обмотки ротора уравновешивается падением напряжения на полном сопротивлении обмотки ротора, в этом случае режим работы двигателя близок к режиму работы с закороченным ротором и жесткость рабочего участка механической характеристики близка к жесткости естественной характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором. При использовании линейного закона управления в системе каскадно-частотного электропривода U / f = const пусковой момент снижается по мере уменьшения частоты питающего обмотку статора напряжения, что характерно и для типовых систем частотного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем [5-8].

Выводы

1. В системе частотно-каскадного электропривода, выполненного на базе АИТ с релейным регулятором напряжения при скалярной системе управления при фиксированных значениях напряжения и частоты механические характеристики имеют вид близкий к «экскаваторным».
2. При не высоких требованиях к точности поддержания установившейся скорости, обеспечиваемой жесткостью естественной механической характеристики асинхронного двигателя, система частотно-каскадного электропривода может быть выполнена без датчика скорости.

Библиографический список

1. Шулаков Н.В., Медведев Е.Н. Асинхронный вентильный каскад с последовательным возбуждением двигателя // Известия вузов Электромеханика. 1988. №3. с.47-54.
2. Мещеряков В.Н., Федоров В.В. Асинхронно-вентельный каскад с инвертором в цепи статора и общим звеном постоянного тока // Электротехника.1998. -№6. - с.47-50.
3. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Построение замкнутой системы управления каскадно-частотным электроприводом// Известия вузов. Электромеханика.-1998.-№4.

4. Мещеряков В.Н., Копаев Ю.П., Ласточкин Д.В. Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления. Вести вузов Черноземья. 2016. №2. с.13-18.
5. Мещеряков В.Н., Карантаев В.Г. Применение беспоисковой адаптивной системы для управления ЭП с вентильным двигателем Электротехнические комплексы и системы. Воронеж, ВГТУ. 2006. №2. с.38-40.
6. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, №3(61), 2015. – 36-38.
7. Мещеряков В.Н., Байков Д.В. Математический анализ и моделирование преобразователя частоты матричного типа с непосредственным управлением по методу пространственно-векторной модуляции / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т.15. №1. с.21-33.
8. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения / Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. №1. с.24-28.

V. N. Meshcheryakov, D.V. Lastochkin

FREQUENCY-CASCADE ELECTRIC DRIVE BASED ON CURRENT INVERTER WITH RELAYED VOLTAGE REGULATOR

Lipetsk State University

The principles of constructing a frequency-cascade electric drive are considered, the functional scheme of the electric drive is presented, the operation of the electric drive and the dynamic mechanical characteristics are described.

Keywords: cascade, electric drive, frequency control, mathematical model, dynamic characteristics

УДК 62-52-83:656.56

В.Н.Мещеряков, Д.Г. Репин

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Липецкий государственный технический университет, АО «Гипрогазцентр»

Рассмотрены вопросы проектирования эффективных и достоверных систем оперативной диагностики электродвигателей электроприводных компрессорных станций. Представлены архитектура и методология искусственных нейронных сетей для получения прогнозных моделей электрических машин мегаваттного класса, а также результаты анализа ожидаемых состояний объектов магистрального транспорта газа.

*Ключевые слова:*электроприводные компрессорные станции, газоперекачивающие агрегаты, электродвигатели мегаваттного класса, искусственные нейронные сети, тесты селекционированных сетей.

Введение

Как показали данные статистики и нормативно-технической документации подавляющее большинство автоматизированных электроприводов относится к опасным производственным объектам [1-4], и поэтому разработка систем мониторинга их состояния относится к задачам первого приоритета при проектировании. Так, например, современные электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) как объекты диагностики представляют собой сложную и пространственно-распределенную техническую систему с разнородными элементами [5-8]. Статистика отказов ЭГПА показала[9-11], что наиболее тяжелым является выход из строя приводного электродвигателя с пробоем изоляции статора.

Для ЭГПА проведен комплексный анализ и определены 4 группы эксплуатационных факторов [12-16], влияющих на ресурс электродвигателей: нагрев и частичные разряды в изоляции статора, параметры питающего напряжения, электродинамические нагрузки.

Методология нейронных сетей технического состояния ЭГПА

В настоящее время существует хорошо апробированный в некоторых технических системах математический аппарат автономной настройки параметров диагностических алгоритмов на основе применения *искусственных нейронных сетей* (ИНС), объединенных в систему принятия решений (СПР) по идентификации различных дефектов [17-21].

Особенностью ИНС является то, что она обладает характеристиками, позволяющими решать проблемы классификации переменных объекта и их форм, а также самообучения алгоритмам прогнозирования, исходя из опыта отказов. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное/неисправное техническое состояние (ТС) ЭГПА и аппроксимировать свою идентификацию.

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:

- Подсистему приема и обработки информации, которая соответствует ВСМП работы СТД-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 (рис. 1).

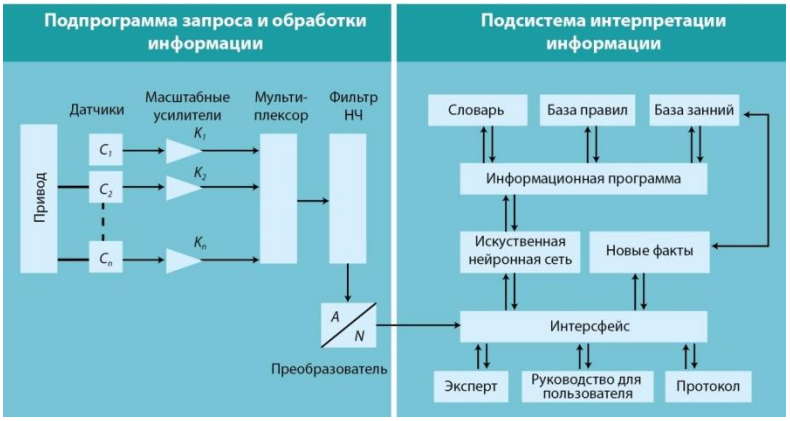


Рис. 1. Архитектура автоматизированной ИНС ПВСД ЭГПА

Порядок построения ИНС ПВСД

Применение при прогнозировании ТС ЭГПА большого числа контролируемых переменных ПВСД (напряжений, токов, частичных разрядов и температуры обмоток статора) позволяет увеличить достоверность мониторинга и сделать его эффективным. Для реализации модуля ИНС в начале определяют его размеры, т.е. число ее входов и выходов (у нас целесообразно эти значения выбрать равными 3 и 1).

Архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов мониторинга и перспектив прогнозирования ТС ПВСД с определением остаточного ресурса. Прежде, чем встраивать блок ИНС (рис. 1) в подсистему интерпретации информации в структуре ВСМП, необходимо изучить работу 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 4 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. Эти переменные доступны прямому измерению штатными средствами и непосредственному их представлению в нейронной базе знаний (НБЗ).

2. Конструкция НБЗ. Для создания на основе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояние статорной обмотки ПВСД ЭГПА, необходимо создать оптимальную конструкцию НБЗ, в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах в различных режимах ЭГПА-12,5. Поэтому все они группируются в 12 видов (включая исправные состояния), и по каждому состоянию оцениваются изменения трех выбранных переменных. В итоге НБЗ каждой переменной составила 3000 различных значений, характеризующих возможные режимы. Это значение вводится в табл. 1.

3. Создание блока ИНС. Определившиеся нейронные сети являются многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения. Для встраивания блока ИНС в ВСМП ПВСД предлагается исследовать 3 нейронные сети. После фазы их тестирования и сравнения между собой можно выбирать наиболее подходящую ИНС. При этом этапы конструирования и пригодности нейронных сетей разделяются на три фазы (рис. 2).

Таблица 1

Конструкция НБЗ на основе ИНС

Тип неисправности обмотки статора	Символ	Код ИНС
Перегрев в пазовой части расточки		000 000 000 001
Перегрев в лобовой части обмотки		000 000 000 010
Перегрев на выводах		000 000 000 100
Перегрев при запускеагрегата		000 000 001 000
Перенапряжения выхода из синхронизма		000 000 010 000
Перенапряженияпри дребезге контактов		000 000 100 000
Перенапряжения при ОЗЗ		000 001 000 000
Перенапряжения при МКЗ		000 010 000 000
Загрязнение масляно-графитовой смесью		000 100 000 000
Дефект изоляции в пазовой части		001 000 000 000
Дефект изоляции в лобовой части		010 000 000 000
Отсутствие признаков дефектов изоляции	QN	100 000 000 000

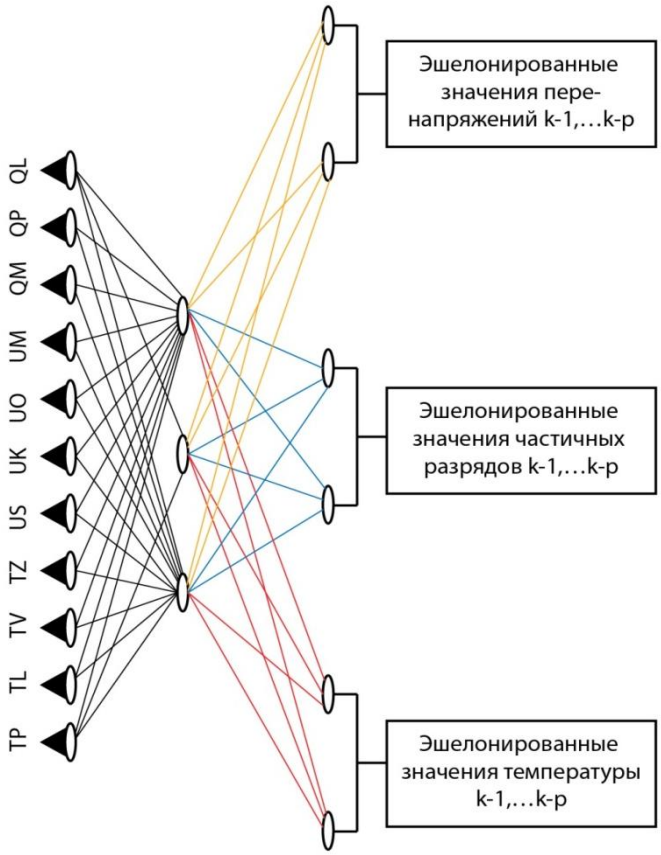


Рис. 2. Структура третьей ИНС

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.

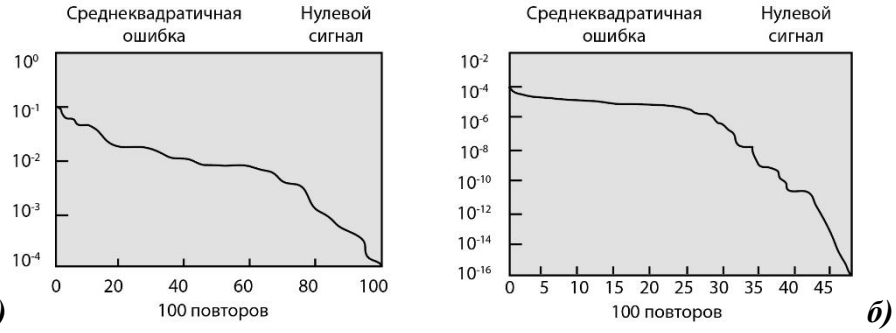
4. Определение тестов селекционированных сетей. При числе используемых входов блока ИНС, равном десять (на рис. 2 – p = 10) для каждой контролируемой переменной в табл. 2 приведены полученные результаты тестирования.

Таблица 2.

Результаты тестирования трех ИНС

№ ИНС	Число нейронов			
	Входной слой	Внутренний слой	Выходной слой	Среднеквадратичная ошибка
1	10	13	11	3,24221 e^{-15}
2	20	8	11	3,71314 e^{-16}
3	30	6	11	3,26580 e^{-17}

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 Be^{-16} (рис. 3).



а) *б)*

Рис. 3. Эволюция среднеквадратичной ошибки для ИНС

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 тестируют способности ИНС распознавать “скрытые” дефекты, ранее не рассматриваемые для ЭГПА, и оценки обобщения результатов.

Так ВСМП технического состояния ПВСД типа СТД-12500-2 предусматривал выбор из трех ИНС (рис. 2) наилучшей сети путем тестирования их для ранее приведенных дефектов (табл. 1). Он позволил идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов диагностирования, близких к нулю (табл. 2). При тестировании третьей сети для дефектов СТД-125000-2, которые были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправностей, связанных с перегревом в пазовой части расточки, представлены в табл. 3.

Здесь представлены выходы третьей сети при различных относительных нагрузках механической характеристики электродвигателя. Первая строчка табл. 3 соответствует дефекту, рассмотренному в данной тестовой фазе, т.е. при перегреве изоляции статорной обмотки СТД-12500-2 в ее средней части расточки. Для других режимов работы результаты тестирования входных переменных ИНС заметно не отличаются.

Таблица 3.

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

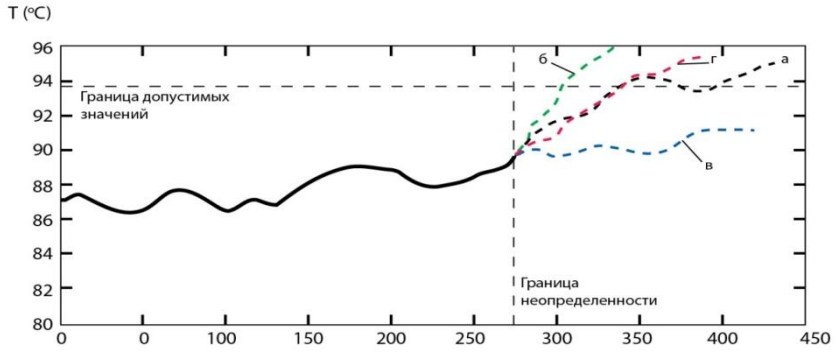


Рис. 4. Прогнозирование температуры статора электродвигателя СТД-12500-2

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трех ИНС, выявлено, что третья сеть нейронов (см. табл. 2 и табл. 3) 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.

Сопоставление результатов прогнозирования ТС ЭГПА

Рассмотрим тренд, описывающий суточные колебания температуры статора СТД ЭГПА (рис. 4, кривая *а*) и произведем анализ эффективности прогностических методов.

Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьем на две части, первая из которых будет являться основанием прогноза, а вторая – для проверки апостериорной точности прогноза. Применение методов на основе нечетких (ARMA-моделей, в частности, использовался метод Бокса-Дженкинса) возможно, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика рис. 4

видно, что методы на основе моделей Бокса-Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (кривая *в*). На основе полученных данных нельзя определить момент выхода температуры за допустимые пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23–58% ($\bar{\Lambda}$= 0.23 − 0.58).

Так же для проверки эффективности использовался вышеописанный метод на основе ИНС. Для этого использовалась сеть Ворда, на входы которой подавались предыдущие значения временного ряда. Моделирование показало, что построенная и обученная ИНС на границе неопределенности температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но дает пессимистичный прогноз (кривая *б*). Поэтому можно определить тенденции развития процесса, но найти момент выхода значений температуры за пределы допустимых значений нельзя. Значение средней относительной ошибки прогноза – 16–46% ($\bar{\Lambda}$= 0.16 − 0.46).

Для прогнозирования тренда температуры методом временных рядов (АДСС) использовалась предыстория температурного ряда размером *N=400* отсчетов. Полученный многошаговый прогноз (кривая *г*) позволяет выделить возрастающую тенденцию ряда и с высокой точностью определить момент выхода температуры за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 8–34% ($\bar{\Lambda}$= 0.08 − 0.34).

Аналогичные результаты получены при сопоставлении прогнозирования токов статора СТД (рис. 5) методами Бокса-Дженкинса (кривая *в*) с ошибкой 34–127%, ИНС Ворда (кривая *б*) с ошибкой 27–84% и метод временных рядов АДСС(кривая *г*) с ошибкой 11–58%.

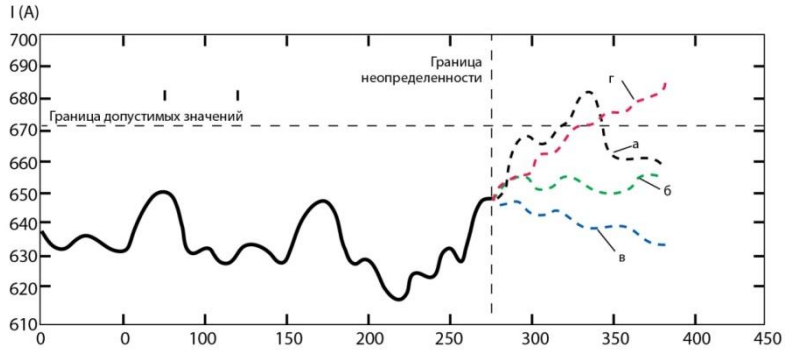


Рис. 5. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2

Выводы

Разработана система мониторинга двигателей электроприводов методом ИНС.Результаты исследований эффективности ВСМП ПВСД на основе методов нечёткой логики (Бокса-Дженкинса) и ИНС (сети Ворда) СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что они дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполирования и позволяет принимать адекватные и своевременные решения.

Библиографический список

1. MilovV.R., SuslovB.A., KryukovO.V. Intellectual management decision support in gasindustry // Automationand Remote Control. – 2011. – Т. 72. № 5. – С. 1095-1101.
2. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе АИН с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2017. – № 2 (48). – С. 12-22.
3. КрюковО.В., КияновН.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. – 2007. – 260с.
4. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В., Киянов Н.В.Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44-47.
5. Пужайло А.Ф. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, О.В. Крюков и др. // Н.Новгород: АО «Гипрогазцентр», 2010. – 560с.

6. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с IT-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6.– С. 36-39.
7. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
8. Милов В.Р., Суслов Б.А., Крюков О.В. Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой отрасли //Автоматизация в промышленности. – 2009. – №12. – С. 16-20.
9. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Электроэнергетическая установка на базе МДП с релейной системой возбуждения // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ). – 2017. – № 6. – С. 26-32.
10. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В. Экспериментальный стенд электромеханической части энергетической установки // Приводная техника. – 2012. – №4. – С. 2-11.
11. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов// Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С.43-46.
12. Крюков О. В.Регулирование производительности ЭГПА преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21-25.
13. Мещеряков В.Н., Евсеев А.М. Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с ТПН // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 2. – С. 67-73.
14. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокомпрессорных станций // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29-31.
15. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. – 2014. – № 6 (707). – С. 86-89.
16. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
17. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложение теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК – Липецк. – 2017. Т.2. – С.153-158.
18. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г.Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – №2. – С. 5-10.
19. Крюков О.В.Частотное регулирование производительности ЭГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39-43.
20. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментообразующими векторами // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – № 2. Т. 68. – С. 48-57.
21. Мещеряков В.Н., Карантаев В.Г. Применение беспоисковой адаптивной системы для управления ЭП с ВД // Электротехнические комплексы и системы. – 2006. – № 2. – С. 38-40.

V.N. Meshcheryakov, D.G. Repin

APPLICATION-ORIENTED ASPECTS OF THE THEORY OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTION OF THE STATUS AND TASKS OF CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVE

Lipetsk State University, Lipetsk, JSC Giprogazcenter

Questions of design of effective and trusted systems of operational diagnostics of electromotors of electric drive compressor stations are considered. The architecture and methodology of artificial neural networks for receiving expected models of electrical machines of a megawatt class and also analysis results of the expected statuses of objects of trunk transport of gas are provided.

Keywords: electric drive compressor stations, gas-distributing aggregates, electromotors of a megawatt class, artificial neural networks, tests of the selected networks

УДК 62-52-83:656.56

Д.Г. Репин, О.В. Крюков

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРОКЛАДКЕ ТРУБОПРОВОДОВ В ЗОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ

АО «Гипрогазцентр»

Рассмотрены перспективы поиска инновационных технических решений через анализ патентной документации как наиболее универсальный, достоверный и оперативный источник информации для решения сложных технологических задач. На примере анализа новых способов прокладки магистральных трубопроводов в зонах активных тектонических разломов рассмотрены достоверные технические и технологические решения для использования в проектной практике институтов нефтегазового направления.

*Ключевые слова:*Патентная информация, магистральные трубопроводы, конструкция траншеи, активные тектонические разломы, надежность.

Введение

В связи с ужесточением требований надежности и энергоэффективности объектов повышенной опасности [1-3] большое значение имеет стимулирование быстрого развития новой техники и технологий. Роль патентной документации, составляющейоснову информационной базы[4-6]для оценки научно-технического уровня, значительно возрастает [7-9].

В настоящее время только патентная информация представляет собой уникальный информационный источник истинных знаний с широким спектром документов, содержащих данные о результатах исследований, относящихся к изобретениям, полезным моделям и другим объектам промышленной собственности[10-12]. Кроме технических сведений патентная информация содержит сведения правового характераи единственным источником для оценки патентной чистоты объектов техники, обеспечивая:

- *наиболее достоверный источник информации*с экспертизой на государственном уровне и жесткими требованиями к заявочным документам;
- *наиболее оперативный источник информации*с раскрытием сущности патентуемых решений, поскольку первая публикация сведений о патенте на 3–5 лет опережает другие источники информации, включая монографии и книги;
- *наиболее подробный источник информации,* определяемый требованиями к описанию и практического внедрения изобретения или полезной модели с вариантами осуществления, практического эффекта, графическими иллюстрациями и чертежами;
- *наиболее структурированный и формализованный источник информации*с документами единообразной структуры для патентных описаний во всех странах мира;
- *наиболее передовая информация*с описанием истории технического прогресса в данной области и указанием, что является новым и каковы прогнозируемые тенденции развития техники и технологий в предметной области.

Рассмотрим все эти преимущества патентной документации на очень важной и актуальной в настоящее время задаче проектирования, строительства и эксплуатации магистральных газо- и нефтепроводов для обеспечения надежного транспорта углеводородов в различных регионах Российской Федерации и сопредельных стран мира. Это стало наиболее актуально в связи с увеличением активности строительства трубопроводов в Сибири, на Дальнем Востоке и Крымско-Кавказском регионах. К примеру, на рис. 1 показана трасса магистрального газопровода «Сахалин – Хабаровск – Владивосток», имеющая в своем составе 112 км участков с повышенной сейсмической опасностью и 56 тектонических разломов поверхности земли, из которых 15 – активных, проявляющихся с различной периодичностью в течении года, месяца или даже суток.

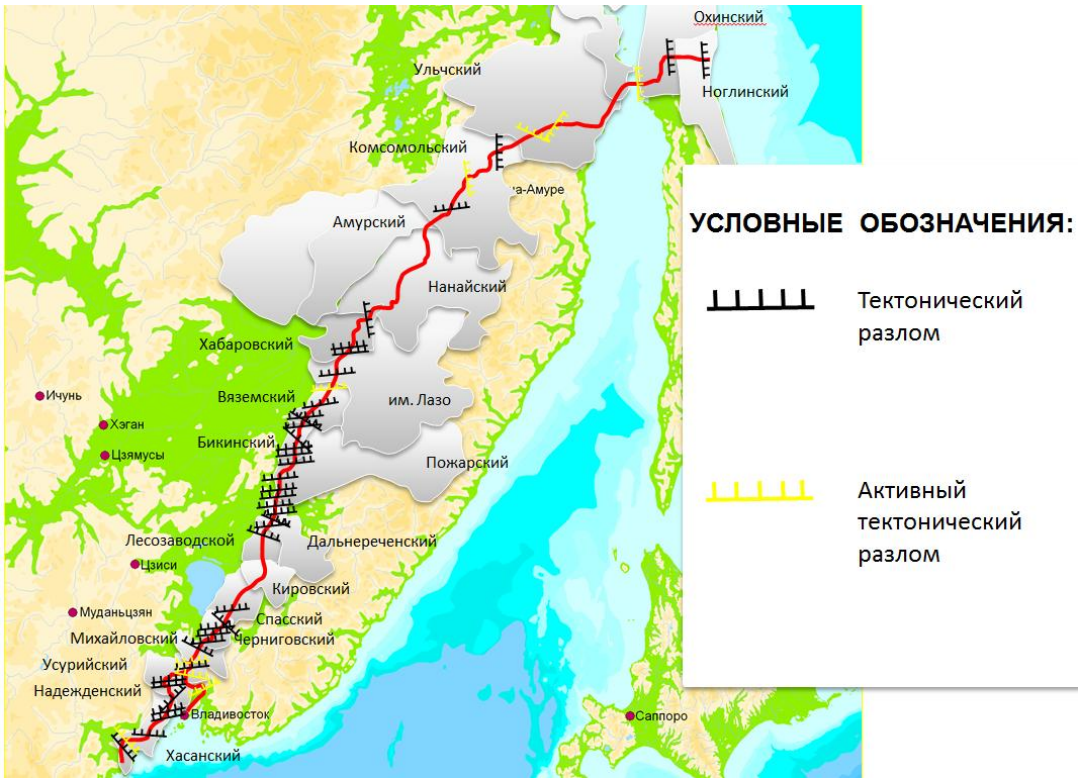


Рис. 1. Схема МТ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток» с АТР

Общие подходы кпрокладке трубопроводов в зонах с повышенной сейсмической опасностью

Магистральные трубопроводы (МТ) проходят в разных географических зонах, различающихся рельефом, климатическими особенностями, наличием естественных и искусственных препятствий[13-16] с неконтролируемыми воздействиями стохастического и детерминированного характера различной природы. Все это требует высокой надежности и эффективности в дальнесрочной перспективе таких ответственных сооружений, как МТ, обеспечения их многолетнюю и безаварийную эксплуатацию [17-20].

Известно, что трубопроводы, прокладываемые в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, следует проектировать с учетом дополнительных требований, предъявляемых нормативными документами по строительству сооружений в этих условиях.

Анализ инженерных решений, обеспечивающих строительство МТ в зонах с повышенной сейсмичностью, показал, что предлагаемые решения можно классифицировать:

- создание искусственных оснований под МТ, включая различные опорные элементы;
- создание в трубопроводе предварительных напряжений за счет монтажных изгибов МТ, которые при эксплуатационных перемещениях с грунтами обеспечивают придание трубопроводу новой эксплуатационной формы, что вызывает в нем эксплуатационные напряжения, противоположные по знаку предварительным монтажным, тем самым их компенсируя.

Примеры прокладки МТ в активных тектонических разломах (АТР)

Изобретение по патенту № 1492149 «Способ прокладки подземного трубопровода в просадочных грунтах в зонах с повышенной сейсмичностью» предлагает решить задачу повышения эксплуатационной надежности МТ в АТР путем создания дополнительных опорных площадок и укладки трубопровода в виде пространственной ступенчатой спирали, поглощающей сейсмические колебания. В боковых стенках траншеи 1 (рис. 2) создают продольные полки 3, 4, а МТ 5 укладывают змейкой. При этом горизонтальные звенья укладывают на полки 3, 4 и дно 2 траншеи 1

и соединяют горизонтальные звенья наклонными.Способ требует повышенного расхода металлических труб, сложен в реализации и трудоемок.

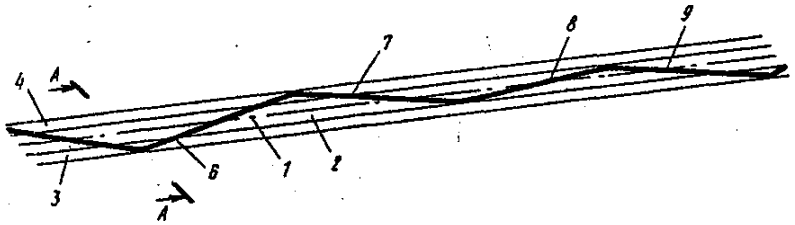


Рис. 2.Прокладка подземного трубопровода в просадочных грунтах

Патент № 2197667 предлагает на участках зон тектонических разломов в траншее устанавливать лотки по ломаной линии или по дуге следующим способом (рис. 3*а*): лотки (1) устанавливают в траншеи (3), отрытые по дуге или ломаной линии. Трубопровод (4), расположенный в лотке, повторяющий его очертания, подвешивают к ригелю (5) через подпружиненные подвески (6), что обеспечивает перемещение трубопровода в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Повышается надежность трубопровода.

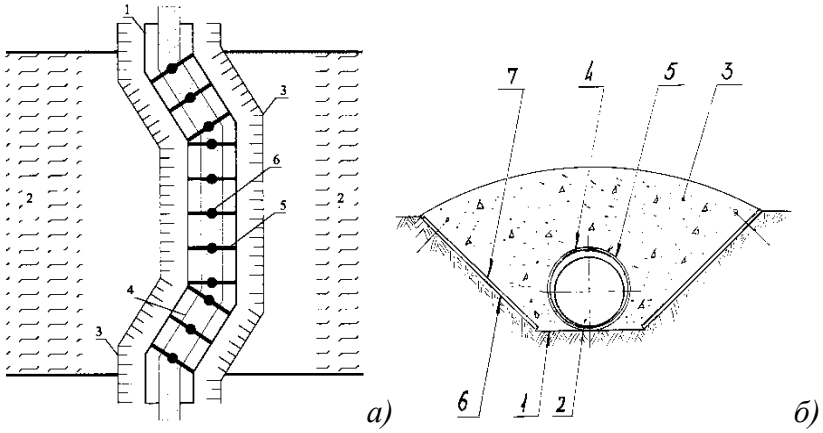


Рис. 3.Конструкции траншеи:
а) с установкой лотков по ломаной линии,
б) с нанесением обертки из скального листа

Патент № 2250409 «Способ прокладки подземного трубопровода в зонах с повышенной сейсмичностью» (рис. 3*б*) решает задачу создания способа подземного МТ, устраняющего защемление трубопровода без его значительных деформаций, разрушений изоляций и самого МТ в случае воздействия на него сейсмических волн. Указанная задача решается тем, что на МТ предварительно наносится обертки из «скального листа», для чего его предварительно заводят под трубопровод, сгибают с перекрытием продольных кромок «скального листа» и скрепляют их внахлест с образованием из него канала, при этом между наружной поверхностью МТ и внутренней поверхностью канала создают расчетной величины зазор.

Для уменьшения величины продольных сил, приложенных к МТ при сейсмическом воздействии на грунт в зоне прокладки трубопровода, в патенте № 2413894(рис. 4*а*) предлагается перед нанесением на МТ оберток из «скального листа» огибать трубопровод по спирали гибким элементом круглого поперечного сечения с постоянным шагом навивки. В качестве гибкого элемента используют стальной проволочный канат или синтетических волокон.

В способе сооружения подземного трубопровода на участках тектонических разломов по патенту № 2262631(рис. 4*б*) предлагается на участках тектонических разломов в траншею устанавливать лотки и укладывать в них на подвесках трубопровод и потом закрывают лотки плитами. Вначале на борта лотков укладывают опорные элементы с подвешенными на тросах ложементами из сегментов отрезков трубы, а трубопровод укладывают на ложементы.

Данный способ был усовершенствован в патенте№ 2363875, согласно которомув способе сооружения подземноготрубопровода на пересечении АТР между лотками 6 (рис. 4*в*) и плитами 7

по длине участка АТР устанавливают эластичные замкнутые оболочки 5 (выполненные из резинокорда в виде тороидов) с шагом, равным длине плиты. Тросы с ложементами 4 крепят на плитах. Затем подают сжатый воздух в оболочки 5 и заполняют их до требуемого размера и давления. Плиты приподнимаются на величину, равную высоте оболочки 5. Ниппели оболочек оставляют в виде, позволяющим производить контроль за давлением воздуха в них и для его подкачки по мере необходимости. При проектировании предусматривают, что зазоры со всех сторон между МТ должны быть не менее величины максимально возможного прогнозного смещения трубопровода при сейсмическом воздействии. После монтажа МТ оставшееся пространство заполняют легко деформируемым материалом 8 (керамзитом). Применение способа сооружения подземногоМТ на пересечении АТР обеспечивает повышение эффективности, снижение трудоемкости монтажа и обслуживания.

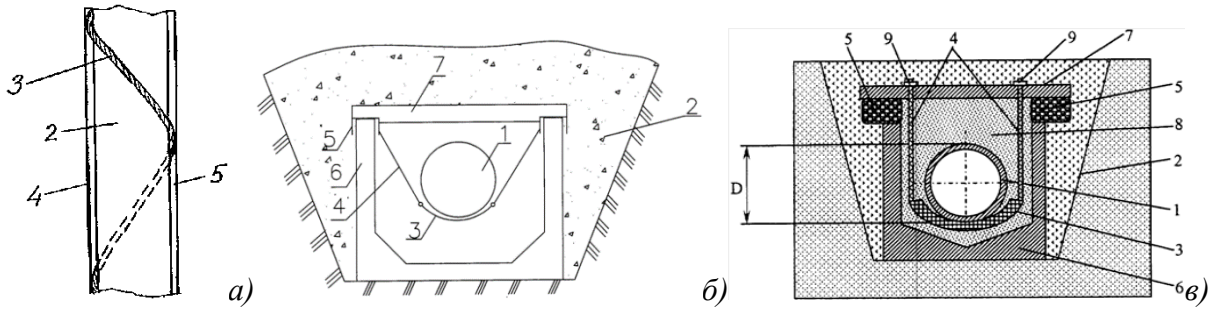


Рис. 4. Способы снижения продольных усилий в МТ:
а) с навивкой трубопровода канатами,
б) с установкой лотков и подвеской трубопровода,
в) с эластичными оболочками

Подобная задача решается и в способе сооружения подземногоМТ на пересечении АТР по патенту № 2363876(рис. 5*а*), где ложементы 3 закрепляют на пневматических рессорах 4, установленных на оси симметрии лотков по длине МТ с шагом, равным шагу установки стоек трубопровода, с возможностью подкачки в них сжатого воздуха через воздуховоды 9. После монтажа МТ оставшееся пространство заполняют легко деформируемым материалом 8. Высоту пневматических рессор в заполненном состоянии и зазоры между МТ и лотками принимают более величины максимально возможного смещения МТ.

Авторы патента №2264577 «Способ прокладки на участках тектонических разломов» предлагают в качестве лотков использовать половинки утилизированных автомобильных шин (рис. 5*б*). В траншею предварительно укладывают нижнюю часть лотка из одних половинок шин, затем в них укладывают МТ, сверху его накрывают другими половинками шин, скрепляют их между собой боковыми поверхностями в группы и засыпают траншею грунтом. Недостатками способа также являются низкая эффективность и высокая трудоемкость.

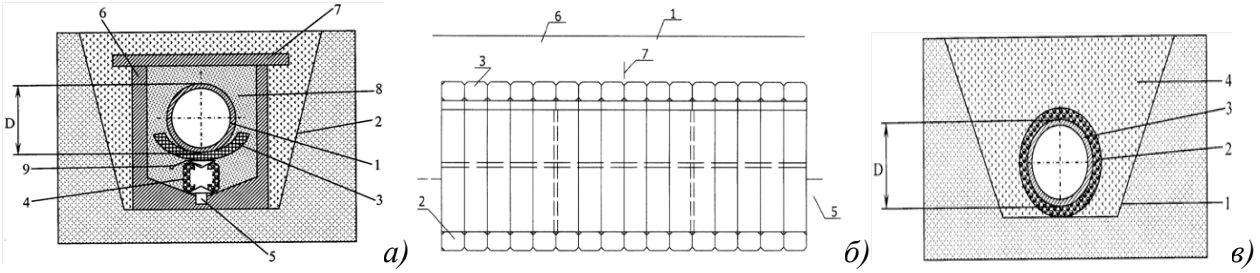
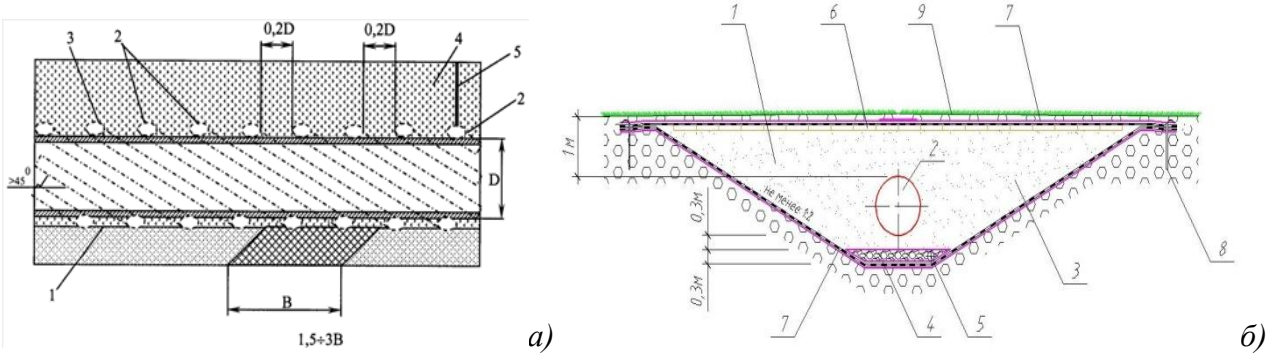


Рис. 5. Прокладка МТ в АТР:
а) с использованием пневматических рессор,
б) с применением автомобильных покрышек,
в) с использованием эластичных замкнутых оболочек

Задача повышения эффективности и снижения трудоемкости монтажа и обслуживания решается в патенте № 2363874 «Способ сооружения подземного трубопровода на пересечении тектонических разломов» (рис. 5*в*). В качестве лотков используют эластичные замкнутые оболочки. Оболочки заполнены воздухом, закреплены на внешней стороне трубопровода и соединены через ниппели с воздуховодом с возможностью подкачки и контроля давления воздуха в них. Внутренний диаметр оболочки принимают равным 0,95*D*, где *D* - внешний диаметр трубопровода, м. Ширину оболочки принимают равной 0,5÷0,8*D*. Расстояние между соседними оболочками принимают равным 1,5÷3*D*. Оболочки устанавливают на трубопроводе в зоне АТР с перекрытием этой зоны в 1,5÷3 раза по длине МТ. Применение способа сооружения подземногоМТ на пересечении АТР обеспечивает повышение эффективности, снижение трудоемкости монтажа и обслуживания.

В способе сооружения подземноготрубопровода на пересечении АТРпо патенту № 2365802 в качестве лотков используют цилиндрические замкнутые оболочки, заполненные сжатым воздухом(рис. 6*а*). Оболочки закреплены по винтовой линии на внешней стороне трубопровода по длине его сварного участка. Оболочки соединены друг с другом патрубками с возможностью подкачки и контроля давления воздуха в них через воздуховод. Диаметр оболочки принимают равным 0,15*D*, где *D* - внешний диаметр трубопровода, м. Расстояние между витками принимают равным 0,2*D*, м. Угол наклона витков к горизонтали принимают не менее 45°. Оболочки устанавливают на трубопроводе в зоне АТР с перекрытием этой зоны более чем в 4 раза по длине трубопровода. Применение данного способа сооружения подземноготрубопровода на пересечении АТР также обеспечивает повышение эффективности, снижение трудоемкости монтажа и обслуживания. Однако он очень дорог.

В этом смысле патент на полезную модель АО «Гипрогазцентр» № 124349 «Конструкция траншеи для прокладки трубопроводов на участках тектонических разломов» свободен от этих недостатков. Авторы данного патента предлагают для решения задачи повышения надежности и экономичности строительства и эксплуатации подземных трубопроводов, повышения долговечности безаварийной работы и для предотвращения разрывов трубопроводов в зонах АТР выполнять работы по укладки трубопровода следующим образом(рис. 6*б*). Отрывают траншею 1, укладывают водонепроницаемый гидроизолирующий материал толщиной 3 мм, термоскрепленный с геотекстилем (геомембрана) 7, по дну траншеи выполняют дренаж из гравийного материала, обернутого в геотекстиль с нахлестом 4 высотой 0,3 м, с укладкой дренажных перфорированных (неперфорированных) труб 5, далее производят засыпку траншеи песком на глубину 0,3 м, затем укладывают трубопровод 2 и засыпают его песком на глубину 0,3 м, сверху укладывают теплоизоляционные плиты 6, затем – водонепроницаемый гидроизолирующий материал 7, который фиксируется оцинкованными стальными анкерами 8 и засыпается минеральным грунтом 9. Данный патент внедрен в АТР при прокладках магистральных газопроводов «Сахалин – Хабаровск – Владивосток», «Сила Сибири», «Краснодар – Крым» и других.



а) *б)*

Рис. 6. Инновационные технические решения по конструкциям МТ в АТР:
а) с использованием цилиндрических замкнутых оболочек, заполненные сжатым воздухом; *б)* с укладкой водонепроницаемого гидроизолирующего материала,дренажных перфорированных труб

Заключение

Как видно из вышеприведенного анализа данная тема сегодня находится еще в начальной стадии разработки. Число патентов в данной области невелико и, следовательно, существует большой потенциал для будущих изобретений.

В заключении хочется еще раз обратить внимание на важность постоянного изучения патентной информации и привести цитату одного из руководителей японской патентной фирмы Tani&AbeЙошиказу Тани. Рассуждая о подъеме экономики Японии в послевоенные годы, он говорит следующее: «В 1950-е гг. мы говорили нашим инженерам: вместо статей о технологиях надо читать описания к патентам; в 60-е гг. – вместо технических статей надо писать заявки на патенты. Сейчас наши инженеры этим и занимаются».

Библиографический список

1. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
2. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
3. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности.– 2010. – № 10. – С. 50-53.
4. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2 томах // Ответственный за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – Том 2. – С. 404-409.
5. Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы автоматизации установок для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. – 2008. – №6. – С.6-10.
6. Серебряков А.В., Крюков О.В. О новых возможностях технологий SmartGrid // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 2. – С. 47-48.
7. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. 2010. № 5. – С. 2-11.
8. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с IT-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6.– С. 36-39.
9. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. – 2008. – № 9. – С. 45-51.
10. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.
11. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. 2007. – 260с.
12. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
13. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // ЕлектромеханічніЕенергозберігаючісистеми. – 2012.– №3 (19). – С. 209-212.
14. 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.
15. Крюков О.В.Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45-50.

16. KryukovO.V., SerebryakovA.V. Artificialneuralnetworksoftechnicalstatepredictionofgascompressorunitselectricmotors // ВестникЮжно-Уральскогогосударственногоуниверситета. Серия: Энергетика. – 2016. – № 1. Т. 16. – С. 66-74.
17. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
18. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
19. BabichevS.A., KryukovO.V., TitovV.G. Automatedsafetysystemforelectricdrivinggaspumpingunits // RussianElectricalEngineering. – 2010. Т. 81. – № 12. – P. 649-655.
20. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.

D.G. Repin, O.V. Kryukov

INNOVATIVE TECHNICAL SOLUTIONS ON THE SPACER OF PIPELINES IN ZONES OF TECTONIC BREAKS

JSC Giprogazcenter

Prospects of search of innovative technical solutions through the analysis of patent documentation as the most universal, authentic and operational information source for the decision of difficult technological tasks are considered. On the example of the analysis of new methods of a spacer of trunk pipelines in zones of the active tectonic breaks authentic technical and technology solutions for use in project practice of institutes of the oil and gas direction are considered.

*Keywords:*Patent information, trunk pipelines, construction of a trench, the active tectonic breaks, reliability.

УДК 62-52-83:656.56

С.Е.Степанов, О.В. Крюков

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА РЕЗЕРВУАРОВ И АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ КРОВЕЛЬ ЗДАНИЙ

АО «Гипрогазцентр»

Представленыпроекты разработки систем электрообогрева технологических объектов компрессорных станций магистральных газопроводов. Предложено современное оборудование для электрообогрева резервуаров нефтепродуктов различного объема, а также варианты построения систем антиобледенительной защиты кровель площадочных зданий и сооружений.

*Ключевые слова:*Магистральный газопровод, компрессорная станция, системы электрообогрева, резервуар нефтепродуктов, антиобледенительная защита кровель.

Введение

В последнее время на объектах ПАО «Газпром» находят все большее применение системы электрообогрева[1-4].Это касается в основном технологических объектов, в частности, систем обогрева резервуаров в зимний период для обеспечения оптимальных параметров горюче-смазочных материалов, участвующих в технологических операциях [5-8], а также системантиобледенительной защиты кровель зданий и сооружений компрессорных и насосных станций [9-11].

Электрообогрев резервуаров

Системы электрообогрева резервуаров в первую очередь предназначены для компенсации тепловых потерь в окружающую среду[12-14]. Кроме того, они служат для предотвращения смены фаз продукта, контроля требуемой вязкости, поддержания заданных температур[15-17].

Обогрев резервуаров, до недавнего времени, осуществлялся при помощи жидкого теплоносителя или при помощи ленточного греющего кабеля[18-20]. В первом случае необходимо было выполнять сложную систему змеевиков с запорно-спускной арматурой и другими сопутствующими элементами. При этом часто возникали значительные трудности с эксплуатацией и обслуживанием таких систем.

Во втором случае для размещения греющего кабеля на поверхности обогреваемой емкости необходимо предусмотреть надежную систему крепления, что является проблемой, особенно если монтаж происходит при низких температурах воздуха[21,22]. Обогрев резервуаров ленточным греющим кабелем имеет ряд существенных недостатков. В частности, греющий кабель не обеспечивает эффективную передачу тепла обогреваемой поверхности в силу малой удельной площади нагрева, что влечет за собой увеличение энергопотребления.

В настоящее время для обогрева резервуаров специалисты АО «Гипрогазцентр» применяют технические решения, предусматривающие использование греющих панелей, которые представляют собой высокопроизводительную гибкую площадь обогрева.

Преимущество панелей заключается в следующем (рис. 1):

- данные устройства распределяют тепло равномерно по всей поверхности и обеспечивают наиболее эффективную передачу тепла;
- обладают высокой удельной мощностью при малых размерах, что особенно актуально на открытых площадках;
- гибкая конструкция и низкий профиль панелей обеспечивают быстрый и надежный монтаж по сравнению с ленточным кабелем;
- стойкость к высоким температурам воздействия (до 232° С).

Рис. 1. Использование греющих панелей для резервуаров

Теплотехнический расчет производится при помощи специализированной расчетной программы, которая определяет тепловые потери резервуара в окружающую среду и рекомендует конкретную модель и количество нагревательных панелей. В программе задается ряд параметров, необходимых для расчета.

Сравнение проектных решений для аналогичных объектов показывает, что при использовании греющих панелей уменьшение энергопотребления установки обогрева достигает 10…12 %.

Экономический эффект от применения панелей также заключается в снижении денежных средств на монтаж системы обогрева, техническое обслуживание и дальнейшую эксплуатацию.

Антиобледенительная защита кровель

Зима в Россию всегда приходит «внезапно», а погодные аномалии становятся нормой, при которых объем осадков в зимний период резко возрастает. Эти факторы приводят к тому, что замерзшей воды в виде снега и льда на крышах становится все больше и обычные водосточные системы зданий в таких условиях уже не выполняют свои функции должным образом.

Конечно, можно использовать традиционный способ - механическую очистку кровли или инновационный – сбивать сосульки лазерным лучом. Однако, как показывает зарубежный опыт и практика, легче предотвратить обледенение кровли, чем бороться с его последствиями. Данному вопросу в ПАО «Газпром» уделяется много внимания, о чем свидетельствует письмо Департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа от 01.02.2011г. №03/0800/2-590.

Специалистами АО «Гипрогазцентр», при проектировании объектов ПАО «Газпром», было принято решение использовать кабельный обогрев кровли. Кабельный обогрев кровли – это антиобледенительная система, в основе которой лежит электрический греющий кабель. Ее назначение – обеспечить отвод талой воды по организованной водосточной системе здания. Данный вид обогрева предназначен для борьбы с последствиями перепадов температур и не является дополнительным источником теплоснабжения здания.

Появление наледи на кровлях опасно по следующим причинам:

- вероятность отрыва ледовых масс большого размера, как следствие, травматизм людей и повреждение оборудования, инженерных сетей, систем связи;

- увеличение нагрузки на элементы кровли, что может вызвать ее разрушение;
- задержка воды на элементах кровли в осенне-весенние периоды года служит причиной протечек и может привести к значительному материальному ущербу;
- необходимость механической очистки кровли, в результате чего снижается срок ее службы, кроме того возникает необходимость содержания специально обслуживающего персонала.

Антиобледенительные системы кровли работают в основном в весенне-осенний период, а также во время оттепелей. Данная система, как правило, состоит из следующих основных элементов: блока управления; датчиков температуры, влаги и осадков; нагревательных кабелей и элементов крепления системы.

Обогреву подвергаются определенные элементы кровли: водосточные трубы; водосточные желоба и лотки; ендовы; воронки; капельники крыши; карнизы и прочие элементы кровли (рис. 1.42).

Управление системой происходит автоматически. Блок управления получает информацию от датчиков осадков, датчиков влаги и датчика температуры, затем посылает сигнал в щит управления. Включение системы осуществляется при температуре воздуха плюс 5˚ С, а выключение при минус 15˚ С. При температуре ниже минус 15˚ С, как правило, осадков уже не бывает. Указанная температура включения обусловлена тем, что при включении антиобледенительной системы кровли в условиях отрицательных температур заставляет работать греющие кабели сразу на максимальной мощности, что снижает их ресурс. К тому же высокие стартовые пусковые токи приводят к выключению автоматов электропитания.

Рис. 2. Антиобледенительные системы кровли

В результате гибкого автоматического режима работы кабельная система обогрева кровли включается и отключается максимально рационально, потребляя при этом электроэнергию рационально.

Данный способ управления работой антиобледенительной системы кровли позволяет снизить энергозатраты и повысить энергоэффективность объекта.

Сопоставление вариантов антиобледенения кровли

Ниже приведены варианты укрупненных расчетов расходов на борьбу с обледенением кровли здания площадью 1700,0 м^2 при расчетной норме выпавших осадков в месяц – 25 см.

Вариант 1. Традиционный способ с использованием ручного труда (по материалам сайта www.hts-kazan.ru/uborka-snega).

Расчетные данные: количество занятых работников на уборку кровли- 2 чел., общее рабочее время - 8 час., сроки выполнения работ, раб/день - 8-10 дней, количество уборок в месяц - 1 раз.

Стоимость основных работ по очистке кровли от снега:

- аренда автовышки - 600,00 руб./час,
- механическая уборка кровли от снега - 21,00 руб./м^2,
- погрузка, вывоз и утилизация снега (КамАЗ-12м^3) - 1900,0 руб,
- аренда автовышки - 600руб х 8 часов х 10 дней = 48 000 руб,
- работы по уборке кровли от снега - 1700м^2 х21 руб =35700 руб,
- объем осадков на кровле за 1 месяц - 1700 м^2 х 0,25 м = 425м^3,
- количество КамАЗов для вывоза снега - 425 м^3 ÷ 12 м^3 = 35 шт.,
- стоимость погрузки и вывоза снега 35 х 1900 руб. = 66500 руб.

Итого по варианту 1: капитальные затраты – 0 руб, эксплуатационные затраты – 150200 руб. / месяц.

Вариант 2 Обустройство антиобледенительной системы кровли с саморегулирующимся греющим кабелем (расчет составлен на основании материалов сайта www.mzk-electro.ru).

Стоимость системы: саморегулирующиеся греющие кабели с САУ – 423300 руб., монтажные и ПНР – 156600 руб., энергозатраты системы – 25,2 кВт/час.

Итого по варианту 2: капитальные затраты – 579900 руб.

Эксплуатационные затраты зависят от тарифов на электроэнергию и погоды, исходя из условия энергозатрат 25,2 кВт/час.

Выводы

1.Несмотря на относительно высокие капитальные вложения, кабельная система обогрева кровли полностью оправдывает задачи, позволяя исключить травматизм и сохранить технику и оборудование.

2.Все проектные и реализованные решения позволяют с наименьшими затратами обеспечить надежное функционирование технологических процессов на объектах ПАО «Газпром» в любой сезон, повышают срок эксплуатации и живучесть оборудования.

3. Специалисты АО «Гипрогазцентр» постоянно осуществляют поиск новых технических решений, направленных на обеспечение технологических процессов в части теплового сопровождения коммуникаций с эффективным использованием энергоресурсов.

4.Саморегулирующие греющие кабели прокладываются внутри трубопроводов с определенными температурными параметрами. Энергозатраты связаны на прогревом транспортируемого продукта, исключая затраты на прогрев стенок трубопровода. Специалисты АО «Гипрогазцентр» выполняют работы с предприятием-изготовителем по подбору исполнения оболочки греющих кабелей.

Библиографический список

1. Запевалов Д.Н., Маянц Ю.А., Алфимов А.В. Актуальные вопросы совершенствования нормативной документации для объектов нефтегазового комплекса // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»». – 2016. – № 2. – С. 90-93.
2. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // ЕлектромеханічніІенергозберігаючісистеми. – 2012. – № 3 (19). – С. 209-212.
3. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В., Киянов Н.В.Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44-47.
4. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.

5. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления автономными энергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 45-49.
6. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // В сборнике: Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды IVВНПК // Под общей редакцией В.Ю. Островлянчика. – Новокузнецк, 2010. – С. 38-45.
7. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. 2007. – 260с.
8. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными энергетическими установками //Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
9. 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.
10. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию состояния ЭГПА // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35-38.
11. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. Т. 81. – № 12. – P. 649-655.
12. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 в 2 томах // Ответственный за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – Том 2. – С. 404-409.
13. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
14. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными ГПА//В сборнике: Труды МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации» АITA- 2011. – С. 329-350.
15. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности ЭГПА в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. Т. 1. – № 2. – С. 32-37.
16. KryukovO.V., SerebryakovA.V. Artificial neuralnetworksof technical stateprediction of gas compressor units electricmotors // ВестникЮжно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – № 1. Т. 16. – С. 66-74.
17. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XI Международного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. – С. 458-463.
18. Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы ГПА на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга // Дисс. д.т.н. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2015.
19. Крюков О.В. Синтез и анализ электроприводных агрегатов компрессорных станций при стохастических возмущениях // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 22-27.
20. Крюков О.В.Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45-50.
21. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники ГПА// Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2-11.
22. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных ЭГПА // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции АЭП-2014 в 2-х томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С.157-163.

S.E. Stepanov, O.V. Kryukov

TECHNICAL CAPABILITIES OF USE OF THE MODERN SYSTEMS OF THE ELECTRICAL HEATING OF TANKS AND THE DE-ICING PROTECTION OF ROOFS OF BUILDINGS

JSC Giprogazcenter

Projects of development of systems of an electrical heating of technological objects of compressor stations of the main gas pipelines are provided. The modern equipment for an electrical heating of tanks of oil products of different volume and also options of creation of systems of the de-icing protection of roofs of areal buildings and constructions is offered.

Keywords: Main gas pipeline, compressor station, systems of an electrical heating, tank of oil products, the de-icing protection of roofs.

УДК 62-52-83:656.56

С.Е.Степанов, О.В. Крюков

ОПЫТ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «Ямал-Европа»

АО «Гипрогазцентр»

Представленопыт проектирования и строительства магистрального газопровода «Ямал – Европа», включая системы комплексной автоматизации компрессорных станций и линейных участков.Показано, что использование интегрированных системавтоматического управления обеспечивает стабилизацию оптимальныххарактеристик газопровода на линейных участках и выходе с компрессорной станции независимо от детерминированных и стохастических климатических и технологическихвозмущений.

Ключевые слова: магистральный газопровод, компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, автоматизированная система управления, линейный участок.

Введение

Одной из важнейшей составляющей ТЭК при обеспечении энергетической безопасности РФ является газовая отрасль[1-3]. Преобразование сырьевых отраслей промышленности, занимающихся добычей, транспортировкой и переработкой углеводородного сырья является приоритетной задачей ПАО «Газпром»[4-7].

Примером реализации возможностей интеграции в трансъевропейскую газовую систему и успешного опыта международного сотрудничества является строительство магистрального газопровода (МГ) «Ямал-Европа» на участке Торжок-Белосток [8-11]. В связи с экспортным назначением и необходимостью обеспечения бесперебойного газоснабжения стран Центральной и Западной Европы, штатным для МГ является режим автономного функционирования с закрытыми перемычками.

Строящиеся компрессорные станции (КС) и линейные части (ЛЧ) МГ «Ямал-Европа» включались в пределах территориальных границ обслуживаемых участков МГ в состав действующих ЛЧ ОАО «Лентрансгаз» – КС «Торжокская», КС «Ржевская», КС «Холм-Жирковская», КС «Смоленская» и участки МГ ОАО «Белтрансгаз» – КС«Орша», КС «Крупки», КС «Минск», КС «Несвиж», КС «Слоним» (рис. 1).

а)

б)

Рис. 1. Строительство КС Несвиж (а) и общий вид КС Орша (б)

По своей концепции МГ «Ямал-Европа» является системой современного профиля с возможностью последовательного развития и расширения за счет использования телекоммуникационных средств и программных решений [12-16], соответствующих международным стандартам и нормам (рис. 2).

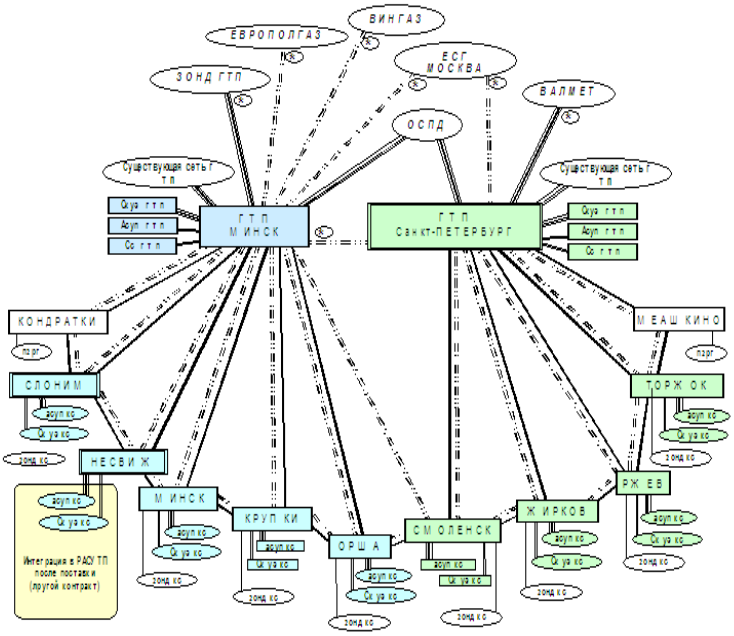


Рис. 2. Схема IT-взаимодействия объектов участка МГ Ямал-Европа

Однако имеются и свои специфические условия по решаемым задачам:

- газопровод является самой северной трассой с жесткими климатическими условиями. Поставленной целью является сокращение потребностей в постоянном присутствии эксплуатационного персонала и увеличение объемов автоматизации для контроля и управления технологическими объектами;
- эксплуатация МГ «Ямал-Европа» осуществляется путем координации между предприятиями разных стран (Россия, Белоруссия, Польша и Германии), что предполагает совершенствование САУ [17-20]и координацию между предприятиями, участвующими в едином управлении газопроводом (рис. 3).

а)

б)

Рис. 3. КС Несвиж: Общий вид (а) и АРМ сменного инженера (б)

Поставленные в проекте задачи по управлению решены по четырем направлениям:

1. Диспетчерское управление для организации супервизорного контроля и управления транспортом и распределением газа;
2. Производственно-хозяйственное управление для организации производственного процесса и хозяйственно-административной деятельности Предприятия (П);
3. Коммуникации предприятия для организации внутренних информационных обменов;
4. Коммуникации между подразделениями для обеспечения надежной передачи информации между газотранспортными предприятиями (ГТП) и уровнем Единой системы газоснабжения

(ЕСГ). Все решения по системам автоматизации принимались как базовые с целью дальнейшего широкого применения при построении систем оперативно-диспетчерского управления (СОДУ) объектов ЕСГ, включая решение отдельных задач производственно-хозяйственной деятельности П. Управление МГ «Ямал-Европа» удалось осуществить в строгом соответствии с концепцией АСДУ ЕСГ, с широким применением модульных решений, когда стало возможным параллельно со строительством технологической части МГ, реализовывать оперативное управление объектами на первой фазе строительства (проект «Ямал-1»). Результатом такого подхода стал успешный ввод в эксплуатацию САУ КС «Несвиж» и системы телемеханики для 209 км ЛЧ МГ до границы с Польшей на участке Несвижкого и Слонимского ЛПУ ОАО «Белтрансгаз».

Это (рис. 4)первая интегрированная АСУ ТП с комплексными техническими решениями, разработанная и внедренная в соответствии с «Общесистемными техническими требованиями Отраслевой системы оперативно-диспетчерского управления (ОСОДУ)».

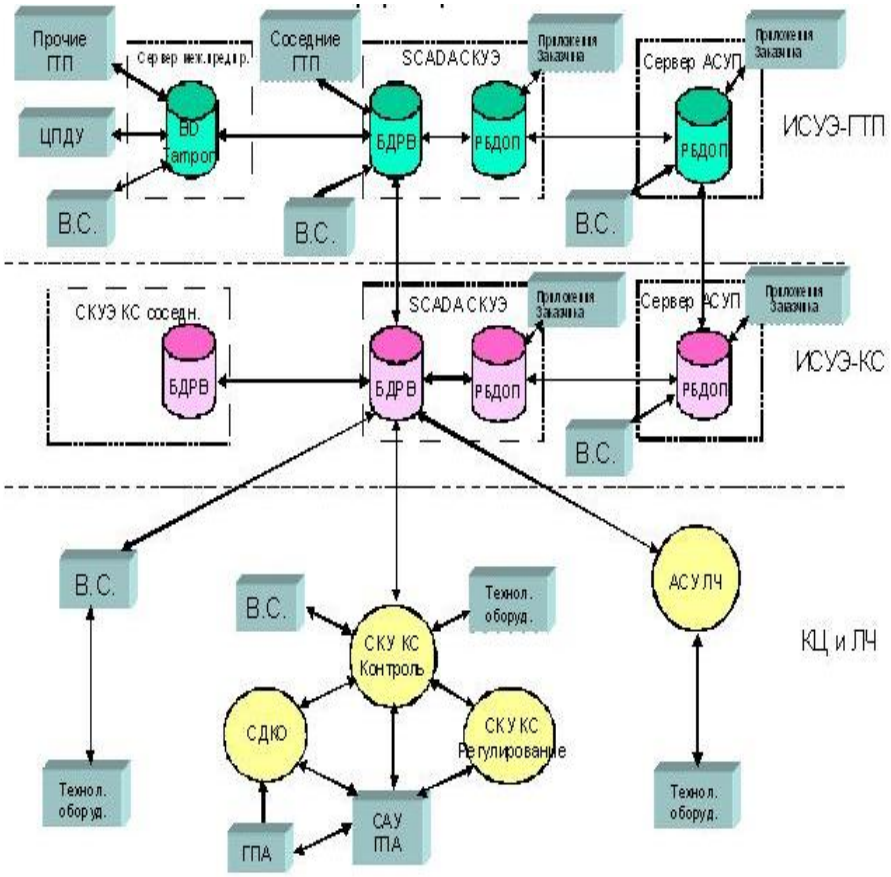


Рис. 4. Схема организации передачи данных

Принятые технические решения по проекту также соответствуют специальным техническим условиям для системы управления МГ:

1 уровень - ЦПДУ ЕСГ ПАО «Газпром», Москва. Уровень управления осуществляет координацию действий диспетчерских служб ГТП, эксплуатирующих МГ «Ямал-Европа», включая соответствующие диспетчерские службы Предприятий России, Белоруссии, Польши, Германии по объемам подачи транзитного газа согласно заключенным Контрактам. Предусматривается обмен оперативной и управляющей информацией и данными:
-по отраслевой сети передачи данных (ОСПД):

- между ЦПДУ ПАО «Газпром» и ЦДП предприятий;
- между ЦДП ГТП соседних регионов и государств;

-по региональной сети передачи данных (РСПД):

- между ЦДП предприятия и ДП КС подразделений;
- между соседними ДП КС предприятия;
- между граничными ДП КС предприятий соседних регионов и государств;
- между ЦДП предприятия и граничными ДП КС соседних регионов и государств;
- между ГИС и ЦДП соседних регионов и государств.

Одновременно отраслевая сеть передачи данных обеспечивает информационное взаимодействие по всем видам производственной деятельности Предприятий.

2 уровень - ЦДП Предприятия (рис. 5). Центральная ПДС осуществляет координацию диспетчерских служб подразделений и контроль режимов транспорта газа в границах ГТП: контроль состояния оборудования КЦ и КС;баланс газа по предприятию;оптимизация и контроль режима газопровода;моделирование и прогнозирование динамики режимов МГ;управление объектами ЛЧ МГ; дистанционное управление ГПА и кранами, включая охранные и краны на перемычках;планирование регламентных работ, ремонтов и др.

Региональные автоматизированные системы управления технологическими процессами (РАСУ ТП) транспортировки газа предназначены для решения задач по управлению производственной деятельностью ОАО «Лентрансгаз» и ОАО «Белтрансгаз».

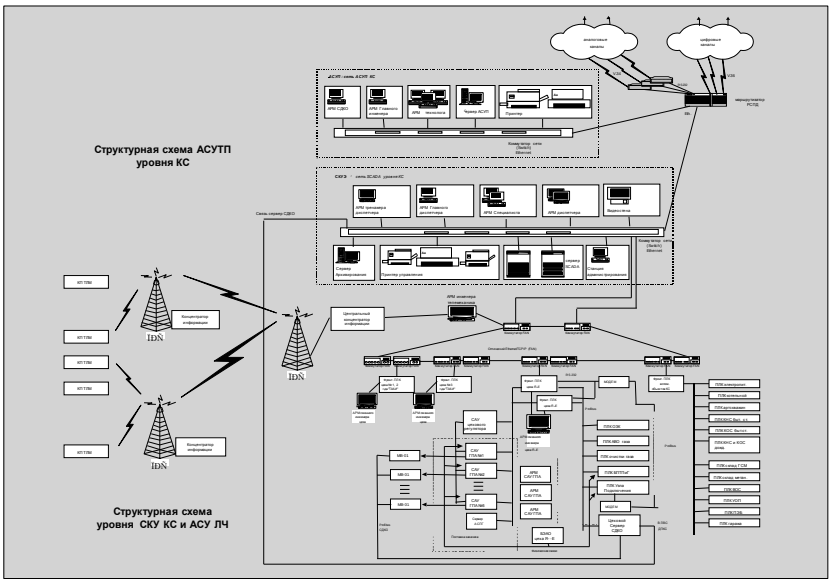


Рис. 5. Структурная схема построения АСУ ТП уровня ГТП

3 уровень - ДП КС, ДС УМГ (рис. 6). Диспетчерская служба УМГ осуществляет контроль и управление технологическими объектами КС и ЛЧ МГ в пределах границ ответственности:оптимизация и контроль режима работы КС;контроль режима и технического состояния ЛЧ;дистанционное управление ГПА и кранами, включая охранные краны и краны на перемычках;автоматизированное определение (расчет) заданных режимов и степени защиты оборудования по критериям (помпаж);управление объектами линейной части МГ;управление, сбор и обмен информацией о работе основного и вспомогательного оборудования.

На уровне диспетчерских пунктов КС и ЛПУ (УМГ) АСУ ТП Предприятия обеспечивает интеграцию информации и функций управления по всем объектам технологического коридора МГ.

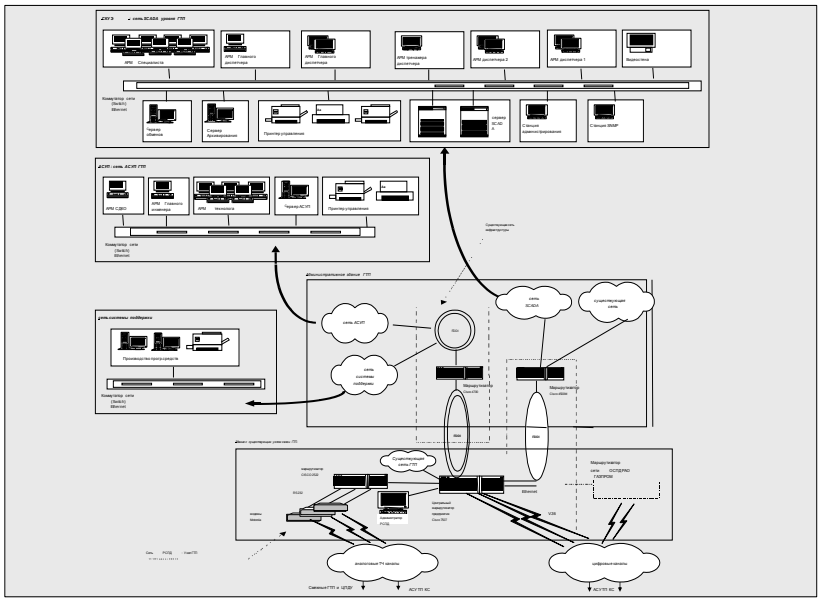


Рис. 6. Структурная схема построения АСУ ТП КС.

4 уровень - КЦ. Оперативные и эксплуатационные службы КС и ЛЧ МГ. Реализовываются функции: автоматическая стабилизация режима работы КЦ, включая распределение нагрузки между работающими ГПА; контроль работы всех цеховых и локальных САУ и защиты;дистанционное и автоматическое управление основным и вспомогательным оборудованием КЦ;поагрегатный и цеховой учет расхода технологического и топливного газа.

5 уровень - САУ. Локальный уровень технологического оборудования, САУ объектов и КП СЛТМ.

Каждому из указанных уровней управления соответствует своя регламентированная сфера ответственности в части выполняемых задач, объемов получаемой и обрабатываемой информации с уровня технологического оборудования, объема проводимых мероприятий и решений по управлению объектами**.**

Необходимо отметить основные этапы реализации проекта:

Этап 1. Ввод в эксплуатацию: функционирование в автономном режиме, обеспечение управления существующим МГ и новым участком газопровода КС «Несвиж» – госграница Польши. Обеспечение устойчивой работы при каскадном функционирование цехов КС «Несвиж». Управление распространяется на ЛЧ КС «Слоним»;

Этап 2. Подключение к системе централизованного управления предприятием: функционирование при оперативном взаимодействии с верхним уровнем управления;

Этап 3. Ввод в эксплуатацию систем управления на смежных КС: функционирование в оперативном взаимодействии с соседними системами. Отказ от управления линейной частью Слонимского УМГ, которое становится автономным;

Этап 4. Ввод в эксплуатацию газопровода в его окончательной конфигурации: отказ от каскадного функционирования цехов КС «Несвиж», функционирование в автономном режиме газопроводов Ямал–Европа и Торжок–Минск–Ивацевичи. Комплексное управление объектами в полном объеме, комплексная автоматизация в рамках решений проекта.

Вывод

Анализ эксплуатации показывает, что с первого этапа проектирования система АСУ ТП МГ «Ямал-Европа» была продумана с учетом всех аспектов эксплуатации наряду с принципами управления производственно-хозяйственной и экономической деятельности и взаимодействия между различными видами деятельности производственного предприятия.

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. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложение теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК – Липецк.– 2017. Т.2. – С.153-158.
3. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т. 81. № 12. – P. 649-655.
4. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // В книге: Интеллектуальные системы. Труды XIМеждународного симпозиума. Под редакцией К. А. Пупкова. – М.: РУДН, 2014. С. 458-463.
5. Хлынин А.С., Крюков О.В. Реализация факторов энергоэффективности электроприводных газоперекачивающих агрегатов в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. № 2. С. 32-37.
6. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментообразующими векторами // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – №2. Т.68. – С. 48-57.
7. Мещеряков В.Н., Карантаев В.Г. Применение беспоисковой адаптивной системы для управления ЭП с ВД // Электротехнические комплексы и системы. – 2006. – №2. – С. 38-40.
8. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электро-механическими системами магистрального транспорта газа // В сборнике: Труды VIII Международной конференции АЭП-2014 // Отв. И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 404-409.
9. 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.
10. Крюков О.В., Репин Д.Г. Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2014. – № 712. – С. 84-87.
11. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. Т. 83. – С. 516-520.
12. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // В сборнике: Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15 / М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. – 2015.– С. 368-386.
13. КрюковО.В., КияновН.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями // Н.Новгород: НГТУ. – 2007. – 260с.
14. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе АИН с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2017. – №2 (48). – С. 12-22.
15. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // ВестникЮУрГУ. Энергетика. – 2016. № 1. Т. 16. – С. 66-74.
16. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Электроэнергетическая установка на базе МДП с релейной системой возбуждения // Известия СПбГЭТУ(ЛЭТИ). – 2017. – № 6. – С. 26-32.
17. Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов// Приводная техника. 2010. № 5. – С. 2-11.
18. Крюков О.В.Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45-50.
19. Мещеряков В.Н., Евсеев А.М. Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с ТПН // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – №2. – С. 67-73.
20. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н., Мещерякова О.В. Вентильный электропривод для робототехнических систем с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // В сборнике: Материалы 10-ой Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления. Т1. – Дивноморское: ИПУ РАН.– 2017. – С. 167-171.

S.E. Stepanov, O.V. Kryukov

EXPERIENCE OF COMPLEX AUTOMATION OF OBJECTS OF MAIN GAS PIPELINE “Yamal-Europe”

JSC Giprogazcenter

Experience of design and construction of the Yamal — Europe main gas pipeline, including the systems of complex automation of compressor stations and the line sections is provided. It is shown that use of the integrated systems of automatic control provides stabilizing of optimum characteristics of a gas conduit on the line sections and an output from compressor station irrespective of the determined and stochastic climatic and technological perturbations.

Keywords: main gas pipeline, compressor station, gas-distributing aggregate, automated control system, the line section.

УДК 681.3

И.В. Белянин, М.А. Малаканова

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОТОКОВОГО IPTV ВЕЩАНИЯ В НГТУ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена вопросам применения видеоконференции в учебном процессе современного вуза, рассматривающего электронное обучение как новую образовательную модель. Выделены и охарактеризованы два аспекта проблемы: педагогический и организационно-управленческий.

Ключевые слова: видеоконференция, интернет-конференция, информационно-коммуникационные технологии, онлайн-обучение, Web-конференция.

Сегодняшний день характеризуется развитием информационных технологий и широким доступом к информации любого рода. Данный процесс изменяет способ потребления информации современным человеком и, соответственно, само мышление индивида.

В научном пространстве активно развивается идея о распространении так называемого клипового (фрагментарного, мозаичного) мышления, которое смещает классическое понятийное. Такое разделение, является условным и характеризует двойственный процесс познавательной деятельности (работа с информацией): интуитивный и логический.

Ряд исследователей прорабатывает теоретико-методологический концепт данной проблемы, например, Ф. А. Гиренок, К. Г. Фрумкин, А. Б. Фельдман, А. Л. Зорин, С. В. Докука и пр. Данная проблема присуща не только XXI веку. Родоначальниками клипового мышления стало появление газет и телеграфа, в которых информация подавалась порционно, отрывками. Но все-таки основным катализатором данного феномена принято считать распространение информационных технологий и, в частности, сети Интернет. Согласно М. Маклюэну, развитие электронных средств коммуникации возвращает человеческое мышление к дотекстовой эпохе, и линейная последовательность знаков перестаёт быть базой культуры. Частично это может быть подтверждено при анализе наиболее популярных в Интернете блогов, сервисов.

Интерес все больше смещается на страницы, содержащие большое количество визуально-ориентированного материала (Youtube, Instagram, Pinterest) или состоящие из ограниченного по количеству знаков текста (Twitter). Данные тенденции характерны и для сообществ, организуемых в социальных сетях (Вконтакте, Facebook). Поэтому клиповое мышление является закономерным этапом развития цифрового сообщества со всеми вытекающими последствиями, и вовсе не обязательно, что отрицательными.

Согласно потребностям современного студента, происходит перестройка образовательной системы в целом и модификация существующих элементов образовательного процесса в частности, что формирует новую философию образования. Работа в данном направлении активно ведется, особенно в части интеграции образования в цифровое пространство: разрабатываются соответствующие образовательные технологии, совершенствуются средства обучения. [1]

Сегодня имеется большое число ставших уже привычными сетевых средств, основанных на гипертекстовом протоколе: веб-форумы, чаты, информационные и образовательные порталы, сетевые оболочки для курсов ДО, виртуальные университеты. В современном высшем учебном заведении, рассматривающем электронное обучение как новую парадигму образования, применяются различные формы обучения. Особенно, видны достоинства телекоммуникационной основы для дистанционного обучения.

Современное дистанционное электронное обучение широко использует способы передачи информации основанные на видеопотоках.

Это могут быть видеофильмы, записи лекций, скринкасты (запись с экрана компьютера) слайд-шоу, мультипликация и т.д.

Для формирования видеопотоков могут быть использованы различные программы и сервисы, но ни один из этих способов не позволяет организовывать обратную связь между

преподавателем и слушателем. За счет этого снижается качество обучения, поскольку поток информации идет в одном направлении и неизвестно, насколько он хорошо усвоен.

Мир телекоммуникаций и, в частности, систем видеокоммуникаций за последние годы претерпел существенные изменения. Причиной этого является в целом не развитие видео как такового, а расширение дешевых каналов Интернета, появление дешевых USB-видеокамер и увеличение процессорной мощности современных компьютеров. Коммутируемая видеосвязь была разработана и впервые представлена широкой публике компанией AT&T (США) 50 лет назад в апреле 1964 г. С одной стороны, мы знакомы с видеосистемами практически с рождения, а с другой — мы стали пользоваться видео для связи друг с другом только в последние несколько лет. Одной из таких систем является телевидение. Это одностороннее видео в режиме широковещания,[2] однако в нем тоже нет инструментов обратной связи, хотя в последнее время его стараются активно внедрять. Например: мы часто видим телепередачи, где в титрах, как в чате слушатели задают вопросы, высказывают мнение.

На уровне персональных компьютеров последние 5 лет активно развивается потоковое видеовещание. Удивительно, но именно этот передовой способ, в первую очередь стали использовать дети, играя в компьютерные игры.

В настоящее время такое видеовещание получило название стриминг, и он может быть эффективно использован в учебном процессе.

Для этого не требуется крупных финансовых затрат на покупку дорогостоящего оборудования и программного обеспечения. Можно начинать с программ, распространяемых под лицензией GPL (GNU General Public License (Универсальная общественная лицензия GNU, Универсальная общедоступная лицензия GNU или Открытое лицензионное соглашение GNU) — лицензия на свободное программное обеспечение). Например, при использовании OBS (Open Broadcaster Software) в качестве видеокамеры используется вебкамера со встроенным микрофоном.

Таким образом, лекция в режиме видеоконференции позволяет организовать «живое» общение преподавателя с удалёнными студентами (слушателями), которые имеют возможность получить презентацию, вопрос и тут же получить ответ, действие программы с рабочего стола ПК, прокручивать заранее записанные фильмы и все действия преподавателя в режиме реального времени с выводом информации на общедоступные сервисы, такие как: Youtube, Vimeo, Facebook, Vk и т.д.

Все это стирает границу между формами обучения и преодолевает расстояния между преподавателями и обучаемыми. В целях рационализации процесса проведения лекции в режиме видеоконференции целесообразно использовать (наряду с Web-платформой для проведения видеоконференции) виртуальную среду обучения (систему дистанционного обучения), с которой работает вуз. [3]

В ЦДОТ НГТУ им Р.Е.Алексеева создана видеостудия с профессиональным оборудованием для формирования видео- и аудиопотоков и специализированным программным обеспечением, позволяющим организовывать видеотрансляции лекций, практических занятий, семинаров и т.п. Формирование видеопотока для прямых эфиров производится на основе программного комплекса vMix.

Это коммерческий программный продукт, широко используемый в IPTV, позволяющий создать прямой эфир с элементами обратной связи в социальных сетях. Максимальное количество источников, куда направляются видеопотоки - равно трём. Большее количество источников в настоящий момент нецелесообразно по причине достаточно узких каналов связи НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Так для передачи в формате HD 720p для безошибочной передачи требуется канал 1500 Мбит/сек, для HD 1080p 3000 Мбит/сек и 4K 9000 Мбит/сек, соответственно.

Использование профессиональных футажей с заставками и титрами позволяет приблизить качество вещания соответствующее телевизионному (рис. 2).

Использование специальных модулей даёт возможность выводить в прямой эфир отзывы пользователей в чате социальных сетей как в автоматическом, так и модерируемом режимах (рис. 3, рис. 4).

Кроме того, в ПО vMix предусмотрена возможность микширования видеопотоков сразу от нескольких камер с устройствами захвата. Таким образом, любая передача в прямом эфире превращается в сервис намного эффективнее традиционных вебинаров. Опыт работы ЦДОТ показывает, что данный вид деятельности является инновационным по сравнению с другими ВУЗами Российской Федерации.

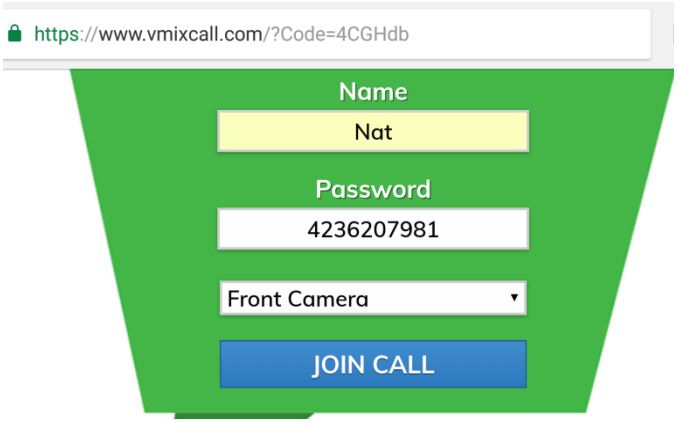


Рис.1
Интерфейс пользователя для входа просмотра трансляции

Рис. 2
Заставка прямого эфира

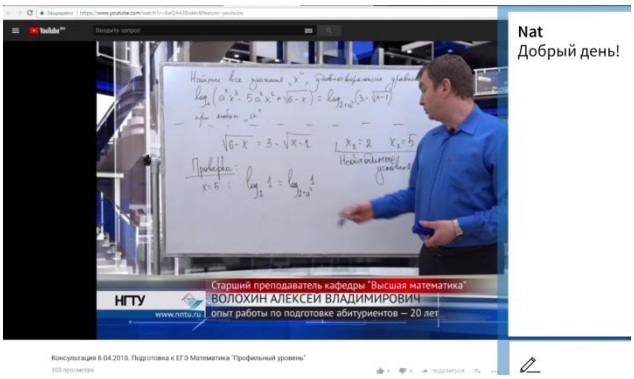


Рис. 3
Прямой эфир лекции

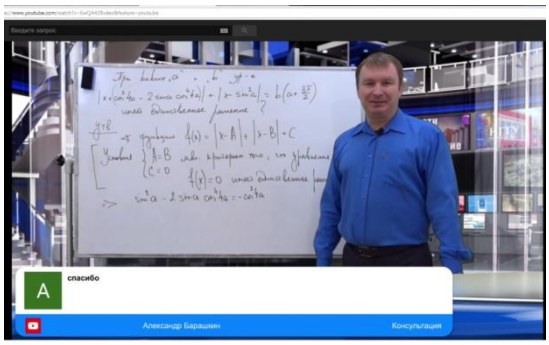


Рис. 4
Прямой эфир с элементами обратной связи

Выводы

Проведение учебных мероприятий в режиме видеоконференции позволяет вузам идти в ногу со временем, способствует повышению эффективности учебного процесса за счет интерактивности, визуализации, персонификации и многочисленных других перспективных возможностей. Поскольку результаты проведенного мирового опроса убедительно показывают, что лидерами среди коммуникационных технологий для Интернет-обучения на следующее пятилетие являются форумы обсуждений (81% экспертов высказались в пользу данной технологии) и IP-видеоконференции (76%), предмет нашего исследования является актуальным и перспективным.[4]

Библиографический список:

1. Соловьева В. А. Принципы построения электронного образовательного в соответствии с когнитивными особенностями / В. А. Соловьева // Педагогика. Вопросы теории и практики./СНИГУ-Саратов- 2016-№ 3 (3)

2. Сенашенко Д.В., Сенашенко М.А. О применении систем видеоконференцсвязи в высшей школе для дистанционного обучения/ Д.В. Сенашенко, М.А. Сенашенко// Вестник РУДН -серия Информатизация образования, / РУДН-Москва-2015- № 4

3. Фомина А.С. Подготовка и проведение учебных иероприятий в режиме видеоконференций в высшем учебном заведении/ А.С.Фомина // Электронный журнал «Вестник МГОУ» / www.evestnik-mgou.ru. –(г. Москва) -2013. – № 4

4. Баскаков Ю.А., Соболева О.М. Использование видеоконференцсвязи в учебном / Ю.А. Баскаков, О.М. Соболева// Казанский педагогический журнал/Казань- 2010-№1.

I.V. Belyanin, M.A. Malakanova

ORGANIZATION OF STREAMING IPTV BROADCASTING IN NSTU. N.A. R.E. ALEKSEEV

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

The work is devoted to the use of videoconferencing in the educational process of a modern university, which considers e-learning as a new educational model. Two aspects of the problem have been singled out and characterized: pedagogical and organizational and managerial.

Key words: videoconference, Internet conference, information and communication technologies, online training, Web-conference.

УДК 004.91

В.В. Банкрутенко, Д. О. Любимцев, Н.В. Старостин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА ЕСПД В CASE-СРЕДСТВАХ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АРМ-ЭКСПЕРТА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Приведена история возникновения курса «Сертификация программных продуктов», обоснование его важности в учебном процессе, а также описание средств обучения. Показаны достоинства и недостатки старой версии системы АРМ Эксперта 1995 года. Приведено описание новой версии АРМ Эксперта 2018 года, а также основной сценарий работы.

Ключевые слова: сертификация; АРМ; АРМ Эксперта; программный продукт; SQL Server; Visual Studio; учебный процесс.

В 1992 году в России начали формироваться первые органы сертификации и испытательные лаборатории программных продуктов. Ключевую роль в процессах сертификации занимали специалисты – испытатели, которые осуществляли оценку качества в соответствии с нормативными документами. Для автоматизации их профессиональной деятельности в 1995 году был создан продукт АРМ Эксперта силами ОКБМ им. И.И. Африкантова и кафедры ИАНИ ННГУ им. Лобачевского [1]. С этого момента АРМ Эксперта явился фактически стандартным средством, который использовался на постоянной основе при проведении испытаний программных продуктов в испытательном Центре программных средств, аккредитованном в Госстандарте.

Необходимость в подготовке профессиональных кадров в области оценки качества информационных продуктов явилось основанием о включении спецкурса «Сертификация программных продуктов» [2] в образовательную программу по специальности Информационные системы, которая в дальнейшем преобразовалась в специальность, а затем направление Прикладная информатика. В рамках спецкурса рассматривались нормативные документы на разработку программ [3,4,5], использовался АРМ Эксперта для получения практических навыков по оценке качества программных продуктов.

С введением современных образовательных стандартов изменились требования к образовательным программам, методикам и средствам, используемым в подготовке высококвалифицированных кадров. С этой точки зрения, а также с точки зрения развития программной индустрии АРМ Эксперта перестал удовлетворять требованиям, предъявляемым к подобным продуктам в сфере образования. Всё это привело к необходимости создания аналога АРМ Эксперта, адаптированного к современным требованиям и реалиям в процессах оценки программных продуктов (ПП) и обучения профессиональных кадров.

Создаваемый программный продукт АРМ Эксперта 2018 фактически является преемником с точки зрения основного функционала, связанного с проведением оценки качества ПП, так как нормативная база, стандарты и процессы в этой сфере не претерпели существенной трансформации за эти годы. С другой стороны, АРМ Эксперта 2018 должен иметь новый функционал, обеспечивающий его интеграцию и успешное эксплуатирование в образовательных процессах, а именно:

- обеспечивать групповую и индивидуальную работу с ПП;
- содержать типовые модели оценки качества ПП, соответствующие нормативным документам;
- включать набор инструментов по формированию специализированной модели оценки качества ПП;
- иметь систему дистанционной оценки групп студентов, по оценке качества.

Для демонстрации работы АРМ Эксперта 2018, рассмотрим основной сценарий работы системы. В начале нового семестра, преподаватель, получив список группы, регистрирует группу в системе (см. рис. 1 окно «Учебные группы»). Для этого он входит в систему под своим логином и паролем. Для более эффективного проведения практических занятий, студенты разбиваются на группы по 2-3 человека и регистрируются в системе (см. рис. 1 окно «Регистрация новой группы») .

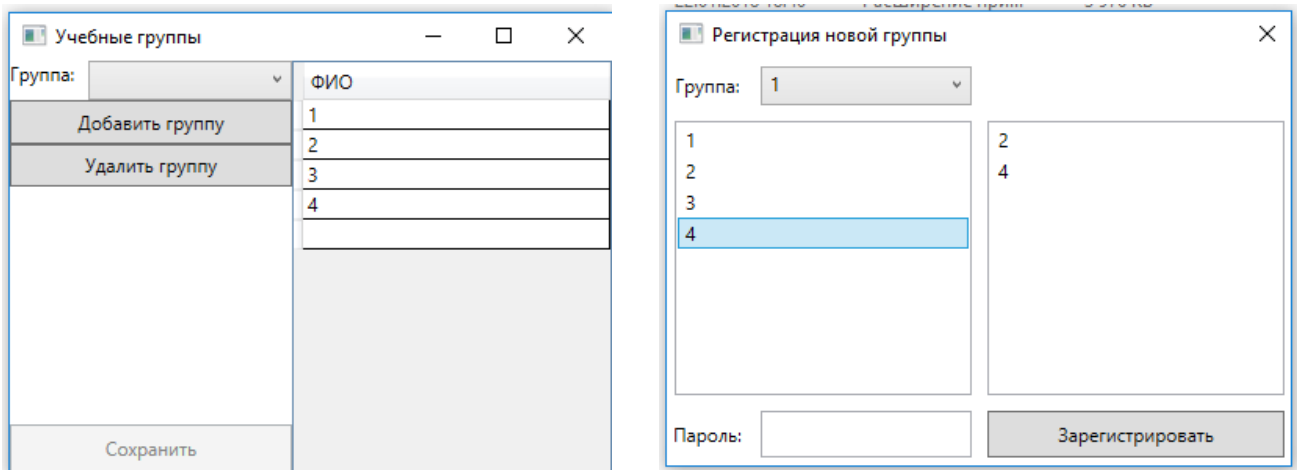


Рис. 1. Инструментарий для формирования учебных и рабочих групп студентов

Для каждой группы преподаватель имеет возможность назначить отдельное задание. Студенты после входа в систему, получают одну из базовых моделей, представляющих собой один из ГОСТов (см. рис. 2).

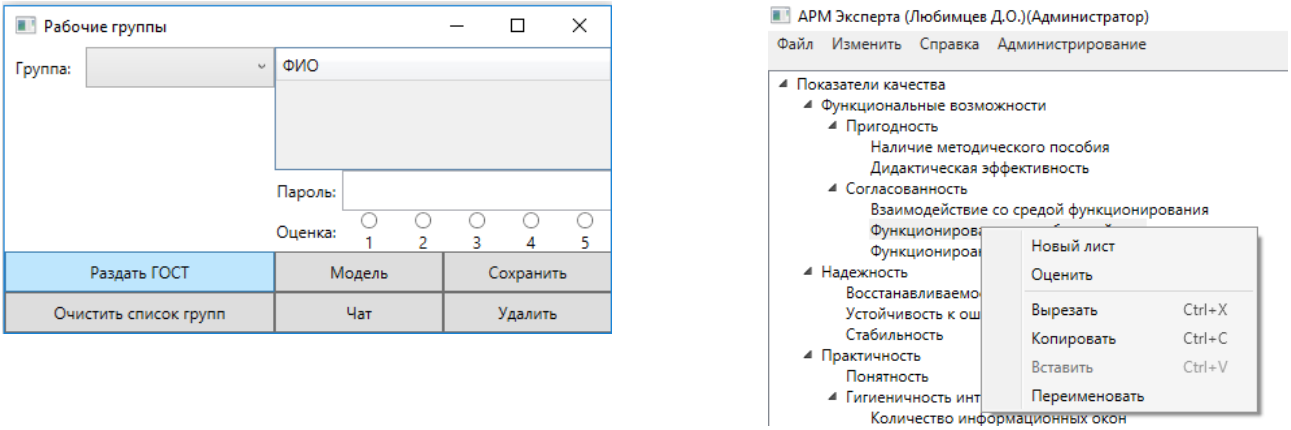


Рис. 2. Инструментарий для формирования заданий для учебных групп студентов

На практических занятиях, задачей каждой рабочей группы является выбрать себе определённый программный продукт и оценить с помощью АРМ Эксперта. При этом в качестве задания может быть указано использование для оценки только часть показателей ГОСТа. В режиме редактирования студенты могут удалить или же наоборот добавить пункты в модель оценки. Таким образом, каждая группа создаёт для себя уникальную модель оценки (см. рис. 2).

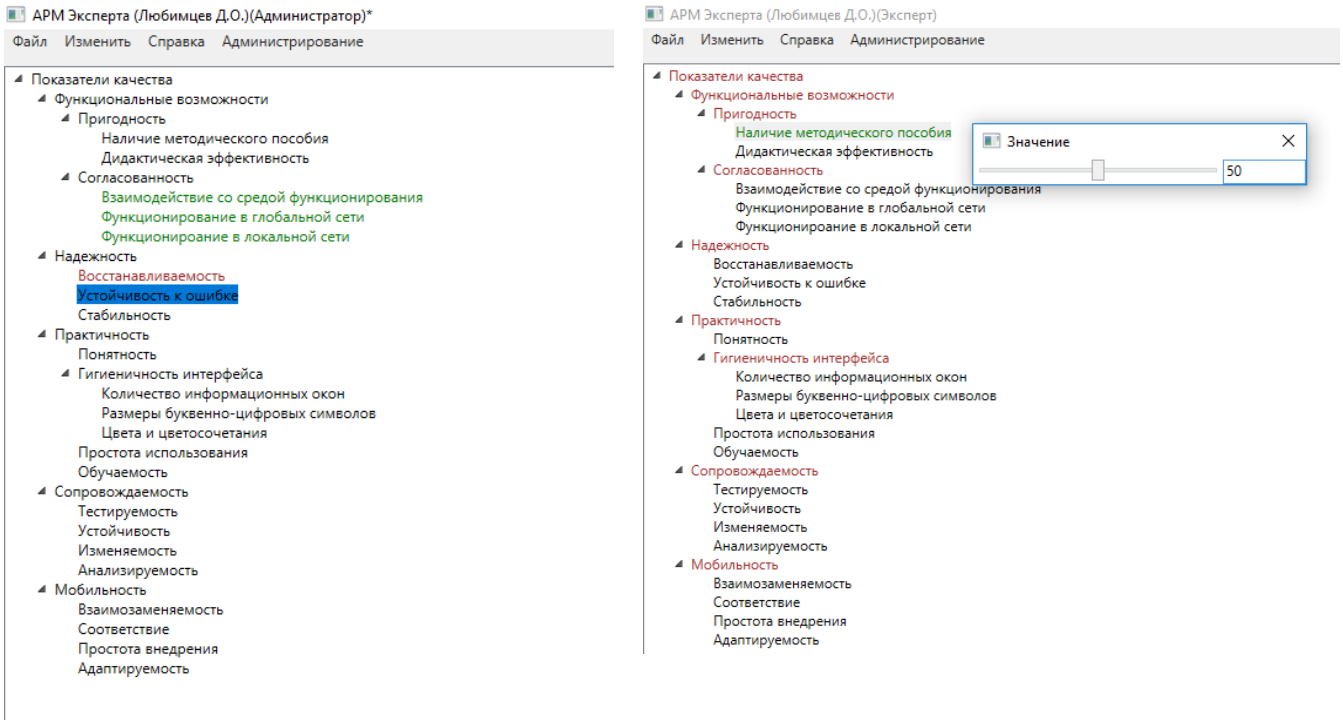


Рис. 3. Инструментарий для формирования моделей оценки качества

Для каждого пункта созданной модели группа выставляет коэффициент, соответствующий важности этого пункта для оценки ПП (см. рис. 3). Система автоматически контролирует значения коэффициентов в рамках ограничений на каждом уровне модели. Корректные или наоборот некорректные действия пользователя сопровождаются индикацией, что обеспечивает последовательное обучение процедуре формирования модели оценки.

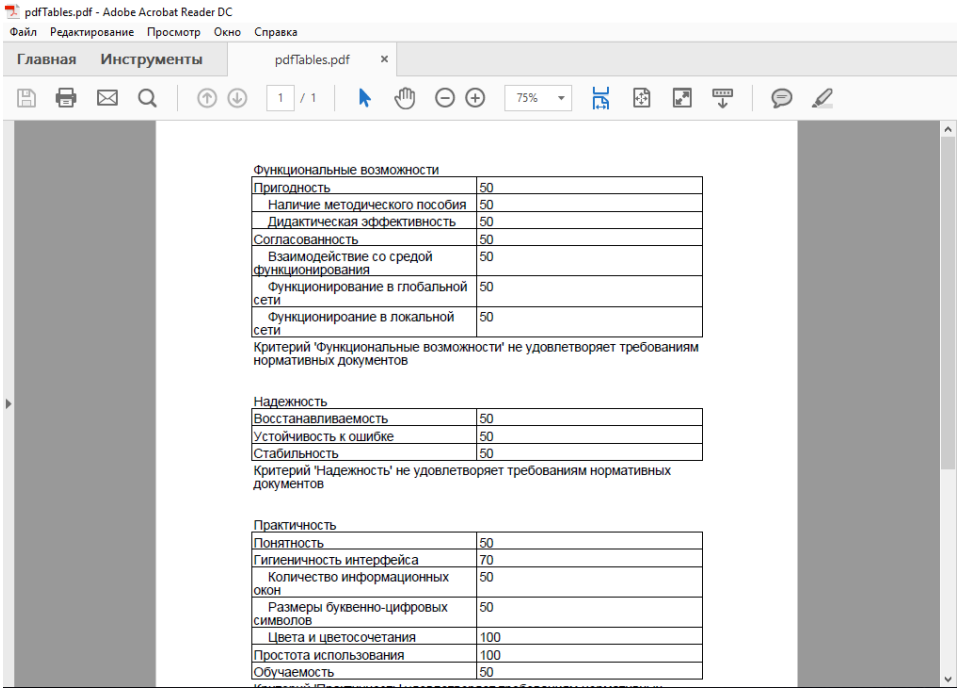


Рис. 4. Итоговый отчет о результатах оценки в рамках заданной модели оценки качества

После того, как модель оценки будет сформирована и все необходимые коэффициенты установлены, учебная группа переходит в режим Эксперта. В этом режиме проводится непосредственно оценка заданного ПП. По каждому критерию выставляется оценка по шкале от 0 до 100 (см. рис. 3). Критерием называется пункт модели, который не имеет подпунктов.

Результатом процедуры оценки является итоговый отчёт (см. рис. 4), который генерирует АРМ Эксперта. Анализ отчета позволяет сформулировать вывод о качестве ПП с точки зрения выбранный модели оценки. Система подсчитывает результаты оценки для всех пунктов модели, а также контролирует, чтобы оценки были поставлены для всех критериев модели. Хотя студенты и выставляют коэффициенты от 0 до 100, для подсчёта результатов используется исторически сложившаяся градация от 0 до 1. Группа, получившая отчёт и готовая к сдаче работы информирует преподавателя нажатием кнопки «ГОТОВО». В результате чего преподаватель получает оповещение, что группа готова. Преподаватель удаленно открывает модель группы и осуществляет ее проверку. При возникновении вопросов к качеству модели или отчета, преподаватель отменяет готовность группы и отправляет ей свои комментарии. За успешное выполнение задания группе выставляется оценка, о чем сигнализирует соответствующее оповещение. Тем самым реализуется удалённое взаимодействие преподавателя и рабочих групп.

В дополнении к функционалу, задействованному в основном сценарии работы, АРМ Эксперта 2018 обладает следующими возможностями:

- редактирование списка администраторов системы (преподаватели);
- редактирование состава рабочих групп администратором, их паролей;
- импорт моделей ГОСТов из текстового файла, что обеспечивает совместимость системы со старой версией.

На данный момент система успешно прошла апробацию и активно используется в лабораторном практикуме спецкурса «Сертификация программных продуктов» в рамках подготовки бакалавров по направлению «Прикладная информатика».

Библиографический список

1. Батищев Д.И., Банкрутенко В.В., Кривошеев А.О., Копылов Л.А., Маковеев Н.В., Фомин С.С. Автоматизация процесса оценки качества программ учебного назначения. Государственный комитет РФ по высшему образованию, Российский научно-исследовательский институт информационных систем, Оценка качества программных средств учебного назначения, Сборник докладов первого научно-практического семинара 15-17 ноября 1995г., Пущино-1995, с. 63-66

2. Банкрутенко В.В., Копылов Л.А., «Лабораторные работы –неотъемлемая часть курса «Проектирование информационных систем», Всероссийское совещание-семинар «Высокие технологии в региональной информатике», г. Воронеж,17-19 июня 1998г., Тезисы докладов, с. 104-105

3. Система сертификации ГОСТ Р. М.: Издательство стандартов. 1992,116с.

4. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. – М.: Издательство стандартов, 1989. Переиздано: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 31 с.

5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководство по их применению. – М.: Издательство стандартов, 1994. Переиздано: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000. Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестирование. – М.: Издательство стандартов, 2001. Переиздано: ИПК Издательство стандартов, 2006. – 17 с.

7. Банкрутенко В.В**.,** Копылов Л.А., Белокрылов П.Ю. Практическое освоение в учебном процессе стандартов качества при создании программных продуктов – воспитание принципов менеджмента качества в будущих специалистах // Методическая конференция ННГУ им. Н.И. Лобачевского «Инновационные методы обучения в высшей школе», Нижний Новгород, 10-11 февраля 2016 г.

8. Банкрутенко В.В, Белокрылов, П.Ю.,Копылов Л.А. Учебно-методическое пособие по курсу «Разработка и стандартизация программных средств и информационных технологий»/ Учебно-методическое пособие по курсам «Интеллектуальные информационные системы» и «Системы искусственного интеллекта и принятия решений». – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 54 с. Рег. №1227.16.06.

9. Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Бороздин. Анализ логистической поддержки: теория и практика –М.: ООО Издательство «Информ Бюро», 2014. -260 с.

10. Техническое задание на создание программных продуктов на основе ГОСТ 28195-89 или ИСО/МЭК для «Автоматизированного рабочего места проведения оценки качества программных продуктов (АРМ эксперта)»

V.V. Bancrutenko, DO Lyubimtsev, N.V. Starostin

USE OF ECD QUALITY STANDARDS IN CASE-MEANS OF DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS AT DESIGN ARM-EXPERT EVALUATION OF QUALITY OF SOFTWARE

Nizhny Novgorod State University. NI Lobachevsky

The history of the course "Certification of software products", the justification of its importance in the educational process, as well as a description of the teaching tools are given. The advantages and disadvantages of the old version of the Expert AWM 1995 system are shown. The description of the new version of the expert's Expert Advisor of 2018 is described, as well as the main scenario of the work.

Key words: certification; AWP; AWP Expert; software; SQL Server; Visual Studio; educational process.

УДК 004.9

И.В.Нетронин, И.В.Малиновский, В.В.Банкрутенко

ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ

АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»

На основании опыта разработки и использования программных продуктов, в рамках информационной поддержки стадий жизненного цикла изделия (ЖЦи), сформулированы необходимые задачи решение которых приведет к внедрению интегрированной логистической поддержки.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка, жизненный цикл изделия, ИТ-команда, PDM, PLM-системы, 2D, 3D модели.

К наукоемкой продукции традиционно относят продукцию следующих отраслей: авиационная, атомное машиностроение, общее и оборонное машиностроение. Опыт внедрения технологии информационной поддержки жизненного цикла изделий (PLM) АО «ОКБМ Африкантова» показывает, что до внедрения интегрированной логистической поддержки (ИЛП) должны быть решены следующие задачи:

1. Создание команды ИТ-профессионалов, которые должны поддерживать работу не только PDM/ PLM систем, но и систем, через которые осуществляется проектирование, анализ, технологическая подготовка и изготовление изделий(так называемые системы CAD/CAE/CAPP/CAM). Эти специалисты должны в совершенстве владеть используемыми на предприятии системами перечисленных классов и в случае необходимости решать сложнейшие задачи, которые в силу загрузки иногда некогда решать сотрудникам профильных подразделений. Формулирование, планирование, выполнение, контроль и анализ таких работ должны проходить в ежегодных планах по ИТ. Необходимо отметить, что работа PLM-систем организована на некоторой СУБД и для стабильной работы необходимы специалисты по этой СУБД, причем специалисты должны быть очень высокого уровня. В этом случае успешная работа названного выше комплекса программных средств будет обеспечена.
2. Должны быть разработаны стандарты организации (СТО) по использованию различных программных средств и технологии работы с ними, составляющими ядро PLM-системы и используемыми на разных этапах создания и эксплуатации жизненного цикла. В АО «ОКБМ Африкантов» разработаны и используются следующие стандарты:

- СТО СМК-178 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка конструкторской документации в формате DWG.
- СТО СМК-191 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка электронных документов в системе Unigraphics NX
- СТО СМК-197 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Идентификация статуса электронного документа
- СТО СМК-212 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Идентификация статуса электронной модели
- СТП 263-2005 Термины и определения
- СТП МИ 02.05-187 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка конструкторской документации
- СТП МИ 02.05-189 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Наполнение и актуализация баз данных предприятия
- СТП МИ 02.05-190 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка текстовой документации
- СТП МИ 02.05-198 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка и актуализация классификатора проекта
- СТП МИ 02.05-213 ДОКУМЕНТООБОРОТ ЭЛЕКТРОННЫЙ. Разработка конструкторской документации в системе Inventor.

3. В настоящее время остро стоит задача в проектировании – это переход с 2D моделей на 3D. Первоначально 3D модели, как правило, создавались на основе 2D чертежей. И это правильная логика, так как модель в этом случае строится на основе чертежа, по которому, скорее всего, уже изготовлено изделие. Такой способ получения 3D модели на уже спроектированные и изготовленные изделия называется моделированием. Способ получения 3D модели изделия с использованием трехмерных моделей примитивов и 3D моделей отдельных узлов называется 3D-проектированием. Необходимо отметить, что на начальном этапе создания 3D моделей будет преобладать моделирование, но по мере накопления в архивах проектов 3D моделей и правильной организации доступа к этим архивам и создании специальных архивов отдельных, часто используемых деталей и узлов оборудования будет все больше использоваться способ проектирования, а так же накопление опыта конструкторами.

Задача ИТ-службы заключается в разработке стандартов организации, в которых должно быть четко сформулированы виды действий с полученной 3D моделью, прошедшей все стадии согласования и утверждения в специальном архиве (в АО «ОКБМ Африкантов» это архивы проектов) и описан способ получения доступа (Чтение, изменение и удаление) к данным моделям. Также ИТ-службе необходимо привить культуру 3D проектирования основной массе исполнителей, что на этапе внедрения и начального развития решается только наличием нормативно-методической и организационно-распорядительной документации.

Очень важно, чтобы бизнес-процессы проектирования, технологической подготовки производства, производства были актуализированы с учетом современной технологии поддержки жизненного цикла изделий (ИПИ) и программных средств, используемых в ИПИ.

4. Проектирование изделий наукоемкой продукции невозможно без систем анализа, в качестве которых в АО «ОКБМ Африкантов» используются в основном программные продукты фирмы ANSYS (ANSYS Machanical, CFX, LS-Dyna), программные продукты MSC(ADAMS), CONCEPTS NREC(Concept), ТЕСИС(FlowVision), а также программные продукты собственной разработки, что характерно для наукоемких отраслей с значительной долей уникальных процессов и технологий. Для управления данными инженерных расчётов используется система Engineering Knowledge Manager (EKM) фирмы ANSYS. В настоящее время успешно решается задача по встраиванию ANSYS EKM в единую информационную среду АО «ОКБМ Африкантов».

Успешное решение перечисленных выше задач позволит перейти к следующему важному этапу интегрированной логистической поддержки. На этом этапе ИТ специалистам предстоит решать следующие задачи:

1. В созданных системах поддержки этапа эксплуатации в процессе жизненного цикла РУ,необходимо провести доработку для включения их в систему EKM. Данная задача в настоящее время проработана в отделе ИТ и начато ее решение. Так, выполняются работы по описанию бизнес-процессов и их актуализации с применением ANSYS EKM. Проведены проекты по определению эффективности применения технологий разработанных ИТ-специалистами с привлечением специалистов инженерного анализа в рамках информационного пространства организации. Результаты выполненных работ и оценка эффективности изменения бизнес-процессов инженерного анализа дают для части охваченных процессов снижение трудоемкости более чем в 10 раз.

2. Приобретение последней версии системы TG Builder (разработчик «ОАО НИЦ «Прикладная логистика») для создания интерактивных технических руководств. Более чем десятилетний опыт использования данного продукта и аналогичных продуктов показал необходимость освоения его специалистами службы ИТ с целью внедрения в различных подразделениях для следующих целей:
- обеспечение пользователя справочными материалами об устройстве и принципах работы изделия, необходимыми для эксплуатации, выполнения ремонтов, планирования и учета регламентных работ (Пример приведен на рисунке 1);

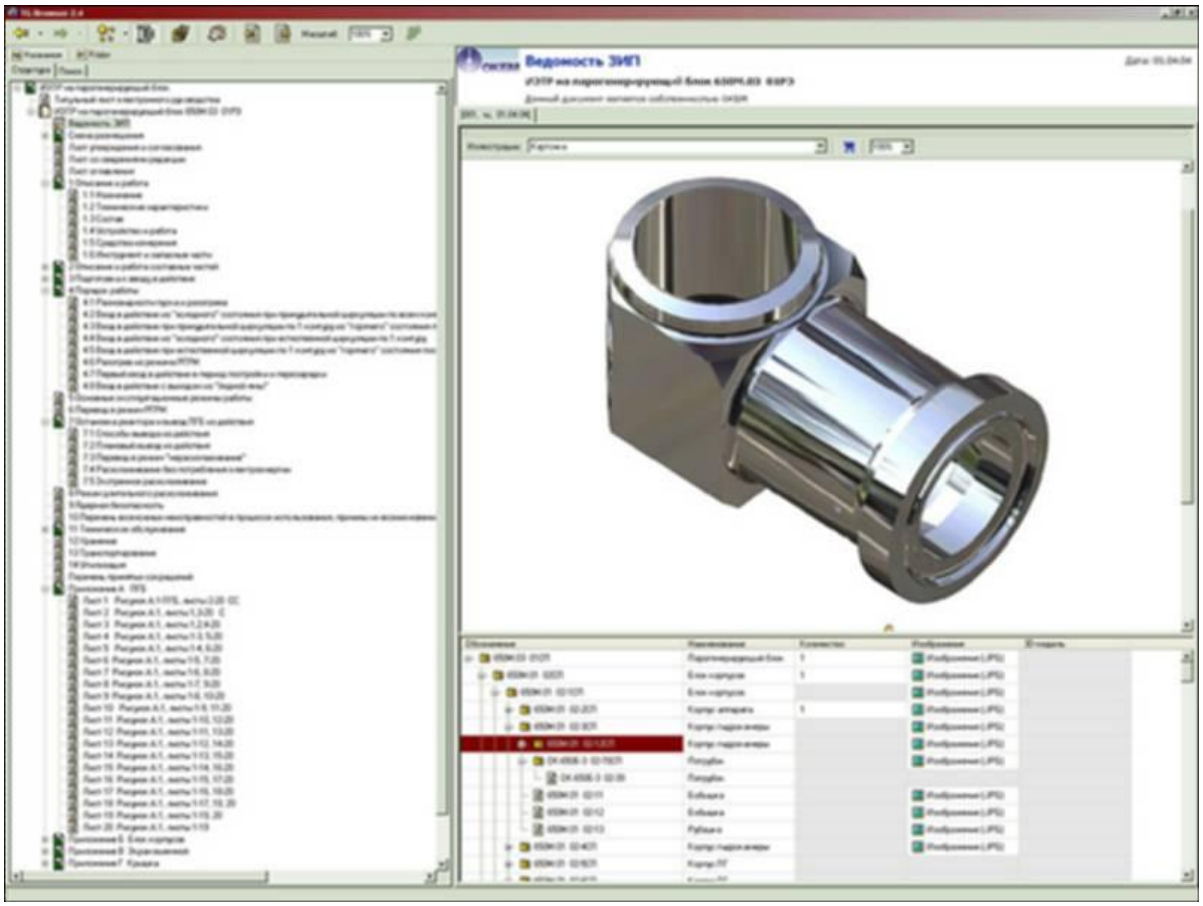


Рис. 1

- обеспечение пользователя информацией о технологии выполнения операций с изделием, потребности в необходимых инструментах и материалах, количестве и квалификации персонала;
- подготовка и реализация автоматизированного заказа материалов и ЗИП.[1] Приобретение программных средств, позволяющих более эффективно разрабатывать документацию для проведения обслуживания, ремонтов, авторского надзора, различных частей этапа эксплуатации. Организация разработки, хранения, обращения, использования подобной информации оправдана по многим причинам – скорость подготовки и проведения работ, трудоемкость, возможность повторного проведения работ, скорость поиска информации и актуальность ее и др.

3. Одна из главных задач этапа ИЛП – это анализ логистической поддержки (АЛП). Имеется опыт решения данного класса задач, например ЭМР-НН – система эксплуатационного мониторинга ресурса, предназначенная для оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса конструктивных элементов оборудования РУ в процессе её эксплуатации. Но службам ИТ предстоит проработка и решения вопроса встраивания подобных систем в единую информационную среду.

Для достижения целей ИТ-службы в части ИЛП структура подразделений ИТ должна выполнять определенные функции. Кроме типичных для большинства промышленных предприятий функций обслуживания инфраструктуры, поддержки пользователей, консультирования и выполнения иных оперативных задач необходимо выделять направления планирования развития бизнес-процессов при помощи средств ИТ, стратегию ИТ, связанную с управлением бизнесом, оценку рисков применения технологий и приложений как с точки зрения информационной безопасности, так и долговременного развития их в рамках организации и др.

Функциональная схема службы ИТ, позволяющая решить задачи организации при внедрении ИЛП представлена на рисунке 2. Разделение функций ИТ-службы по формальным признакам достаточно сложно, решение об этом принимается в зависимости от степени развития ИТ на предприятии, от приоритетов на данный момент и перспективу, поэтому пересечение функций на рисунке не случайно и является гарантией их выполнения при изменении локальных целей ИТ-службы.

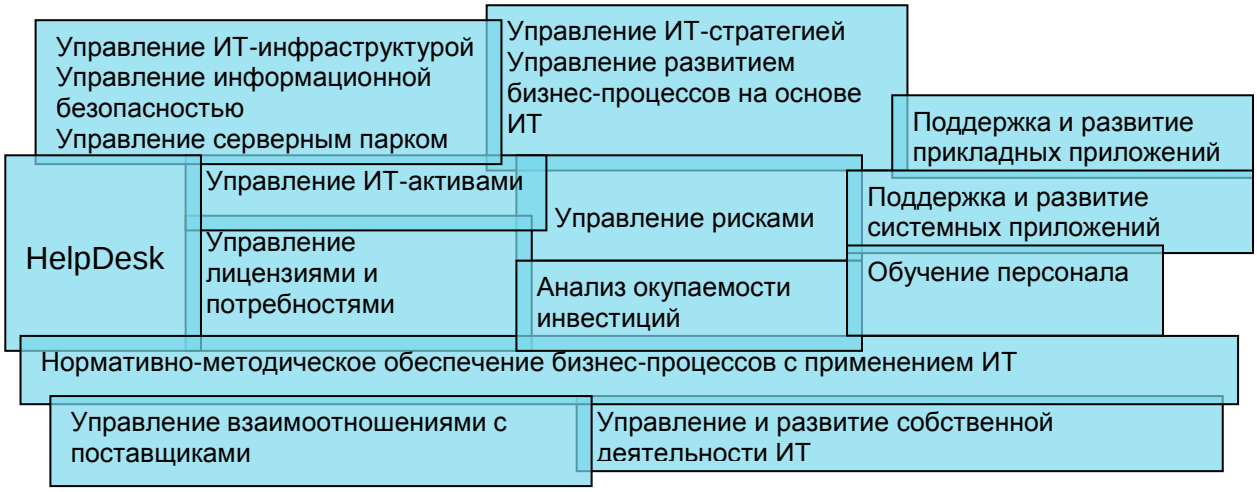


Рис. 2

При успешной организации всех функциональных направлений ИТ на предприятии для решения описанных задач и поддержке руководства ИТ-служба будет представлять собой прекрасный инструмент для развития бизнеса и повышения эффективности деятельности всей организации.

I.V. Netronin, I.V. Malinovsky, V.V. Bankrutenko

OBJECTIVES AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN INTEGRATED LOGISTIC SUPPORT IMPLEMENTATION

JSC "Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering. I.I. Afrikantova »

Based on the experience in the development and use of software products, within the framework of information support of product life cycle stages (LCs), the necessary tasks have been formulated whose solution will lead to the introduction of integrated logistical support.

Keywords: integrated logistic support, product life cycle, IT team, PDM, PLM-systems, 2D, 3D models.

УДК 681.518

А.В. Валяев, Е.А. Лукина

О ПОДСИСТЕМЕ РАСЧЁТА ДИАГРАММ ОСТОЙЧИВОСТИ РЕЧНОГО ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО СУДНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Волжский государственный университет водного транспорта

Представленабазовая схема подсистемы расчёта диаграмм статической и динамической остойчивости речного водоизмещающего судна в режиме реального временив процессе эксплуатации.Подсистема является частью разрабатываемой авторами масштабируемой программно-аппаратной системы поддержки принятия капитаном речного грузопассажирского (круизного) судна решения о готовности к использованию штатных технических средств спасения пассажиров и экипажа при угрозе наступления скоротечной аварии судна.

Ключевые слова: упреждающий мониторинг, речное водоизмещающее судно, диаграммы статической и динамической остойчивости

Эффективность спасательных операций и степень риска для жизни людей на борту судна при аварийной ситуации в значительной степени определяются характером и продолжительностью протекания аварии. Практика показывает, что результативность спасательных операций почти полностью зависит от продолжительности гибели судна, измеряемой с момента возникновения критической ситуации до момента окончательной гибели судна.

По статистическим данным [1] основной причиной гибели судов является потеря остойчивости. Аварии по времени гибели судна от потери остойчивости можно разделить на следующие виды: внезапное опрокидывание судна; медленное накренение судна без затопления; затопление судна с креном.

Считается, при начале внезапного опрокидывания время до наступления гибели судна настолько мало, что какие-либо меры экипажа по предотвращению гибели судна выполнить невозможно. В этом случае только профилактические меры, в том числе контроль состояния судна в течение рейса, преобразующиеся в современных тенденциях в упреждающий мониторинг, могут снизить риск гибели судна [2].

В случае медленного накренения судна с возможным затоплением анализ ситуации и возможность её контроля обеспечит своевременность и правильность действий в борьбе за живучесть судна.

Контроль посадки и остойчивости аварийного судна заключается в фиксации и прогнозировании их допустимых величин. Контроль подтверждается расчётами.

В настоящее время на речных водоизмещающих судах расчёты выполняются под руководством капитана на основе полученных экипажем данных по обследованию аварийных отсеков (размер и расположение пробоины, значение коэффициента проницаемости груза и отсека) и данных по основным элементам остойчивости судна (вахтенная служба обязана их постоянно контролировать). Расчёты ведутся с использованием «Информации об остойчивости и непотопляемости» [3] приближёнными методами, допустимыми Правилами Российского Речного Регистра.Быстрота приближённого решения задачи стоит в приоритете по сравнению с её точностью из-за изменяющихся условий.

В результате расчётов определяются крайние (предельно допустимые для данного случая нагрузки) значения параметров посадки и остойчивости и принимаются решения о порядке и содержании действий [2].

Согласно Правилам Российского Речного Регистра (далее – Правила), остойчивость судна в любом состоянии определяется величиной предельно допустимого момента (расчетного значения момента, предельно допустимого из условий обеспечения требуемых Правилами показателей остойчивости судна при статических или динамических наклонениях) [3].

Поэтому система поддержки принятия капитаном речного грузопассажирского (круизного) судна решения о готовности к использованию штатных технических средств спасения пассажиров и экипажа при угрозе наступления скоротечной аварии судна (далее СППР) должна иметь подсистему расчёта диаграмм статической и динамической остойчивости в процессе эксплуатации. Это необходимо дляопределения предельно допустимого момента с возможно более широким учётом всех внешних условий, влияющих как на кренящий, так и на предельно допустимый момент.

Предельно допустимый момент определяется по диаграммам остойчивости. Диаграммы статической и динамической остойчивости с таблицей кренящих и опрокидывающих моментов и углов крена для определённых случаев нагрузки входят в перечень технической документации, представляемой на рассмотрение Речному Регистру [3]. Эта информация является исходной, соответствующей некоторым случаям нагрузки судна.

Для определения предельно допустимого момента судна в процессе эксплуатации авторы статьи предлагают базовую схему расчёта (рис. 1), что позволит с большей точностью прогнозировать время до начала спасательной операции при использовании разрабатываемой СППР.

В основу исходных данных для алгоритма должны быть положены сведения, входящие и в «Информацию об остойчивости и непотопляемости»:

– общие данные по судну, включая результаты опыта кренования;

– схема размещения цистерн запасов и балласта с указанием массы и координат центра тяжести для расчётов положения центра тяжести судна при текущем случае загрузки, а также поправок на влияние свободной поверхности жидких грузов;

– схема расположения отсеков и помещений судна.

В расчётах нагрузки предполагается, что судовые запасы расходуются пропорционально уменьшению основного топлива. Однако на практике эта закономерность не всегда соблюдается. Особенно трудным является учёт объёма цистерн общесудовых систем пассажирского судна. Учёт этого обстоятельства призвана решить система датчиков, контролирующих фактическую загрузку цистерн и автоматически передающих эту информацию на вход (блок исходных данных) подсистемы для расчёта фактической нагрузки, от которой зависят характеристики диаграммы статической остойчивости. В качестве датчиков-измерителей уровня жидкости в цистернах судна предполагается использовать кондуктометрические, а также поплавковые датчики, в сочетании с сигнализаторами уровня жидкости или отдельно от них. Это обеспечит своевременный контроль уровня свободной поверхности жидкости, а также позволит учитывать влияние момента, создаваемого жидкостями на судно.

Неотъемлемой частью разрабатываемой СППР является система датчиков наличия воды в отсеках и помещениях судна для автоматической передачи этих данных на вход алгоритма расчёта плеч диаграммы статической остойчивости. В качестве датчиков-измерителей уровня жидкости в отсеках трюма судна предполагается использование поплавковых датчиков. Эти датчики позволят не только сигнализировать о наличии воды в каком-либо конкретном отсеке, но также позволят отслеживать её уровень.

Математическая модель расчёта предельно допустимого момента речного водоизмещающего судна основана на известных расчетных зависимостях теории корабля [4].

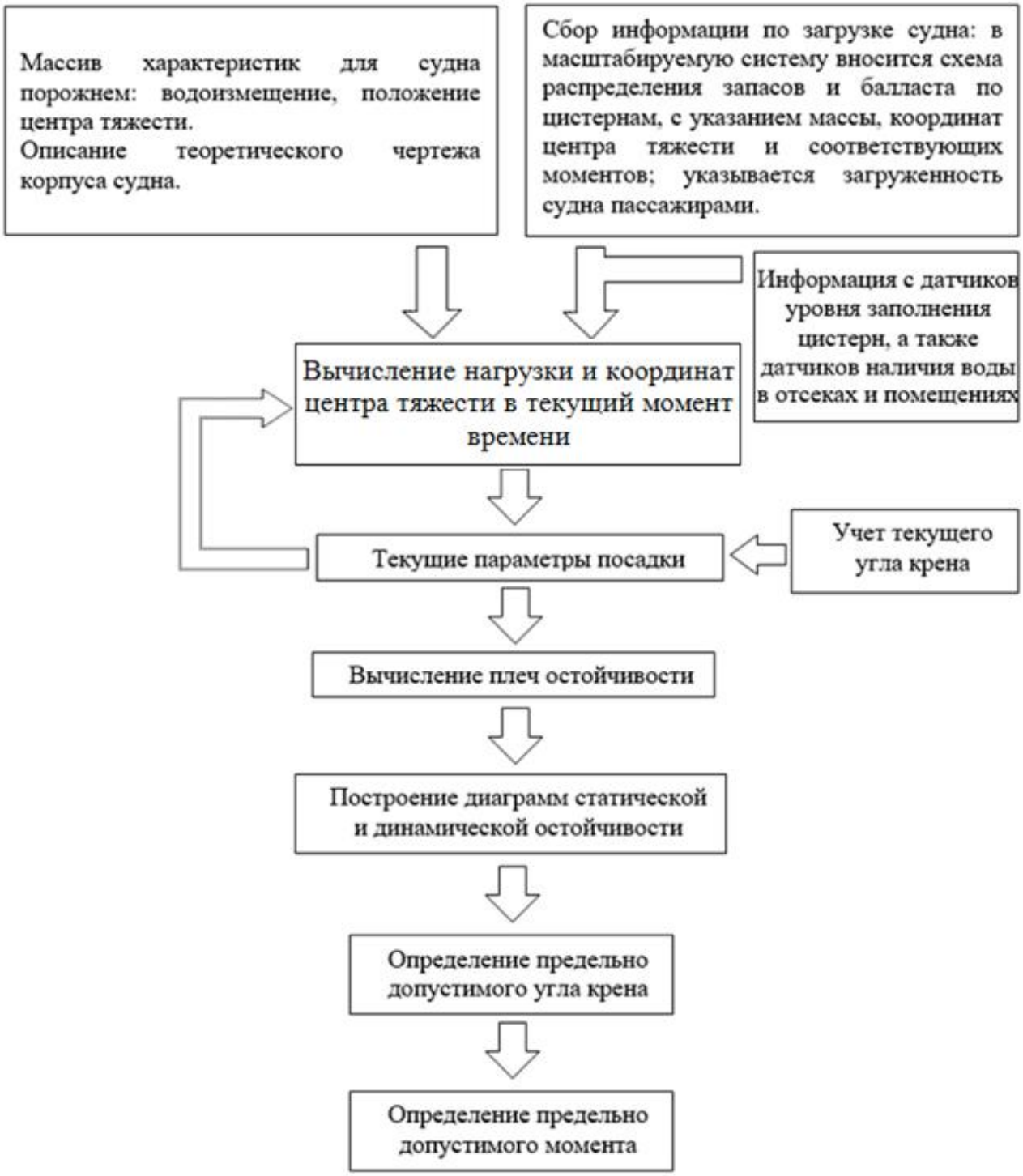


Рис. 1 Базовая схема расчета предельно допустимого момента

После сбора исходной информации по нагрузке рассчитываются текущие параметры посадки судна. Изменение же посадки влечёт за собой изменение положения центра тяжести судна. Расчет повторяется с учетом текущего угла крена. Для каждого цикла полученная предыдущая посадка принимается за исходную. Таким образом, в расчёте предельно допустимого момента учитывается не только реальное положение метацентра, влияющее на значение плеч диаграммы статической остойчивости, но и учтён возможный статический угол крена, опасный тем, что в совокупности с моментом от динамически приложенного давления ветра с подветренного борта уменьшает значение предельно допустимого момента.

Величина предельно допустимого момента согласно Правил, для судов внутреннего плавания класса «О» и выше, определяется с учётом угла бортовой качки. В разрабатываемой подсистеме предполагается учитывать его по данным датчиков, регистрирующих бортовые колебания судна в режиме реального времени. При этом система, регистрирующая колебания с высокой частотой, сама определяет пиковые значения бортовых колебаний и на вход блока определения предельно допустимого момента после определения плеч диаграммы статической остойчивости подаёт значения угла бортовой качки, осреднённые за короткий промежуток времени. Осреднение должно быть выполнено за промежуток времени, кратный периоду собственных колебаний судна, определённому по этой же записи.

Значение предельно допустимого момента определяется предельно допустимым углом крена, в качестве которого принимается угол опрокидывания судна или угол заливания, в зависимости от того, что меньше. Угол опрокидывания определяется в подсистеме расчётом по диаграмме статической остойчивости для текущего состояния нагрузки с учётом угла бортовой качки. При оценке угла заливания в режиме реального времени предполагается ввести в систему дополнительный контроль закрытия отверстий, которые должны быть закрыты согласно пункту 1.1.10 части II Правил классификации и постройки судов Российского Речного Регистра [3].

Значения рассчитанного предельно допустимого момента предполагается сравнивать с текущим значением кренящего момента. Для прогнозирования риска опрокидывания судна необходимо отслеживать динамику изменения значений как кренящего, так и предельно допустимого момента с течением времени. Необходимо обеспечить упреждающий мониторинг состояния речного водоизмещающего судна как объекта, функционирующего в условиях потенциального риска затопления. Осуществлятьв режиме on-line сбор и анализ информации о событиях в наблюдаемых судовых системах и сервисах, а также контроль значений ключевых параметров, своевременно выявлять закономерности и корреляции в событиях и, таким образом, представлять вахтенному начальнику обобщенную картину текущего состояния судна и обнаруживать тенденции его нежелательных изменений.Эти меры служат для сокращения времени принятия решений капитаном судна при аварийном происшествии, снижения уровня влияния субъективного фактора, повышения эффективности реализации спасательных операций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, проект № 0040127.

Библиографический список

1. Александров М.Н. Безопасность человека на море. – Л.: «Судостроение», 1983. – 209 с.
2. Карпенко А.Г. Рекомендации по действиям в аварийных ситуациях (РДАС-99) / А.Г. Карпенко, А.Ф. Глухов, В.И. Дмитриев / – СПб, 1999. – 52 с
3. Российский Речной Регистр [Электронный ресурс] / Правила РРР // Режим доступа: http://ssl.rivreg.ru/publication/pravila/ (дата обращения: 20.01.2018).
4. Сизов В.Г. Теория корабля. – Одесса: «Феникс», 2008. – 462 с.

A.V. Valyayev, E.A. Lukina

ABOUT SUBSYSTEM OF CALCULATION OFSTABILITY DIAGRAMS OF THE RIVER DISPLACEMENT VESSEL IN THE OPERATION PROCESS

Volga State University of Water Transport

This article presents an basic scheme for calculating of static and dynamic stability diagrams of the river displacement vessel in the operation process in real time. The algorithm is necessary for constructing a subsystem that is part of the author's development system for river captain of a displacement vessel decision on readiness for use of standard hardware rescue of passengers and crew when the threat of fleeting accident vessel, analysis of known support systems for decision support.

Key words: proactive monitoring, river displacement vessel, diagram of static and dynamic ship stability.

УДК 517.928

А.С. Власов, А.Н. Долгов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА «Femap with NX Nastran» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЛЬШПОЛА ПРИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ САМОЛЕТА

Арзамасский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено исследование механических характеристик фальшпола, носителя приборного электрорадиооборудования и операторов, при предельных перегрузках самолета Ил-976 с использованием компьютерного моделирования в программных пакетах *Siemens NX11* и *Femap with NX Nastran*, что позволило сделать конструкцию более легкой и более прочной.

Ключевые слова: предельная перегрузка, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, запас прочности, оптимизация топологии.

К самолету предъявляется ряд разнообразных требований, которые по сравнению с требованиями к другим инженерным сооружениям и машинам являются значительно более жестким. Самолет должен иметь хорошие летные данные (скорость, потолок, дальность и др.) и одновременно он должен быть достаточно прочным в эксплуатации при минимальном весе конструкции.

В реальных условиях полета появляются перегрузки, действующие на самолет. Фюзеляж является строительной основой любого самолета, объединяя в силовом отношении в единое целое все его части. Основным требованием к фюзеляжу является выполнение им своего функционального назначения при наименьшей массе конструкции всех частей самолета. Любой конструктивный элемент самолета нужно стараться сделать как можно легче, но при этом он должен отвечать требованиям по прочностным характеристикам.

С появлением новых систем расчетов, новых материалов и «ноу-хау» в конструкциях периодически возникают задачи по пересмотру действующих конструкций летательных аппаратов и оптимизации их элементов. Одним из наиболее востребованных современных военных самолетов является Ил-976. Работа по модернизации направлена на облегчение и увеличение прочностных характеристик летательного аппарата, что соответствует планам работ ОАК (объединённая авиационная корпорация), подтверждая актуальность проводимых исследований, направленных на повышение прочностных характеристик отдельных его элементов.

Для решения этих задач было применено компьютерное моделирование, что позволило значительно сократить затраты и время на изготовление макетных образцов при проектировании конструкции.

Объектом исследования в этой работе является фальшпол – носитель приборного электрорадиооборудования и операторов. Его общий вид приведен на рис. 1.

Для проведения компьютерного моделирования была создана конечно-элементная модель с использованием стандартных элементов и процедур моделирования программы *NX11*. Панели пола, профили, уголки смоделированы двухмерными оболочечными элементами типа *Plate*, остальные детали конструкции смоделированы трехмерными элементами типа *Solid*, заклепочные и болтовые соединения – с помощью балочных элементов типа *Beam*.

В результате расчета нагружения опор на одно кресло были заданы силы, действующие на фальшпол. Так как крепление фальшпола осуществляется за счет кронштейнов, то граничные условия заданы по трем направлениям *x, y, z*.

Усилия приложены в центре масс пультов и местах крепления кресел оператора к фальшполу.

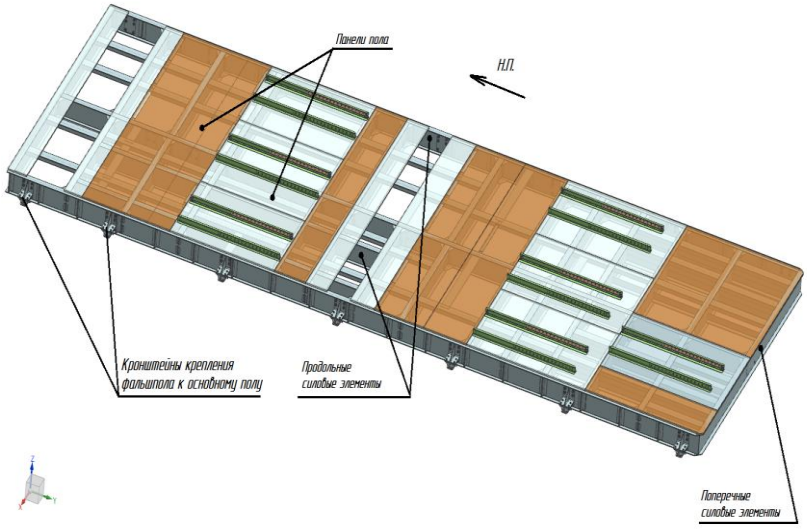


Рис. 1 - Общий вид фальшпола

Общий вид расчетной схемы в *NX11*приведен на рис. 2.

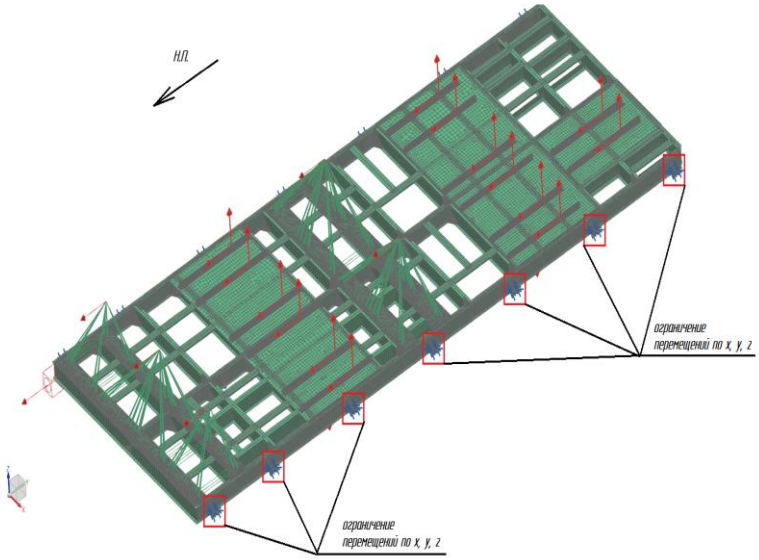


Рис.2 - Расчетная схема фальшпола в *NX11*

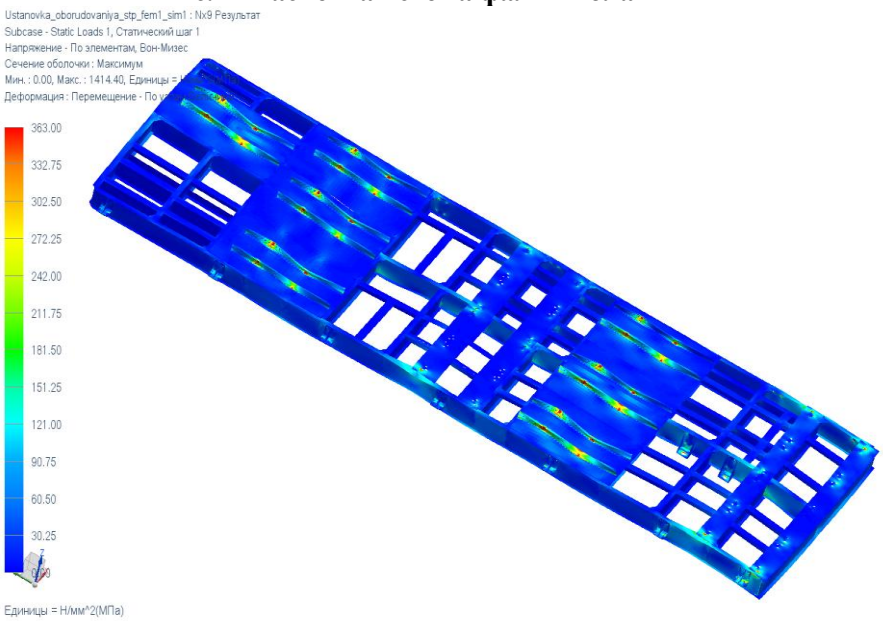


Рис.3 - Распределение эквивалентных напряжений в конструкции

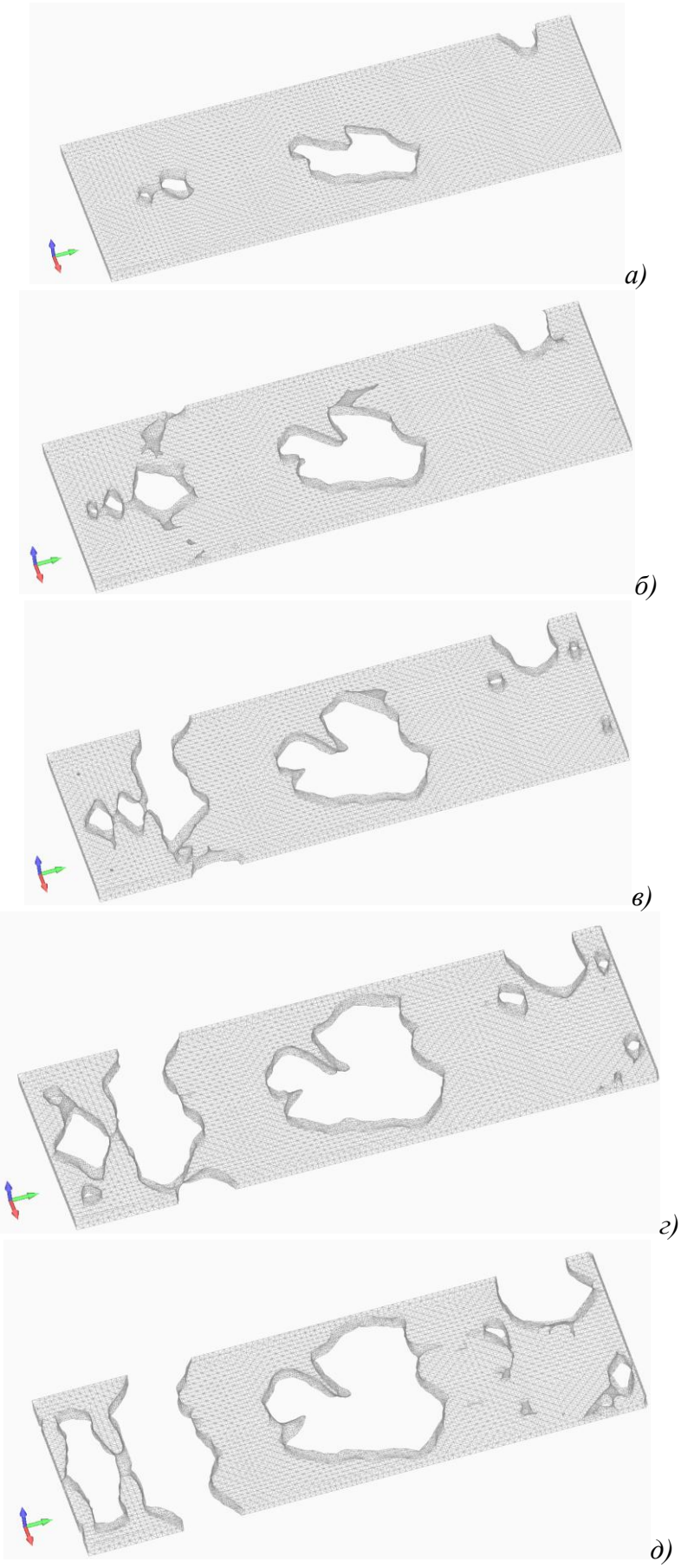


Рис.4–Результат распределения материала по объему:
а- 90%, *б*- 80%, *в*- 70%, *г*- 60%, *д*- 50%

В результате моделирования расчетной схемы фальшпола была построена эпюра эквивалентных напряжений в конструкции.

Компьютерное моделирование показало, что максимальное действующее напряжение возникает в точках крепления кресел оператора к рельсам (320 МПа*)*. Нагрузка, действующая от пультов, не превышает 120 МПа. Большая часть всей конструкции не имеет нагружения.

Программа *Femap with NX Nastran* позволит получить оптимальное распределение материала для новой разрабатываемой конструкции фальшпола. На основе геометрической, конечно-элементной модели, нагрузок от пультов и кресел операторов была проведена топологическая оптимизация.

В качестве топологической оптимизации используется плотность конечных элементов модели, изменением которой определяется оптимальное распределение материала. Исходя из напряжения и деформаций, определяется область, где нет необходимости в материале. Таким образом, при оптимизации происходит исключение из модели наименее нагруженных участков, в результате генерируется новая форма модели в пределах пространства первичной геометрии фальшпола.

На основе полученных результатов можно утверждать, что топологическая оптимизация фальшпола не имеет смысла при 50% и более распределения материала по объему, это приводит к разрыву сетки конечной элементной модели. Таким образом, принимая топологическую оптимизацию фальшпола для 60%, в программном пакете *Femap with NX Nastran* удастся достичь снижения веса всей конструкции на 40%.

Библиографический список

1. М. Ф. Астахов, А.В. Караваев, С.Я. Макаров, Я.Я. Суздальцев, Справочная книга по расчету самолета на прочность, Оборонгиз, 1954.

A.S Vlasov, A.N. Dolgov

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE RAISED FLOOR UNDER AIRCRAFT'S EXTREME OVERLOADS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev
Arzamas Polytechnic Institute (branch)

The mechanical characteristics of the raised floor, the carrier of instrumental electrical and radio equipment and operators, under extreme overloads of the Il-976 aircraft were studied with the using of computer generated simulation in the software package *Siemens NX 11* and *Femap with NX Nastran*, which made the construction easier and more durable.

Key words: extreme overloads, computer generated simulation, finite elements method, safety margin, layout optimization.

УДК 629.05.07

Т.И. Гаврилова, Е.Н. Поселенов, М.М. Чиркова

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

В данной работе обосновывается функциональная схема и алгоритм работы системы автоматического управления координатами состояния судна, как наиболее сложного по динамике подвижного объекта, функционирующего на стыке 2-х сред и меняющего свои аэро и гидродинамические характеристики в зависимости от состояния внешней среды и загрузки судна. Предлагаются три сценария работы системы с переключением потока информации (данных о координатах состояния объекта управления) в зависимости от развития ситуации. Выбор сценария определяется в блоке «опроса датчиков состояния, анализа результатов моделирования и принятия решения о сценарии». Сценарии реализуются на независимых микроконтроллерах.

Ключевые слова: системы автоматического управления, алгоритмы управления, информационные потоки, сценарии работы системы автоматического управления, подвижные объекты, динамика объектов.

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие систем управления движением подвижных объектов без участия человека. В данной работе обосновывается функциональная схема и алгоритм работы системы, управляющей движением судна по заданной траектории без участия человека. Из подвижных объектов выбрано речное водоизмещающее судно, как наиболее сложный объект, функционирующий на стыке 2-х сред и меняющий свои аэро и гидродинамические характеристики в зависимости от состояния внешней среды и загрузки судна . Предлагаются три сценария работы системы с переключением потока информации в зависимости от развития ситуации (информации о координатах состояния объекта управления).

На рис.1 представлена блок-схема такой системы, использующей 2 микроконтроллера.

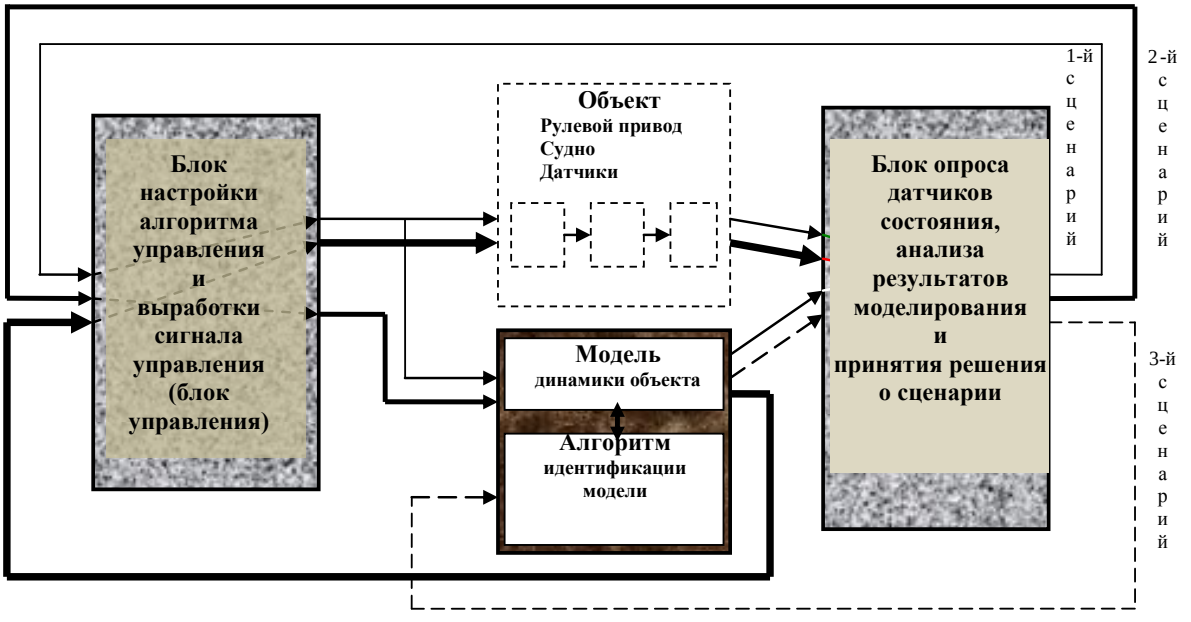
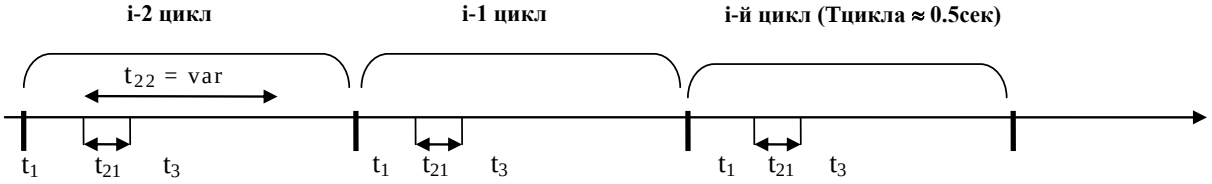


Рис. 1. Блок-схема системы управления

В первом контроллере заложен алгоритм выработки сигнала управления, алгоритм сравнения реального поведения объекта с поведением, предсказанным математической моделью, на основании результатов сравнения принимается решение о сценарии работы системы в следующем цикле.

Во втором контроллере заложена математическая модель объекта и программа её идентификации, как структурной так и параметрической [1]. Модель используется для расчета возможной реакции судна на рассчитанный блоком управления управляющий сигнал. Реализация системы на 2-х контроллерах обусловлена необходимостью распараллелить решение двух задач: 1) расчет управляющего сигнала и самого процесса управления состоянием объекта и 2) выбор модели (из существующих в каталоге контроллера моделей) и её параметрическая идентификация. Дело в том, что использовать одну модель, отслеживая и повышая её точность за счет настройки коэффициентов (из-за смены внешних условий) не целесообразно по 2 причинам.

Первая причина: динамика судов, движущихся по глубокому фарватеру, при спокойной внешней среде достаточно точно описывается линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка и настройка коэффициентов модели не представляет трудностей и может быть выполнена в течении времени t_{21}, внутри одного цикла управления (рис. 2).



t_1 – время, отводимое на опрос портов ввода информации с датчиков состояния объекта управления;

t_{21} – время работы блока выработки управляющего сигнала, коррекции алгоритма управления и вывода сигнала на объект;

t_{22} – время, отводимое на работу с моделью, на адаптацию модели к изменившейся внешней среде (может занимать несколько циклов); реализуется во втором контроллере.

t_3 – время управления объектом без опроса датчиков.

Рис.2. Распределение времени цикла работы системы управления

Вторая причина: динамика объекта резко меняется при смене условий плавания, в прибрежных водах или при входе судна в речное русло (суда смешанного плавания) и изменении глубины фарватера. Проблемы возникают в связи с тем, что у судна имеются некоторые скрытые динамические особенности [2], которые могут проявиться при попадании объекта управления в некоторое фазовое пространство – определённое сочетание управления, значения фазовых координат состояния и состояния внешней среды. В этом случае математическая модель значительно усложняется, количество коэффициентов, требующих коррекцию, возрастает, соответственно растет и время на оценку адекватности модели. В связи с этим определяются моменты времени, когда возможна оценка коэффициентов модели – переход на один из сценариев работы системы. Оставить судно без контроля в данной ситуации нежелательно, поэтому процедуры управления и идентификации модели разнесены физически, (разные контроллеры), а не во времени. Распределение времени работы системы управления представлено на рис.2.

Предлагается 3 сценария работы системы.

Первый сценарий. При удовлетворительных показателях процесса управления и отклонении реального состояния объекта от состояния, предсказанного моделью, работает программа управления судном без работы программ коррекции алгоритма и модели.

Второй сценарий. При удовлетворительном результате движения судна и несовпадении результатов опроса датчиков состояния и результатов модели запускается работа программы структурной и параметрической идентификации модели, заложенной во втором микроконтроллере.

Третий сценарий запускается, когда не удовлетворяют результаты управления и идет значительное отклонение результатов моделирования от показаний датчиков состояния

объекта. В этом случае включаются в работу и программа коррекции алгоритма управления (контроллер 1) и программа идентификации модели (контроллер 2). Таким образом, третий сценарий реализуется в первом и втором контроллере независимо.

При включении система работает по 1-му сценарию. По этому сценарию результаты опроса датчиков передаются в основной блок – «блок настройки алгоритма и выработки сигнала управления». Без изменения настроек алгоритма выработанный блоком сигнал выставляется на объект и его математическую модель. Алгоритм управления не перенастраивается до наступления нового цикла. При наступлении нового цикла блок «опроса датчиков состояния, анализа результатов моделирования и принятия решения о сценарии» на основании анализа (сравнения) информации с датчиков и математической модели принимает решение о допустимости использования математической модели для прогноза состояния объекта или коррекции модели, то есть решает вопрос о переходе ко 2 или 3-му сценарию.

При работе авторулевого в штатном первом сценарии выработанное решение об управлении тестируется предварительно на модели, результат возвращается в блок настройки. В случае, если результат тестирования (предсказание реакции объекта на выработанное управление) удовлетворительный, управление выставляется на объект. Если при работе идентификационного сценария блок опроса принимает решение о недопустимости использовать математическую модель для прогноза (например, ввиду изменившейся внешней среды), дальнейшая работа алгоритма развивается по 2-му сценарию – параметрической идентификации модели.

На рис. 3 представлены осциллограммы моделирования поведения речного водоизмещающего судна в различных условиях плавания: а) спокойная внешняя среда, коэффициенты алгоритма настроены; б) выход на мелководье; в) движение по мелководью, коэффициенты перенастроены.

На рис. 4 представлены осциллограммы натурных испытаний интеллектуального алгоритма управления движением судна, меняющего свою структуру и параметры в зависимости от состояния внешней среды. Испытания проводились на теплоходе «Леонид Соболев» на реке «Волга» в районе г. Рыбинска: а) переход с ручного управления на автоматическое и настройка алгоритма управления; б) управление от авторулевого; в) выход на мелководье и перенастройка алгоритма управления.

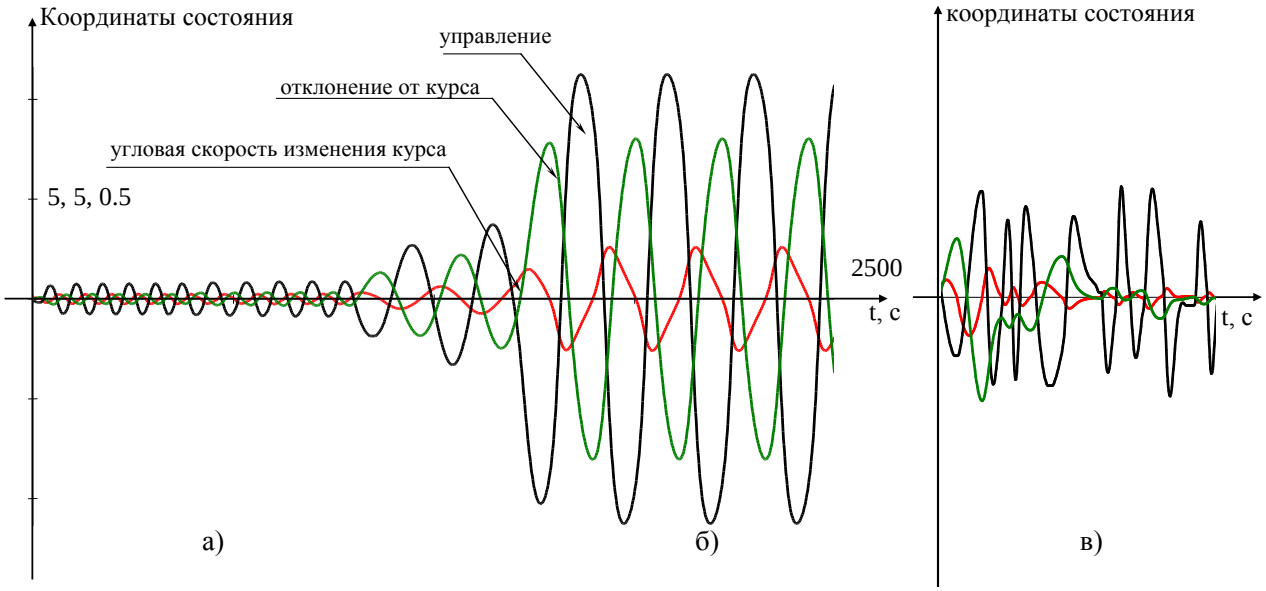


Рис. 3. Результаты моделирования поведения речного водоизмещающего судна в разных условиях плавания

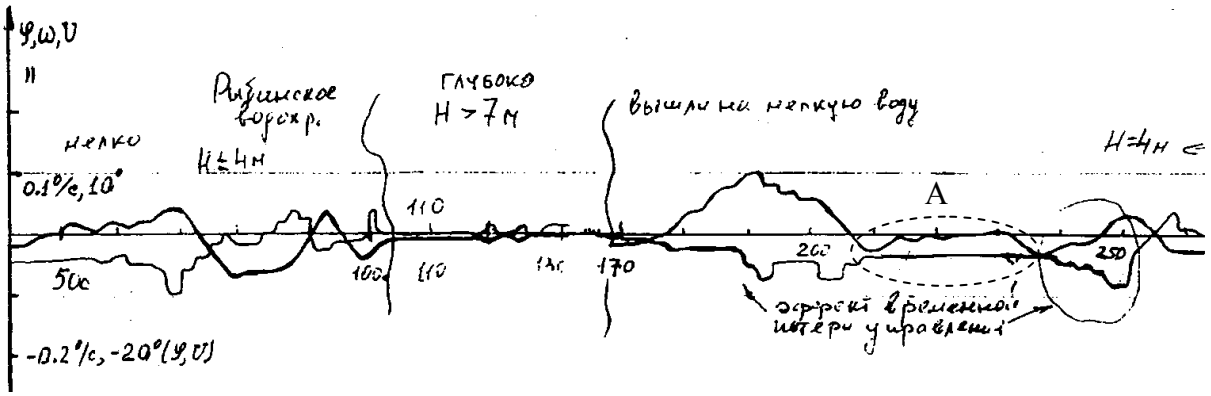


Рис. 4. Результаты натурных испытаний интеллектуального авторулевого

Предложенная структура системы позволит улучшить качество процесса управления подвижным объектом, а это будет способствовать улучшению технико-экономических показателей полностью автоматизированных систем.

Библиографический список

1. Поселенов Е.Н. Обоснование и разработка адаптивного алгоритма управления движением речного водоизмещающего судна на мелководье дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук [текст] / Е.Н. Поселенов – Н.Новгород. 2010. – 129 с.

2. Чиркова М.М. Разработка методов идентификации и управления движением неустойчивого на курсе объекта со скрытыми динамическими особенностями. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / М.М. Чиркова - Н.Новгород.1998. – 207с.

T. I. Gavrilova, E.N. Poselenov, M.M. Chirkova

THE JUSTIFICATION OF THE SCEME OF INFORMATION FLOWS IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

Volga State University of Water Transport

In this paper, a functional scheme and algorithm for the operation of the automatic control system is substantiated by examining the coordinates of the state of the ship as the most complex in the dynamics of a mobile object operating at the junction of two media and changing its aero and hydrodynamic characteristics, depending on the state of the external environment and loading ship. Three scenarios of the system operation are proposed with the switching of the information flow depending on the development of the situation (information about the coordinates of the state of the control object). The choice of the scenario is determined in the block "interrogation of sensors, analyzing simulation results and deciding on the scenario". Scenarios are implemented on independent microcontrollers.

Key words: automatic control systems, control algorithms, information flows, scenarios of system operation, mobile objects, the dynamics of objects.

УДК 004.9

А.М. Галошин, С.В. Логанов

РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА ИМИТАТОРА ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа просвещена разработке программного обеспечения тренажера имитатора для операторов нефтеперерабатывающей установки. Тренажер подготавливает персонал к действиям в штатных, нештатных и аварийных ситуациях на предприятии.

Ключевые слова: программное обеспечение; тренажер имитатор; многоуровневая архитектура.

На опасных производственных объектах требования к промышленной безопасности максимально высокие. Ключевыми видами деятельности промбезопасности являются подготовка и переподготовка персонала производственного объекта. Для этих целей разрабатывается тренажер имитатор, позволяющий сотрудникам отрабатывать действия согласно плану локализации аварийных ситуаций.

Основные функциональные требования к виртуальному тренажеру следующие:

1) возможность теоретической и практической подготовки персонала действиям в типовых аварийных ситуациях;

2) взаимодействие с объектами завода;

3) формирование и сохранение показателей процесса обучения каждого пользователя;

Для того, чтобы сделать подготовку персонала как можно более приближенной к реальности, виртуальный тренажер должен работать в многопользовательском режиме. Вся команда технического обслуживания должна иметь возможность оказаться на виртуальном объекте и совместно поработать на закрепление навыков эффективного устранения аварийных ситуаций. Количество одновременно работающих пользователей с системой не более 30. Тренажер должен функционировать на базе Microsoft Unity. Количество типовых аварийных ситуаций, проецируемых на тренажере, не более 100. Виртуальный тренажер должен иметь возможность обновлять базу аварийных ситуаций

Чтобы обеспечить такую работу виртуального тренажера была разработана информационная система, работающая в рамках корпоративной системы предприятия.

Информационная система (ИС) обеспечивает:

- авторизацию пользователя;
- обработку действий пользователя;
- вывод результата пользователю в ходе выполнения задания;
- возможность сохранения результата в БД.

Для реализации такой информационной системы будет использоваться трехуровневая клиент-серверная архитектура.

Клиентское приложение подключается к серверу приложений, который в свою очередь подключается к СУБД (рис. 1). На первом уровне располагаются основные GUI-компоненты, которые реализует основные функции тренажера, а также не имеют связи с БД. Данный блок выполняет простейшие операции авторизации пользователя, проверку правильности ввода данных. На втором уровне располагается сервер приложений, который отвечает за функциональную составляющую тренажера имитатора, а также осуществляет взаимодействия клиента с СУБД. На третьем уровне располагается сервер базы данных.

Что бы обеспечить безопасность и надежность обработки данных, сервер приложений и базы данных располагаются на отдельных компьютерах. При большом количестве пользователей необходим ненагруженный другими операциями сервер баз данных. Реализация сервера баз данных на отдельном компьютере, к которому подключается сервер приложения, позволит максимально быстро и без потерь обрабатывать большой объем данных.

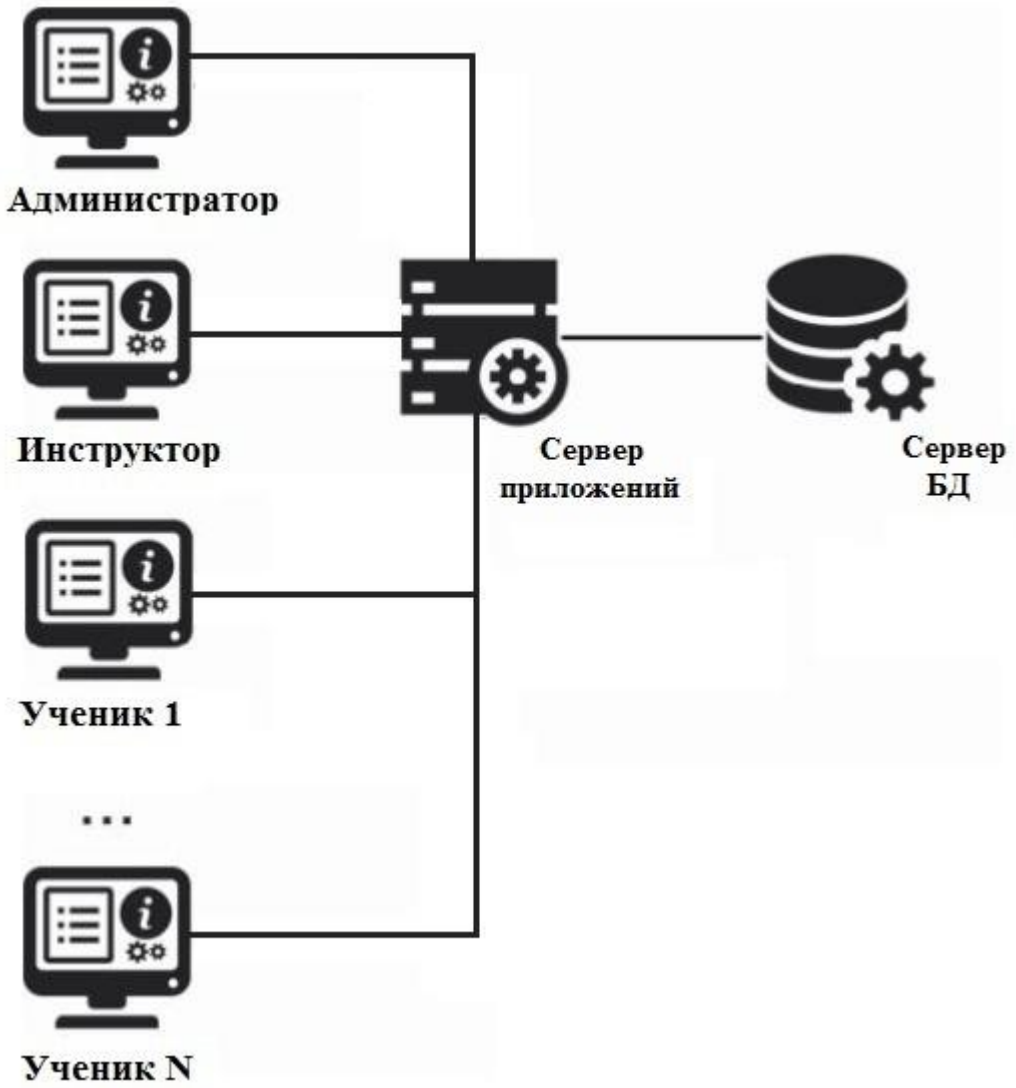


Рис. 1. Представление трехуровневой клиент-серверной архитектуры

Сервер баз данных содержит базы данных(БД):

- данные для авторизации;
- итоговые результаты с оценками результата действия каждого обучаемого.

Для структурированного доступа и извлечения данных используется СУБД MySQL.

Тренажер имитатор имеет три вида доступа:

- администратор;
- инструктор;
- ученик.

Каждый из доступов имеет свою функциональную задачу и вид интерфейса. Доступ к подсистеме управления инструкторами имеет только администратор. Данная подсистема позволяет создавать, удалять, редактировать и просматривать профили инструкторов, размещенные в базе тренажера имитатора. Также в базе находятся профили всех обучаемых, которых в систему добавляют инструктора через подсистему управления обучаемыми. Также в задачи инструктора входит создание курсов для обучения и контроль за результатами выполнения их обучаемыми.

Работа ученика на виртуальном тренажере начинается с авторизации. Данному пользователю доступны несколько режимов работы с тренажером:

- просмотр и изучение теоретического материала, который составляется по плану локализации аварийных ситуаций, содержащий возможные сценарии возникновения

и развития аварий, а также порядок действий персонала для минимизации последствий аварий объектах;

- прохождение курса обучения, который определяет инструктор для каждого пользователя;
- выполнение отдельных заданий, для прохождения наиболее сложных ситуаций, вне основного курса обучения.

После прохождения курса обучения пользователь проходит контрольную проверку знаний, умений и навыков. При получении неудовлетворительного результата индивидуальный курс пересматривается инструктором на основе ошибок, и цикл обучения повторяется заново.

Основой тренажера имитатора является 3D-модуль технологического объекта, который представляет собой приближенную к реальности виртуальную копию производственного объекта, со всеми основными вспомогательными объектами.

В виртуальном пространстве создаются те элементы реального объекта, которые имеют информационную нагрузку, к ним относятся:

- здания и сооружения, в которых перемещается персонал;
- технологическое оборудование, с которыми взаимодействуют сотрудники на реальном объекте (задвижки, регулируемые клапаны, пожарные краны, вентиля, и т.д);
- звук − объемное звуковое сопровождение при взаимодействии с объектами, звуки аварийных сигнализаций;
- освещение – расположение источников света (ламп, фонарей и других осветительных приборов). С помощью света имитируется время суток.

Элементы, с которыми не предусмотрено взаимодействие на объекте, не имеют тщательной прорисовки, для экономии системных ресурсов и времени, необходимое на их создание, а так же позволяет снизить системные требования к электронно-вычислительной машине.

Пользователь, попадая в виртуальное пространство тренажера-имитатора, может совершать в нем следующие действия:

- передвигаться по объекту;
- подниматься и спускаться по вертикальным лестницам;
- взаимодействовать с различными вентилями, задвижками и электроприборами;
- использовать средства пожаротушения (огнетушитель, лафетный ствол, пожарный гидрант);
- использовать средства индивидуальной защиты.

На рис. 2 и рис. 3 изображен прототип 3D-модели виртуального тренажера реально действующей нефтеперерабатывающей установки. Модель создана в среде AutoCAD и импортирована в Microsoft Unity 3D. Прототип содержит все основные объекты: колонны; рефлексные емкости; конденсаторы; теплообменники; подогреватели и т.д. Также вспомогательное оборудование: вертикальные лестницы; лестничные проемы; эстакады; трубопроводы; люки и т.д.

Функциональные возможности тренажера были разработаны на языке программирования C# в среде разработки Microsoft Unity 3D. Основным достоинством языка C# является то, что он поддерживает различные стили и технологии программирования, а так же взаимодействует с различными базами данных, в том числе MySQL, за счет средств ADO (ActiveX Data Objects) .NET.

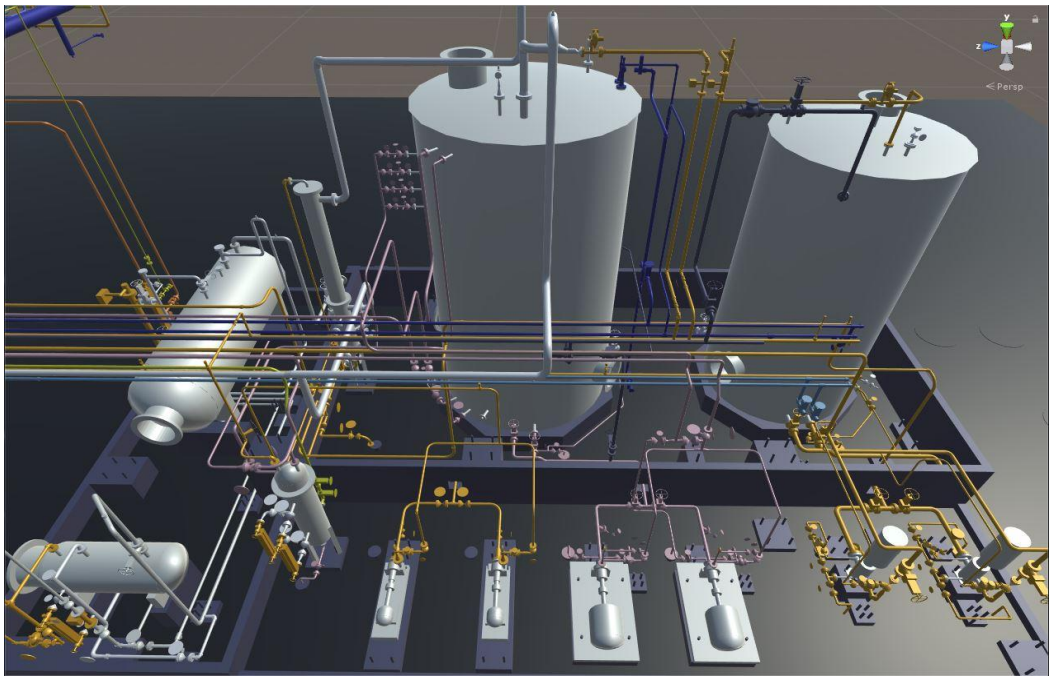


Рис. 2 − 3D модель объекта предприятия.

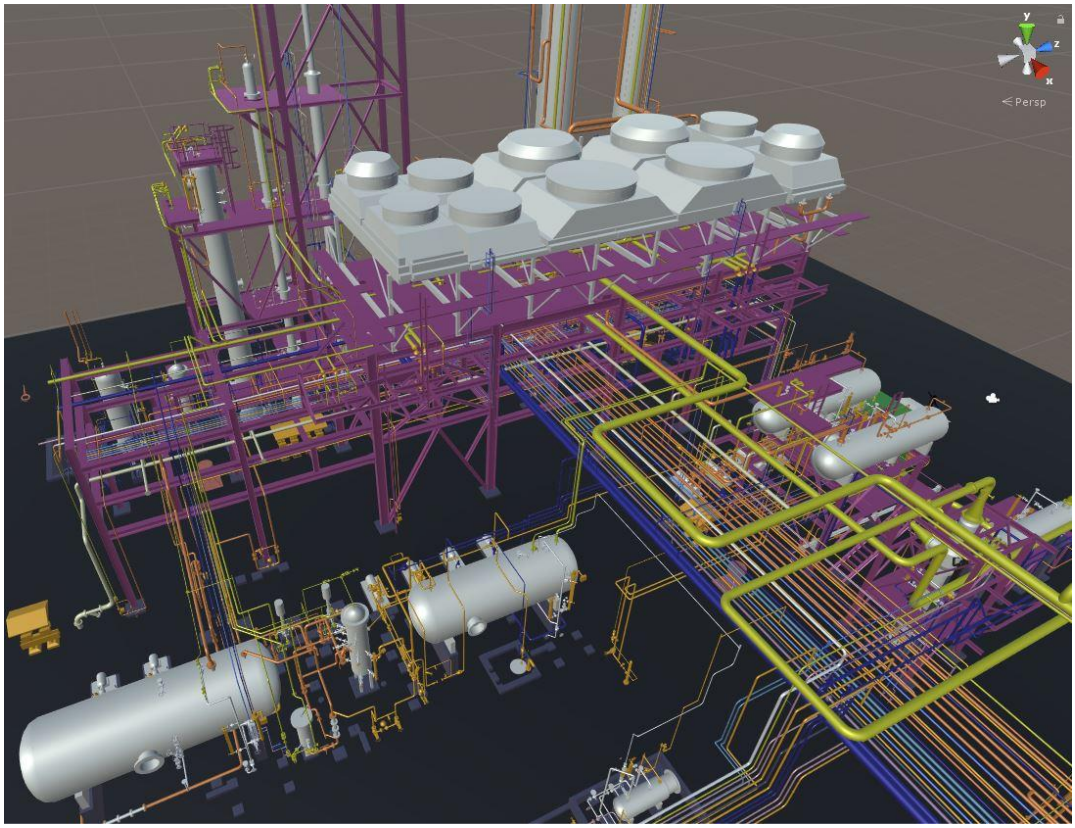


Рис. 3 − 3D модель предприятия.

Таким образом, разработанный тренажер при внедрении на предприятие даст возможность сократить количество аварий, возникающих из-за элементарных человеческих ошибок, а также поможет упростить подготовку персонала и предоставит возможность удобно обрабатывать и хранить результаты обучения.

Библиографический список

1. Фролов Д.А. Анализ видов компьютерных обучающих систем для подготовки персонала промышленного предприятия и современных технологий их построения / Д.А. Фролов // Инновационные информационные технологии. 2013. Т. 1. №2. С. 413-434.
2. Виштак Н.М. Функционально-структурная модель интеллектуальной обучаемой системы /Н.М. Витштак, Д.А. Фролов, Е.В. Варгина // Фундаментальные исследования. 2013.№ 11—5. С. 871-874.
3. Хисматуллин А.С. Методика технического обслуживания и ремонта промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию / А.С. Хисматуллин, А.Х. Вахитов, А. А. Феоктистов // Фундаментальные исследования 2016. № 2-2. С. 308-314.

A.M. Galoshin, S.V. Loganov

DEVELOPMENT OF THE IMITATOR SIMULATOR FOR OPERATORS OF OIL REFINING PLANT

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

Work is an enlightened development of the simulator software for the management of an oil refinery, which allows personnel to be trained to act in normal, abnormal and emergency situations at the enterprise.

Keywords: software; simulator; multilevel architecture.

УДК 519.4

Е.А. Гришенков

ПРОВЕРКА ИЗОМОРФИЗМА ГРАФОВ МЕТОДОМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ГЕОМЕТРИИ

ПАО Сбербанк

Цель работы: Разработать универсальный и многоцелевой метод упрощения процесса информационного отражения «картины мира» на основе геометрического подхода (группы перестановок) и обосновать его достоверность на задаче проверки изоморфизма графов.
Методология: объектами исследования послужили процесс перемешивания и сборки пазлов, многомерная структура данных из бинарного гиперкуба и заданной на нем бинарной функции. Использованы требования необходимой и достаточной сложности в иерархии сущностей и следующие предположения: 1) вместо дифференциальной геометрии применяется геометрия над двоичным полем; 2) картина внешнего мира содержит всю информацию о его развитии (фрактальность), 3) на всех уровнях детализации действует закон сохранения симметрии. Решались прямая и обратные задачи: 1) моделирование движения материи, получение картины мира (прямая); 2) воссоздание движения по картине мира – обратная задача.
Результат: Синтез прямой и обратной задач позволил выявить группу автоморфизмов бинарного N-куба мощностью (2**N)-1, предложена формула группы, проверено её выполнение при операциях элементов группы для произвольно больших N. Для N=3 построена матрица операции группы размера 128*128 и нормальной подгруппы 16*16. Применение выявленного свойства эквивалентности всех бинарных функций на гиперкубе к задаче определения изоморфизма графов позволило получить быстрое решение на больших размерах.
Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически.
Новизна: Проверка изоморфизма графов не является переборной задачей, решается как частный случай применения информационной геометрии. Группа автоморфизмов бинарного гиперкуба представляет собой универсальное средство понижения сложности.

Ключевые слова: информационная геометрия; изоморфизм графов; теория сложности; многомерная структура; автоморфизм бинарного гиперкуба.

Введение

В течение нескольких десятилетий задача установления изоморфизма графов привлекает многих исследователей [1-4], имеет особый статус в теории сложности вычислений. Она не поддается простой классификации по принадлежности классу P или классу NP, в отличие от сотен других задач. Поэтому эта задача выбрана в качестве достойного примера подтверждения работоспособности теории информационной геометрии, предложенной автором в работе (5) в 2004 г. Поскольку решение задачи установления изоморфизма графов является прямым следствием теории информационной геометрии, то первоначальная часть изложения посвящена её описанию.

Теория информационной геометрии разработана в качестве метамодельного описания процесса отражения картины мира и устранения источника разнообразия её описаний, одной из причин выходящей из-под контроля сложности [6,8]. Основная гипотеза теории в том, что многообразие изоморфных описаний порождается случайными выборами имен из 0 и 1 в пространстве бинарных признаков и управляется геометрией на основе группы подстановок.

В качестве абстрактной модели информационной системы и отражаемой картины мира на каждом уровне детализации рассматриваются два объекта и взаимоотношения между ними:

1) многомерная структура данных из бинарного гиперкуба (набор измерений);

2) заданная на вершинах бинарная функция (измеритель, один или несколько).

В многомерной структуре эти два объекты представлены на разных уровнях детализации, которые связаны операциями свертки-развертки измерителя по комбинациям измерений. Для бинарных данных грани между измерениями (пространство) и измерителем (процесс) формально стираются.

Это позволяет рассматривать пространство тоже как процессы, только более медленные или огрубленные, на фоне которых измеритель описывает свой процесс.

Свойства многомерной структуры с операцией свертки на основе сложения были ранее использованы автором [5,7] для разработки метода редактирования агрегатных значений с сохранением вычислительной целостности структуры. В данном случае, вводится новая операция свертки-развертки, обеспечивающая сохранение информации строки при распределении её по разным уровням структуры. Это некий аналог операции вычитания или даже апроксимации частной производной на сетке.

Задача о пазлах

Рассмотрим мысленный эксперимент, хотя можно проводить натурный, исследуя сложность отражения картины мира на процессе перемешивания и сборки пазлов. Возникают вопросы о том, каким законом управляется процесс сборки пазлов, это переборная задача или меньшей степени сложности? На листе бумаги в клетку есть матрица из **`2**N`** клеток-пазлов, **`N`**– четное целое, на каждом есть запись длины **`N`** бит из номера строки и столбца, на них также может быть нанесена произвольная бинарная функция, но это не обязательно, это для дальнейшего анализа. Разрежем эти пазлы и перемешаем.

Применим процедуру пошагового деления куч пазлов пополам с присвоением произвольного значения признака (**`0`** или **`1`**) одной из половин (куче пазлов) и противоположного значения другой половине. Записываем на каждом пазле бинарную строку с получающимися координатами текущей кучи. В результате **`N`** шагов деления куч пазлов получим, что на каждом пазле записалась уникальная строка длиной **`N`** бит - это двоичное число номера пазла в получившейся случайным образом системе координат. Другая система координат сформируется, если параллельно вести записи дополнительной строки на пазлах, от другого случайного процесса выбора **`0,1`**, при том же составе индивидуальных пазлов в кучах.

Сводку процесса представляет Таблица 1. Процесс деления пазлов описывается бинарным антисимметричным деревом, развертка которого приводит к бинарной матрице путей по дереву из **`N`** строк и **`2**N`** столбцов, см. Таблица 3. Переход между системами координат, реализуется перестановкой, представленной двумя номерами длиной **`N`** на каждом пазле как результат процесса выбора двух случайных систем координат.

Таблица 1. Сводка процесса деления пазлов для N=6.

Шаг	число куч	объем одной кучи, шт.	Параметров применено	Накопленная сумма независимых параметров
0	1	64	0	0
1	2	32	1	1
2	4	16	2	3
3	8	8	4	7
4	16	4	8	15
5	32	2	16	31
6	64	1	32	63

Всего получим **`(2**N)-1`** различных систем координат (63 для для N=6), из них одна выделенная, совпадающая с первоначальной нумерацией пазлов – единичная перестановка. На

Рис. 1 представлян вычислительный макет процесса деления пазлов. Области A и B для перестановок P1 и P2, области C и D для их произведений. Изменяя значения в желтых ячейках имитируется процесс деления и его результаты, остальные поля вычисляются.

Эксперименты на макете позволяют оперативно получить много информации и сделать выводы о характере процесса. Потом они проверяются на всем объеме данных, который, однако, быстро растет при росте числа уровней.

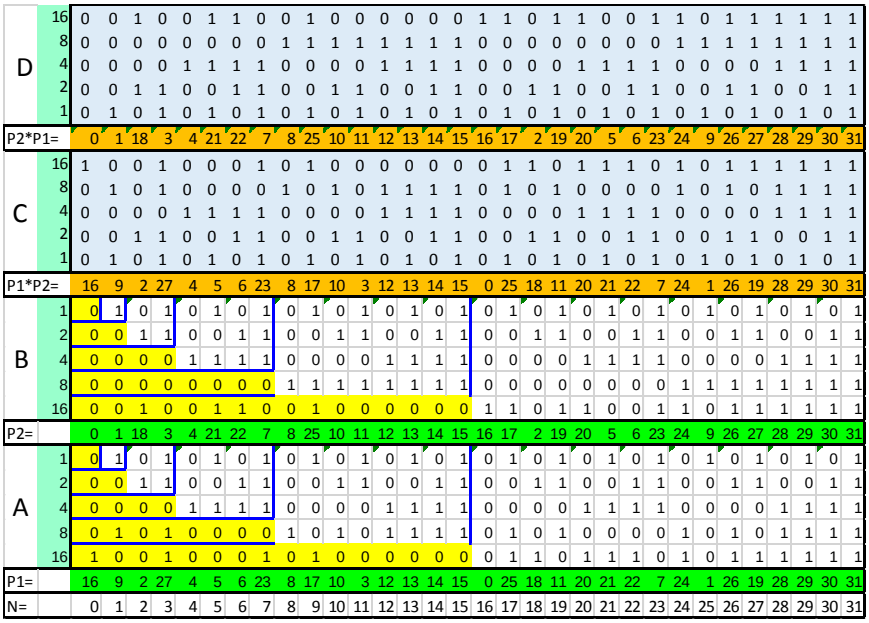


Рис. 1. Перестановки процесса деления пазлов-развертка антисимметричного дерева, левая ветвь (желтые поля) – область независимых параметров

Главный вывод заключается в том, что мы наблюдаем нелинейное взаимодействие нескольких уровней. Было проверено через матрицы Адамара, что это линейные преобразования в пространстве `2**N` измерений, которые так представляются в N мерном пространстве. Пробуем овладеть этой нелинейностью, не выходя в пространство 2^{**N} измерений, посредством операций свертки-развертки.

Операция свертки-развертки многомерной структуры представляется как приведение строки к антисимметричному виду с сохранением информации в другой строке выше по иерархии. Пусть задана строка бит **`F(n,j)`** длины **`2**n`**. Превратим её в антисимметричную: **`F(n,j+2**(n-1)=-F(n,j)`**, а потерянную информацию предварительно сохраним в другой строке **`F(n-1,j)`** половинной длины, по следующему правилу для каждой пары битов с номером **`j`**: **`F(n-1,j)=0, если F(n,j)= -F(n,j+2**(n-1)), иначе F(n-1,j)=1.`**

Будем шагами применять эту операцию свертки к ополовиненной строке, пока не получим строку длиной 1 бит **`F(0,1).`** В результате получим двоичное антисимметричное дерево высоты **`N+1`** с бинарными значениями в узлах, например, для **`N=3`**, см. Таблица 3. При этом информация первичной строки сохранилась в узлах дерева **`x0-x7`** и вся она может быть восстановлена обратной операцией развертки строк (многомерной структуры). Развертка же дерева заключается в периодическом повторении строк до длины 2^N, до матрицы размера **`N`** строк и 2^N столбцов, это перебор всех путей из вершины дерева в определенном порядке. При этом узел **`x0`** образует **`N+1`** строку из **`0`** и затем столько же из **`1`**. Она задает номер листа на котором матрица повторяется целиком. Смысл этого параметра обсуждается далее.

Проверку сохранения информации введеными операциями свертки-развертки строк достаточно провести на примере трех битов для всех комбинаций возможных значений строки **Z1Z2** и половины строки **K1**, см.

Таблица 2, где знак + это сложение по модулю 2, а знак - смена бинарного значения. В стандартных программах обработки многомерной структуры (например, SAS MDDB, MS Excel Pivot Table) не предусмотрены нужные нам операции свертки –развертки чтобы обеспечить сохранность информации. Однако их можно использовать корректируя данные, как показывает

Таблица 2. Столбцы полученной матрицы путей по сути есть двоичные представления значений некоторой перестановки вершин бинарного гиперкуба.

Таблица 2. Сохранение информации операциями свертки-развертки на примере трех бит Z1, Z2, K1

Z1	**Z2**	Свертка **K1=Z1+(-Z2)**	**-Z2**	**-K1**	Развертка **Z2=Z1+(-K1)**
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0
1	1	1	0	0	1

Формула ИГ - матрица путей по двоичному антисимметричному дереву

Веса значений берутся в возрастающем порядке от **2**0** до **2**(N-1)**, при нулевых значениях в узлах двоичного дерева перестановка единичная. Например, для **N=3** матрица имеет следующую структуру, где параметры в узлах дерева **Xi** из {**0,1},i=0,…,7,**знак минус понимается как инверсия значений **0,1**, Таблица 3.

Таблица 3. Формула ИГ - результат симметризации строки для N=3.

F(0,j)=	**X0**	**X0**	**X0**	**X0**	**X0**	**X0**	**X0**	**X0**
F(1,j)=	**X1**	**-X1**	**X1**	**-X1**	**X1**	**-X1**	**X1**	**-X1**
F(2,j)=	**X2**	**X3**	**-X2**	**-X3**	**X2**	**X3**	**-X2**	**-X3**
F(3,j)=	**X4**	**X5**	**X6**	**X7**	**-X4**	**-X5**	**-X6**	**-X7**
J =	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**

Значение перестановки описывается функцией **F(j)=F(1,j)*1+F(2,j)*2+F(3,j)*4.** При условии **Xi=0,i=1,…,7** получаем единичную перестановку **F(j)=j.**

Свойство фрактальности состоит в возможности строить неограниченной высоты бинарное дерево, обеспечивая достижения детализации картины мира в широком диапазоне масштабов.

Операция развертки

Она обратна операции свертки, и выглядит как лестница обратных преобразований, например, для первых двух строк:

```
F(1,j)= X1(-X1+X0);
F(2,j)= X2 X3 (-X2+X1)(-X3-X1+X0);
```

В результате после **N** шагов получим исходную бинарную функцию. Из формул видно, что значение **X0** на каждом уровне влияет только на самый правый символ строки.

Группа автоморфизмов бинарного гиперкуба и её структура

Количество параметров бинарного антисимметричного дерева высоты **N** равно **(2**N)-1**, что равно мощности множества бинарных функций на **N** мерном гиперкубе (с точностью до одного бита). По формулам развертки **X0** влияет на последний бит на каждом уровне детализации.

Для задач идентификации картины мира это не существенно и аналогично разнице в числе делений на шкале и числе интервалов между нимим.

Прямыми вычислениями проверено наличие группы перестановок мощности **(2**N)-1** для **N<=3** и нет сомнений в её наличии для больших **N.** Для двоичного дерева **N=3** выполнены умножения каждой перестановки с каждой, результат составил квадратную матрицу размера 128 из 128 различных перестановок. Это операция группы, она не является симметричной - группа не коммутативная. Единичный элемент – тождественная перестановка, обратный элемент для каждой перестановки F(j), представленной двумя столбцами j и F получается сортировкой по F и переименованием J(f). Умножение перестановок **F1(j)** и **F2(j)** реализуется как **select t1.j,t2.F2 where t1.F1=t2.j .**

Факторизация группы автоморфизмов

Для случаев когда все параметры в узлах дерева равны нулю, кроме одного нижнего уровня, получается группа с симметричной матрицей операции, см. Таблица 4, назовем её **H(N),** а группу автоморфизмов **G(N)**. Эксперименты показывают разложение группы G(N) на смежные классы по группе **H(N),** причем смежные классы образует группа **G(N-1).** В качестве гипотезы предположим, что имеем иерархию разложений, аналогичную иерархии бинарного гиперкуба и бинарной функции на нем.

Экспериментальная часть, проверка изоморфизма.

В оответствие с теорией ИГ поставлен численный эксперимент по проверке изоморфизма графов, представленных матрицей смежности. Если матрица смежности графа имеет размер **2**N**, тогда имеем бинарную функцию длины **2**2N**. Свернем её в матрицу антисимметричного дерева **2N** раз, получив **F1(j)**, то же для целевого графа, получив F2(j). Если целевой граф получается перестановкой **P(j)** из исходного о графа **F2(j)=P(j)*F1(j),** то преобразование определяется формулой **P(j)=F2(j)*J(F1).** Далее проверяем как это преобразование **P(j)** действует на другой граф, который содержит только диагональные узлы. Если диагональ сохраняется при действии преобразования, то это значит, что перестановки строк и столбцов матрицы смежности графа совпадают, значит графы изоморфны, иначе они не изоморфны.

Некоторые результаты представляет Рис. 2. Здесь S1 и S2 два изоморфных графа (трехмерный куб), S3 испорченный изоморфизм, S4 – диагональ для проверки одинаковости перестановок строк и столбцов. Вычисления подтверждают теорию.

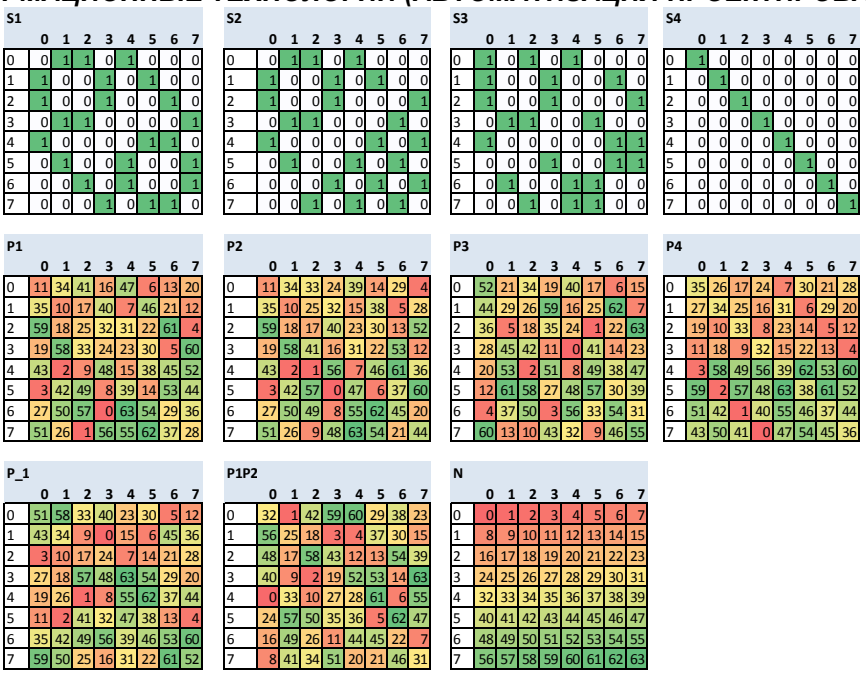


Рис. 2. Изоморфные графы S1, S2, нарушение изоморфизма у графа S3, граф S4 – диагональ. Ниже приведены соответствующие графам перестановки, обратная P_1 и произведение P1*P2.

Таблица 4. Симметричная матрица операции группы ИГ при нулевых параметрах 1,2 строки.

01234567	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
01274563	1	0	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
01634527	2	3	0	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
01674523	3	2	1	0	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
05234167	4	5	6	7	0	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
05274163	5	4	7	6	1	0	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
05634127	6	7	4	5	2	3	0	1	14	15	12	13	10	11	8	9
05674123	7	6	5	4	3	2	1	0	15	14	13	12	11	10	9	8
41230567	8	9	10	11	12	13	14	15	0	1	2	3	4	5	6	7
41270563	9	8	11	10	13	12	15	14	1	0	3	2	5	4	7	6
41630527	10	11	8	9	14	15	12	13	2	3	0	1	6	7	4	5
41670523	11	10	9	8	15	14	13	12	3	2	1	0	7	6	5	4
45230167	12	13	14	15	8	9	10	11	4	5	6	7	0	1	2	3
45270163	13	12	15	14	9	8	11	10	5	4	7	6	1	0	3	2
45630127	14	15	12	13	10	11	8	9	6	7	4	5	2	3	0	1
45670123	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Выводы

Теория информационной геометрии представляет оригинальный подход для решения задачи изоморфизма графов, подтверждённый экспериментально. Свойство эквивалентности бинарных функций на гиперкубе позволяет непосредственно сравнивать изоморфные графы как движения фигур в геометрии. Сложность задачи оценивается сложностью сортировки.

Центральным явлением теории информационной геометрии является фрактальное бинарное антисимметричное дерево, к нему приводят различные подходы: 1) задача о сложности процесса перемешивания пазлов; 2) многомерная структура данных из сверток измерителя по комбинациям измерений с предложенной операцией свертки-развертки, сохраняющей информацию строки измерителя; 3) отражение всех возможных вариантов развития построением бинарного гиперкуба путем удвоения вершин с разрешением менять ориентацию возникающих ребер – аналог Лагранжевой системы координат в гидродинамике.

Развертка антисимметричного дерева образует формулу информационной геометрии – ограниченное и замкнутое множество перестановок, представляющее группу `G(N)` автоморфизмов бинарного гиперкуба мощностью `(2**N)-1`, которая факторизуется на свои подгруппы мощностью `2**(N-1)` от каждого уровня детализации. Таким образом, это множество

перестановок снабжено двумя операциями, их предстоит исследовать и придать физический смысл.

Теория информационной геометрии обеспечивает сопоставимость по информационной сложности управляющего объекта и объекта управления на каждом шаге детализации, что позволяет ей стать фундаментом моделирования информационных процессов отражения, поглощения, адаптации, развития, управления в различных смыслах в разных отраслях знания.

Библиографический список

1. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи /Гэри М., Джонсон Д./: Пер. с англ.-М.; Мир, 1982. - 416 с.
2. Klarreich Erica.Algorithm Solves Graph Isomorphism in Record Time// https://www.quantamagazine.org/algorithm-solves-graph-isomorphism-in-record-time-20151214: Quanta Magazine, 2015 г.
3. Пролубников А.В., Прямой алгоритм проверки изоморфизма графов, тема диссертации и автореферат, 2004 г. // http://www.dissercat.com/content/pryamoi-algoritm-proverki-izomorfizma-grafov
4. Tevet, Ashay Dharwadker and John-Tagore. The Graph Isomorphism Algorithm. Tallinn : Proceedings Of The Institute Of Mathematics & The Structure Semiotics Research Group, 2009, ISBN-10: 1466394374. // http://www.dharwadker.org/tevet/isomorphism/
5. Гришенков Е.А., Информационная геометрия. //Тезисы докладов 2-й Московской конференции “Декомпозиционные методы в математическом моделировании и информатике”, Москва : ВЦ РАН, Москва, С. 50-51, 2004. // http://www.ccas.ru/Pavlovsky/confer/works.pdf
6. Dijkstra, Edsger W. The End of Computer Science?/Edsger W.Dijkstra// Communications of the ACM, March of 2001, vol.44, no.3, перевод: https://www.osp.ru/os/2001/12/180744
7. Гришенков Е.А., Построение концептуальной модели баз данных при помощи шаблона модели единого корпоративного пространства данных: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Гришенков Евгений Анатольевич; [Место защиты: Нижегор. гос. техн. ун-т]. - Нижний Новгород, 2010. - 24 с
8. Турчин В.Ф., Феномен науки: Кибернетический подход к эволюции. Изд. 2-е – М.: ЭТС. — 2000, 368 с., http://www.refal.ru/turchin/phenomenon/.

E.A. Grishenkoff

CHECKING THE ISOMORPHISM OF GRAPHS METHOD OF INFORMATION GEOMETRY

PJSC Sberbank

The goal of the work: Develop a universal and multipurpose method for simplifying the process of information reflect the "world view" on the basis of the geometric approach (permutations) and justify its validity on the task of graph isomorphism validation.

Methodology: the objects of research served as a multidimensional data structure from the binary hypercube and the specified binary function on it, the process of cutting, mixing and assembling puzzles. Used requirements necessary and sufficient complexity in the hierarchy of entities. Used following assumptions: 1) instead of differential geometry applied geometry over the binary field; 2) painting the outside world contains all the information about its development (fractal); 3) at each level of granularity applies the law of conservation of symmetry. Dare direct and inverse problems: 1) modeling the

movement of matter, getting a picture of the world-direct problem; 2) the re-establishment of the traffic on the picture of the world-an inverse problem.

The result: Synthesis of forward and reverse tasks revealed the Group of Automorphism of a binary N-cube by power (2**N) -1, offered a formula group, retrieved her execution operations group elements for arbitrarily large N, for N = 3 is built the matrix operation Group size 128 * 128 and normal subgroup 16*16. Using the equivalence of all binary functions on the hypercube allow to solve graph isomorphism definition task with a quick solution.

The scientific method: both conducted the study numerically and analytically.

Novelty: the Problem of testing isomorphism of graphs is not exhaustive task solved as a special case of the use of information geometry. The group of Automorphism of the binary hypercube is a universal means of lowering the difficulty.

Keywords: information geometry; graph isomorphism; complexity theory; multidimensional structure; an Automorphism of a binary hypercube;

УДК 621.6.31:519.85

К.И. Дикарев

К РАСЧЕТУ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С МНОГОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Предложен подход, позволяющий упростить расчет гидравлических режимов для систем водоснабжения путем условной декомпозиции моделей таких систем на ряд более простых сегментов. Найдены условия сопряжения для таких сегментов, выражаемые через согласование характеристик сегментов в узлах их соединения. В результате реализации подхода ожидается существенное сокращение времени расчета режимов для сложных систем водоснабжения.

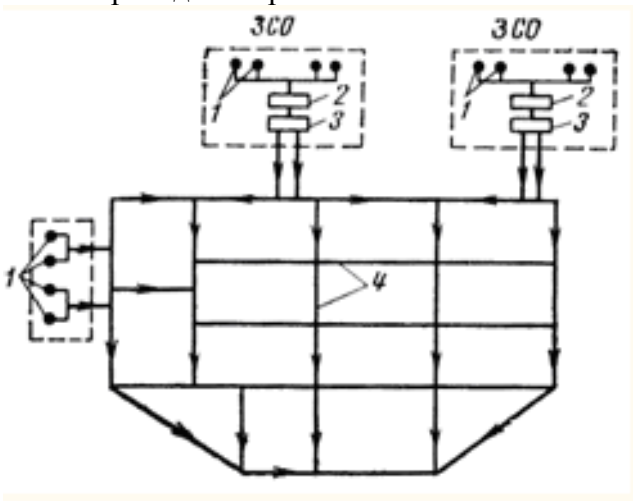
Ключевые слова: иерархическая система; активные элементы; водоснабжение; согласование характеристик, оптимальные режимы, многостороннее питание.

В работе [1] была рассмотрена модель обобщенной иерархической системы с активными и пассивными элементами, которая описывает режимы работы широкого спектра реальных технических и инженерных систем с сетевой структурой. Указанная модель, в частности, может быть конкретизирована на случай системы водоснабжения, что дает возможность ставить и решать задачи поиска оптимальных гидравлических режимов этих систем. Но в общем случае такие задачи относятся к классу NP-трудных задач [2], и алгоритмы их решения являются чрезвычайно трудоемкими, например, алгоритмы фронтального протягивания [3]. В то же время, на этапе практического проектирования или модернизации систем водоснабжения на ЭВМ часто требуется оперативное нахождение таких решений за приемлемое время.

Целью данной работы является поиск вариантов, позволяющих снизить время численного решения задач поиска оптимальных режимов для систем водоснабжения. В работе предлагается подход, позволяющий существенно упростить решение таких задач для моделей систем водоснабжения с многосторонним питанием. В основу указанного подхода положена декомпозиция модели системы водоснабжения на ряд моделей сегментов с более простой структурой, и определения условий согласования значимых параметров в местах сопряжения данных подсистем. Целесообразно в качестве упрощенных сегментов системы выбирать такие единицы, для которых являются хорошо разработанными алгоритмы расчета характеристик их функционирования.

В рамках исходной модели [1] иерархическая система представляется связным взвешенным ориентированным графом без петель и контуров. Вершины графа определяют элементы системы, а дуги – связи между элементами. Веса графа соответствуют характеристикам вершин. Различаются «входные» и «выходные» характеристики. На допустимые значения характеристик вершин налагаются интервальные ограничения. Элементы системы подразделяются на активные и пассивные. Для активных элементов системы применяются допустимые «управления», которые преобразуют входные характеристики в выходные с определенными «затратами». Характеристики элементов выбираются из допустимых областей значений. Пассивные элементы преобразуют входные характеристики в выходные без возможности применения управлений. В общем случае граф, моделирующий иерархическую систему, может иметь вершины, полустепени исходов которых равны нулю («выходные» элементы), полустепени заходов и исходов большие или равные единице («промежуточные элементы), полустепени заходов равны нулю («входные» элементы). Для каждого входного элемента и каждого выходного элемента определены значения параметров, характеризующих функционирование системы. Математическая модель рассматриваемой системы включает в себя ограничения для характеристик на входах и выходах элементов, условия согласования характеристик для входных и выходных элементов, а также условия баланса между входными и выходными характеристиками элементов.

Задачи определения оптимальных режимов на базе описанной модели требуют для решения значительных затрат вычислительных ресурсов ввиду их сложности [3]. Тем не менее, для отдельных вариантов схем водоснабжения с многосторонним питанием, для которых на магистральной сети не реализованы промежуточные насосные станции, имеется возможность упрощения описанной математической модели. Системы водоснабжения с многосторонним питанием характеризуются тем, что используется несколько источников водоснабжения, расположенных с разных сторон от контуров водопроводной сети [4]. Пример системы кольцевой системы водоснабжения с трехсторонним питанием без промежуточных насосных станций на магистральной сети приведен на рис.1.



1 - артезианские скважины;
2 - запасные резервуары;
3 - насосные станции подъема II
4 - водопроводная сеть города
ЗСО - зона санитарной охраны

Рис.1. Схема системы водоснабжения с трехсторонним питанием [4]

В указанном случае появляется возможность условно разделить систему водоснабжения на сегмент активных элементов – насосных станций, и на «пассивный сегмент», содержащий только пассивные элементы – трубные нитки и арматуру. При этом обобщенная математическая модель, описывающая режимы работы системы водоснабжения, может быть декомпозирована на две независимые модели, «сопряженные» друг с другом посредством условий согласования их характеристик. Рассмотрим эти модели подробнее.

Пусть рассматривается сегмент системы водоснабжения с многосторонним питанием, состоящий только из пассивных элементов, и моделируемый односторонне-связным взвешенным ориентированным графом без петель и контуров $G = (V, A)$, $A \subseteq V^2$, где множество вершин V графа определяется как множество узлов сопряжения труб системы, а множество дуг A – множество трубопроводных ниток, соединяющих данные узлы. Основными характеристиками будут давление и расход (количество характеристик равно 2). Обозначим через $V^{вых}$ – множество выходных элементов пассивного сегмента системы, $V^{вх}$ – множество входных элементов, в которых выполнено сопряжение с насосными станциями, $V^{вх} \subseteq V$, $V^{вых} \subseteq V$. Обозначим через P_{ij} – давление воды на выходе трубы $(i, j) \in A$, q_{ij} – расход воды по трубе $(i, j) \in A$, L_{ij}– длину трубы $(i, j) \in A$. Обозначим $P_b^{вх}$, $b \in V^{вх}$ значения давления воды, создаваемого насосными станциями, а через $P_e^{вых}$, $q_e^{вых}$, $e \in V^{вых}$ – соответственно значения давления и подачи воды, необходимые абонентам системы водоснабжения. Вектор

входных переменных трубы (i, j) определяется парой (P_{ki}, q_{ij}), $(i, j) \in A$, $(k, i) \in A$. Вектор выходных переменных трубы (i, j) определяется парой (P_{ij}, q_{ij}), $(i, j) \in A$. Соотношения модели пассивного сегмента системы водоснабжения, включающие в себя известные из гидравлики выражения для определения давления на выходе трубы [5], граничные условия, условия согласования давлений, и баланса в узлах системы (1-ый закон Кирхгофа) [5], приводятся ниже.

$P_{ij} = P_{ki} - q_{ij}^2 \cdot B \cdot L_{ij} + C \cdot \Delta H_{ij}$, $(i, j) \in A$, $(k, i) \in A$; $P_{bj} = P_b^{вх}$, $(b, j) \in A$, $b \in V^{вх}$; $P_{ie} = P_e^{вых}$, $(i, e) \in A$, $e \in V^{вых}$; $\sum_{j/(j,e)\in A} q_{je} = q_e^{вых}$; $P_{ij} = P_{ki}$, *если* $(i, j) \in A$; $\sum_{i/(i,j)\in A} q_{ij} = \sum_{k/(j,k)\in A} q_{jk}$, $i, k \in V$, $i \neq b$, $k \neq e$, $b \in V^{вх}$, $e \in V^{вых}$.

Здесь B и C – постоянные коэффициенты, зависящие от конфигурации трассы системы водоснабжения, от геометрических и гидравлических характеристик труб и арматуры, ΔH_{ij} – перепад высот между концами трубы (вершинами дуги) $(i, j) \in A$.

Для определения гидравлических режимов пассивного сегмента системы водоснабжения с помощью вышеприведенной модели могут быть использованы известные итерационные алгоритмы, например алгоритм метода узловых давлений [5,6].

Далее рассмотрим модель сегмента системы водоснабжения, состоящего из активных элементов – насосных станций второго подъема с параллельных соединением насосов с регулируемым приводом [7]. При постановке задач оптимизации на основе данной модели учитывается функциональная зависимость, связывающая установленную для каждого насоса целевую функцию с подачей насоса, при условии, что требуемый выходной напор и плотность перекачиваемой воды фиксированы. В частности, в качестве целевой функции может выступать коэффициент полезного действия каждого насоса, который необходимо максимизировать.

Здесь указанная нелинейная зависимость целевой функции от подачи насоса аппроксимируется посредством конечного числа кусочно-линейных участков. При этом весь диапазон подачи воды каждого из насосов разбивается на n равных подинтервалов, и исходная зависимость представляется на каждом из них посредством линейной функции.

Множество всех насосных агрегатов отдельного активного элемента (станции) $\nu \in V^a$ разделим на подмножества, которые будем называть «группами», предполагая, что каждая группа содержит множество насосов с близкими характеристиками. Пусть $i = \overline{1, m^\nu}$ - номера групп насосных агрегатов, $j = \overline{1, n^\nu}$ - номера подинтервалов, на которые дискретизированы возможные значения подачи воды для всех групп насосов на станции. Обозначим через: $m_i^{\nu-}$ и $m_i^{\nu+}$, соответственно, минимально возможное и максимально допустимое число насосных агрегатов i-ой группы, которые могут быть задействованы, $i = \overline{1, m^\nu}$, $\nu \in V^a$; $Q_{ij}^{\nu-}$ и $Q_{ij}^{\nu+}$, соответственно, минимально возможный и максимально допустимый объемы подачи воды, которые могут быть обеспечены i-ым насосом, если его производительность будет соответствовать j-ому интервалу, $0 \le Q_{ij}^{\nu-} \le Q_{ij}^{\nu+}, i = \overline{1, m^\nu}$, $j = \overline{1, n^\nu}, \nu \in V^a$; h_{ij}^ν и f_{ij}^ν - коэффициенты линейной функции, определяющей зависимость целевой функции насосного агрегата i от его подачи воды при работе в подинтервале j допустимых подач воды, $i = \overline{1, m^\nu}$, $j = \overline{1, n^\nu}, \nu \in V^a$; $Q_\nu^{вых}$ – плановый объемный расход воды в выходном коллекторе станции, который должен быть обеспечен, $\nu \in V^a$.

Введем варьируемые параметры математической модели. Обозначим через x_i^v - количество насосов i-ой группы, которые будут работать на станции в рассматриваемом периоде, $i=\overline{1,m^v}$, $v\in V^a$; y_i^v - объем подачи воды, который будет обеспечен насосом i-ой группы, $i=\overline{1,m^v}$, $v\in V^a$; $z_{ij}^v=1$, если насос i-ой группы будет работать в j-ом интервале допустимых объемов подач воды, и $z_{ij}^v=0$, в противном случае, $i=\overline{1,m^v}$, $j=\overline{1,n^v}$, $v\in V^a$.

Тогда математическая модель работы насосов станции $v\in V^a$ включает следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^{m^v} x_i^v y_i^v = Q_v^{вых};\ m_i^{v-}\le x_i^v\le m_i^{v+},\ i=\overline{1,m^v},\ v\in V^a;\ \sum_{j=1}^{n^v} z_{ij}^v Q_{ij}^{v-}\le y_i^v\le \sum_{j=1}^{n^v} z_{ij}^v Q_{ij}^{v+},\ i=\overline{1,m^v},\ v\in V^a;$$

$$\sum_{j=1}^{n^v} z_{ij}^v=1,\quad i=\overline{1,m^v},\quad v\in V^a;\quad x_i^v-целые,\quad y_i^v\ge 0,\ i=\overline{1,m^v},\ v\in V^a;\quad z_{ij}^v\in\{0,1\},\quad i=\overline{1,m^v},$$

$j=\overline{1,n^v}$, $v\in V^a$.

Ограничения модели включают в себя условия обеспечения требуемого расхода воды на выходе станции согласно графику, ограничения по возможному количеству используемых насосных агрегатов, а также по возможной подаче воды каждым из насосов, условие существования лишь одного «рабочего» интервала производительности по объему воды для каждого насоса, и естественные условия на переменные.

Для расчета эффективных гидравлических режимов насосной станции также необходимо получение для каждого насоса функциональной зависимости целевой функции от объема подачи воды.

Критерием для рассматриваемой задачи оптимизации режима работы насосной станции $v\in V^a$ выступает функционал, зависящий от значения давления воды $P_v^{раб}$, $v\in V^a$ в выходном коллекторе станции,

$$F^v\left(\vec{y}^v, Z^v, P_v^{раб}\right)=\frac{1}{m^v}\cdot\sum_{i=1}^{m^v}\sum_{j=1}^{n^v}\left(h_{ij}^v y_i^v + f_{ij}^v\right)z_{ij}^v\to extr,\ v\in V^a,$$

который представляет собой аддитивную свертку критериев, в основе каждого из которых лежит линеаризованная зависимость целевой функции для i-го типа насоса на допустимом j-ом интервале расходов воды. При этом функционал $F^v\left(\vec{y}^v, Z^v, P_v^{раб}\right)$, соответственно, является обобщенной целевой функцией для задачи оптимизации режима станции $v\in V^a$ при условии, что все группы насосов i, $i=\overline{1,m^v}$, $v\in V^a$ имеют равные значимости с точки зрения нахождения экстремума целевой функции для каждого из них.

Решение поставленной задачи определяет, какие насосы и с какими объемами подачи должны работать в рамках станции. Задача является задачей частично-целочисленного математического программирования с нелинейными ограничениями, и относится к классу NP-трудных задач [2]. Тем не менее, размерности реальных прикладных задач позволяют использовать переборную схему для нахождения их оптимального решения [7,8].

Значимыми характеристиками вышеописанной модели активных элементов системы водоснабжения являются рабочие давления воды в выходном коллекторе насосной станции, $P_v^{раб}$, $v\in V^a$, и плановые расходы воды на выходе станции $Q_v^{вых}$, $v\in V^a$. Здесь V^a – множество активных элементов (насосных станций второго подъема) модели системы

водоснабжения. Очевидно, что $\left|V^{вх}\right| = \left|V^{a}\right|$, и между множеством входных элементов пассивного сегмента системы $V^{вх}$ и множеством V^{a} имеется взаимно-однозначное соответствие. Пусть, для определенности, $V^{a} = \left\{\nu_1, \ \nu_2, \ \ldots \ \nu_{\left|V^{a}\right|}\right\}$, где $\nu_i, i = \overline{1, \left|V^{a}\right|}$ – номера активных элементов, совпадающие с номерами входных узлов пассивного сегмента, в которых выполнено сопряжение с данными активными элементами: $\nu_i = b$, $\nu_i \in V^{a}$, $i = \overline{1, \left|V^{a}\right|}$, $(b, j) \in A$, $b \in V^{вх}$. Тогда, условия согласования основных характеристик в узлах сопряжения активных элементов и пассивного сегмента запишутся как

$$P_b^{вх} = P_b^{раб},\ (b, j) \in A,\ b \in V^{вх};\quad \sum_{e\,/\,e \in V^{вых}} q_e^{вых} = \sum_{b\,/\,b \in V^{a}} Q_b^{вых},\ e \in V^{вых},\ b \in V^{a}.$$

Вышеприведенные согласующие соотношения включают в себя условия равенства давлений в месте сопряжения активных и пассивных элементов, и условия баланса расходов воды.

В результате предложенной декомпозиции математической модели эффективность решения задач поиска оптимальных режимов для систем водоснабжения с многосторонним питанием на многопроцессорных ЭВМ может быть существенно повышена.

Выводы

Предложена математическая модель для частного случая систем водоснабжения с многосторонним питанием, получаемая на основании декомпозиции модели обобщенной иерархической системы с активными и пассивными элементами на ряд сегментов с упрощенными моделями, для которых имеются эффективные алгоритмы расчета их характеристик.

Определены условия согласования характеристик в узлах сопряжения сегментов, дающие возможность решения задач расчета режимов для исходных обобщенных систем водоснабжения за более короткое время.

Реализация рассмотренной схемы декомпозиции способна повысить эффективность расчетного определения оптимальных режимов работы для систем водоснабжения с многосторонним питанием без промежуточных насосных станций на магистральной сети.

Библиографический список

1. Прилуцкий, М.Х. Распределение ресурсов в иерархических системах с активными элементами / М.Х.Прилуцкий, К.И. Дикарев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – № 5(2). – С. 181-189.
2. Garey, M. R., Johnson, D. S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, ISBN 0-7167-1045-5. W.H. Freeman, , 1979. – pp. 206.
3. Дикарев, К.И. Оптимизация режимов функционирования систем водяного отопления. / К.И. Дикарев, С.В. Фотин, Н.В. Фотина // Альтернативная энергетика и экология. – Саров: НТЦ «ТАТА», 2013. – № 6(1). – С. 30-36.
4. Электронный ресурс http://studepedia.org/index.php?vol=1&post=2925
5. Сеннова, Е.В. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем / Е.В. Сеннова, В.Г. Сидлер. – Новосибирск: Наука. 1987. – 222 с.
6. Дикарев, К.И. Математические модели распределения материальных ресурсов в графовых системах заданной структуры / К.И. Дикарев // Промышленные АСУ и контроллеры. – М.: Изд-во «НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ», 2012 – № 9– С.14-18.
7. Костюков, В.Е. Распределение ресурсов в иерархических системах. Оптимизационные задачи добычи, транспорта газа и переработки газового конденсата: Учебное пособие / В.Е. Костюков, М.Х. Прилуцкий. – Н.Новгород.: Изд-во ННГУ, 2010.–78 с.

8. Дикарев К.И. Применение параллельной вычислительной среды в задачах поиска оптимальных режимов насосных станций / К.И. Дикарев // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XVI Международной конференции»/ под ред. Р.М. Шагалиева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. – С. 108-112.

K.I. Dikarev

ON HYDRAULIC MODES CALCULATION OF WATER SUPPLY SYSTEMS WITH A MULTILATERAL FEED

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Purpose: The purpose of the work is searching of decisions, which allow the time decreasing of optimum modes search problems solutions for water supply systems. The approach, allowing hydraulic modes finding simplification for water supply systems with a multilateral feed, is offered. It achieved by conditional decomposition of systems models on a number of simplified segments. The conjugate conditions for such segments, adding up to characteristics accordance of segments at their connection places are found. The considered decomposition realization is capable to increase efficiency of optimum operating modes searching for multilateral feed water supply systems.
Approach: The investigation was considered analytically.
Findings: Novelty of research results consists in adaptation of hierarchical models systems tools for modeling of water supply modes for networks with a multilateral feed. The results can have application in the field of practical designing and modernization of water supply systems.
***Key words*:** hierarchical system; active elements; water supply; characteristics accordance, optimum modes, multilateral feed.

УДК 004.423.2+004.432.2

А. А. Емельянов

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОБРАЗА ФУНКЦИИ КАК ОДИН ИЗ ИНСТРУМЕНТОВ МЕТАВЫЧИСЛЕНИЙ

Волжский государственный университет водного транспорта

В данной работе приведен краткий обзор основных направлений метавычислений и рассматривается задача вычисления образа функции с точки зрения ее применения в рамках метавычислений. Основным посылом работы является применимость метода вычисления образа функции к решению задачи инверсного вычисления, которая в свою очередь является одной из трех основных операций метавычислений.

Ключевые слова: метавычисления, образ функции, инверсное вычисление.

Анализ исходных кодов программ на языках программирования различного уровня имеет огромное значение в сфере разработки программного обеспечения. Такой анализ применяется для поиска реальных и потенциальных ошибок в исходном коде программы, для подготовки исходного кода программы к компиляции, трансляции или другому более глубокому анализу. Особое место в сфере разработки программного обеспечения занимают алгоритмы обработки исходных кодов. Примерами таких алгоритмов являются алгоритмы компиляции, трансляции, средства метапрограммирования и техники суперкомпиляции. Программы обработки исходных кодов являются необходимыми инструментами разработчика. Корректность таких инструментов так же сильно важна, как и точность инструментов измерения в таких сферах человеческой деятельности, как, например, строительство. Одним из перспективных трендов развития информационных технологий является метапрограммирование, которое объединяет в себе и понятие анализа и понятие синтеза (модификации) исходных кодов. В целом направление метапрограммирования можно охарактеризовать как один из существенных шагов в развитии отрасли, как ступень эволюции, которая выводит отрасль на новый этап развития. В [1] автором подробно и конструктивно рассматриваются подобные эволюционные скачки в контексте самых разных отраслей человеческой деятельности. В указанной выше работе В.Ф. Турчин называет их метапереходами, а указанную работу позиционирует как системное исследование природы метапереходов вне зависимости от контекста. Систему метапереходов можно рассматривать как обобщение эволюционных процессов в применении к самым разным естественным и искусственным объектам живой и неживой природы. Особое место в работе [1] занимает понятие языковых моделей, истории их развития и применение к ним теории метасистемных переходов. Автор утверждает, что языковые модели являются единственным материальным появлением феномена науки, а метасистемные переходы — центральный механизм эволюции человеческого знания.

На практике языковые модели непосредственно используются в программировании. Турчин успешно использовал теорию метасистемных переходов в программировании, что привело к существенному развитию идей метапрограммирования и метавычислений как самим автором, так и его последователями. Одним из наиболее известных показательных примеров применения метавычислений является так называемая проекция Футамуры-Турчина. [2-3] Суть этой проекции в том, что имея лишь две программы: интерпретатор некоторого языка программирования L написанный на некотором языке R и специализатор – программу вычисляющую проекцию заданной функции, автоматически можно получить результат компиляции любой программы на языке L в соответствующую ей программу на языке R, компилятор для языка программирования L и генератор компиляторов для произвольного языка, для которого определен интерпретатор. Другим ярким примером развития направления метавычислений является универсальный решающий алгоритм [4] — алгоритм, который доказывает возможность решения обратной вычислительной задачи (инверсное вычисление), алгоритм, который позволяет проводить так называемый окрестный анализ – эффективный инструмент для, например, автоматического тестирования программ. Следует также отметить, что универсальный решающий алгоритм (УРА)

является далеко не единственным успешным результатом поиска инструментов для решения задач инверсных вычислений. Существенные результаты также были получены в работах [5-8].

Некоторые из указанных выше работ, а именно [5,6], затрагивают еще одно из направлений в исследовании метавычислений – нестандартные семантики. Более подробно о нестандартных семантиках написано в [9]. В указанных работах наглядно демонстрируется мощь инструментов метавычислений как одного из проявлений теории метасистемных переходов – общей теории эволюции. А конкретно, в данных работах доказывается инвариантность целого класса инструментов метавычислений по отношению к используемому языку программирования. Так, например, в [6] показано, что алгоритм инверсного вычисления инвариантен к языку программирования, следовательно достаточно разработать инверсный вычислитель для любого полного по Тьюрингу языка программирования, чтобы в дальнейшем применить его для любого другого целевого языка программирования. Подобные результаты существенно повышают интерес к решению задач метавычислений в рамках специально создаваемых языков программирования, в рамках языков программирования, на которых осуществление метавычислений относительно упрощено. Полнота по Тьюрингу порой также может быть необязательным параметром, если это позволяет легко получать решение ключевых задач метавычислений для существенного класса исходных алгоритмов. Так, например, в работах [6,7] для исследования задач метавычислений рассматривается специальных язык программирования разработанный специально для описания инъективных функций. Этот факт делает язык узкоспециализированным, включает в язык нехарактерные для других языков программирования конструкции, но не смотря на все это упрощает процедуры вычисления обратной функции практически до замены выражений. В совокупности с фактом инвариантности задач инверсного вычисления результаты указанной выше работы покрывают существенный класс задач инверсного вычисления.

Инвариантность задач инверсного вычисления – это лишь пример тесной связи результатов исследований в области метавычислений. Природа метавычислений как одного из проявлений системы метапереходов такова, что каждый новый результат в этой области в совокупности с уже имеющимися результатами порождает лавинообразный всплеск теоретических выводов и направлений практического применения. Последнее говорит в пользу несомненной актуальности самых разных задач в области метавычислений для развития информационных технологий.

Одной из задач метавычислений является задача поиска образа функции. Здесь и далее под функцией будем понимать функцию в терминах языка программирования, то есть алгоритм или независимый участок исходного кода, который позволяет для любого значения из своей области определения получить соответствующее значение из области значений данной функции. В англоязычной литературе понятие области определения обозначается словом domain, а понятие области значений – codomain. Так для любой функции одного переменного представленной многочленом некоторой степени и определенной на всём множестве действительных чисел ее областью значений также будет множество действительных чисел. Но образ такой функции может быть иным. В зарубежной литературе понятие образ функции обозначается словом image. Отличие образа от области значений в том, что в отличии от области значений, для образа функции выполнено следующее условие: для любого значения **r** из образа функции **f** найдется такое значение **a**, что результатом применения функции **f** к значению **a** будет значение **r**. В качестве примера можно рассмотреть квадрат действительного числа. Здесь областью определения и областью значений будет множество действительных чисел. Но образом данной функции является множество действительных чисел больше или равных нулю.

В программировании задача поиска образа функции проявляет свою актуальность, например, при композиции методов автоматической обработки текстов на формальных языках, в частности на языках программирования. В некоторых случаях слепой композиции может быть недостаточно, и необходима также автоматическая, полуавтоматическая или произведенная вручную процедура доказательства ряда свойств полученного алгоритма. Одним из таких свойств может быть свойство тотальности. Свойство тотальности – это такое свойство алгоритма, при котором алгоритм позволяет за конечное время получить корректный результат для любого значения из

своей области определения. Алгоритм обладающий свойством тотальности не может привести к исключительной ситуации, зациклиться или завершиться каким-либо иным способом, кроме завершения с возвратом значения из соответствующей области допустимых значений. Очевидно, что свойство тотальности актуально для самых разных сфер применения информационных технологий. Особо можно отметить такие сферы как космическая, ядерная и военная промышленность, где гарантия ожидаемого поведения алгоритма при любых внешних условиях (входных данных) является буквально жизненно важным, центральным свойством. Что же получается при композиции двух функции. Пусть обе исходные функции обладают свойством тотальности. Очевидно, что это необходимое условие для тотальности их композиции. Рассмотрим их композицию немного подробнее терминах свойства тотальности. Оказывается несмотря на тотальность исходных функций функция являющаяся результатом их композиции может не быть тотальной. Такое может случиться если в композиции **f(g(x))** образ функции **g** окажется шире области определения функции **f**. В качестве примера можно привести линейную функцию и квадратный корень. Очевидно, что образом линейной функции кроме всего прочего являются отрицательные действительные числа, которые не могут быть использованы в качестве аргументов для квадратного корня, если, конечно, мы не рассматриваем множество комплексных чисел. При этом если рассматривать квадрат действительного числа и всё тот же квадратный корень, то уже здесь указанной выше проблемы нет. Можно сформулировать такой критерий: необходимым условием тотальности композиции **f(g(x))** является требование к образу функции **g** быть подмножеством области определения функции **f**. Для проверки указанного критерия очевидна необходимость вычисления области функции. Из этого вытекает актуальность задачи вычисления образа функции.

Библиографический список

1. Турчин В. Ф. Феномен науки: Кибернетический подход к эволюции. – 1993.
2. Бульонков М., Филаткина Н. Теория программирования. – 2014.
3. Абрамов С. М., Пармёнова Л. В. Метавычисления и их применение. Суперкомпиляция //Институт программных систем РАН. – 2006.
4. Abramov S., Glück R. Principles of inverse computation and the universal resolving algorithm //The essence of computation. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. – С. 269-295.
5. Glück R., Klimov A. Metacomputation as a tool for formal linguistic modeling //CYBERNETICS AND SYSTEMS'94. – 1994.
6. Glück R., Kawabe M. A program inverter for a functional language with equality and constructors //Asian Symposium on Programming Languages and Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. – С. 246-264.
7. Glück R., Kawabe M. Derivation of deterministic inverse programs based on LR parsing //International Symposium on Functional and Logic Programming. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – С. 291-306.
8. Glück R., Kawada Y., Hashimoto T. Transforming interpreters into inverse interpreters by partial evaluation //ACM SIGPLAN Notices. – ACM, 2003. – Т. 38. – №. 10. – С. 10-19.
9. Abramov S., Glück R. Combining semantics with non-standard interpreter hierarchies //International Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. – С. 201-213.

A.A. Emelyanov

COMPUTATION OF A FUNCTION IMAGE IN TERM OF TOOLS OF THE METACOMPUTATION

Volga state university of water transport

In this paper the brief review of the basic direction of metacomputation was written and the task of a function image computation was observed. The main idea of the paper is applicability of the function image computation approach for solving the task of the inversion computation, which is one of three main macomputation operations.

Keywords: metacomputation, function image, inversion computation.

УДК 658.5.012.2

М.А. Ивлев

ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ КАК КОМПОНЕНТ ТЕОРИИ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТОВАРНОГО ПРОДУКТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается возможность применения одного из известных теоретических подходов к моделированию процессов производства и потребления товарного продукта – принципа информационной инвариантности к решению задачи управления производственной организацией при концептуальном проектировании продукта с новым качеством и проблем повышения качества (развития) выпускаемого продукта. Сейчас в этой области используются эвристические подходы, интуитивных характер которых обусловливает вероятные ошибки при принятии управленческих решений, цена которых тем больше, чем раньше они допущены. Поставленная цель может быть достигнута за счет разработки автоматизированной системы поддержки принятия решений, создание которой предусматривает построение семантической и абстрактной теории новых моделей управления. В качестве основы первой предлагается принять известную теорию субъективной реальности и информационной инвариантности.

Ключевые слова: внешнее проектирование продукта, формализованная схема управления.

Введение

В области формализованного описания производственных систем (ПС) при проектировании товарного продукта наименее структурированы объекты и процессы управления ПС на так называемых внешних стадиях - стадиях, предшествующих конструкторско-технологической разработке. Управление осуществляется лицом, принимающим решения (ЛПР) на эвристической основе, опираясь на известные примеры успешных практик. При этом субъективность управления обусловливает отсутствие его целенаправленности и, как следствие, - ошибки в принятии решений ЛПР. Негативные последствия этих ошибок (производство невостребованных продуктов) наиболее существенны при поставке на рынок инновационных продуктов по инициативе производителя без конкретного заказчика при коммерческом риске разработчика и изготовителя. Решение задач управления ПС с применением формализованных методов на основе моделей объектов и процессов управления актуально при осуществления радикальных инновационных процессов - при создании новых продуктов, анализе и оценке уровня качества выпускаемой продукции и при осуществлении инкрементальных инновационных процессов - целенаправленной и своевременной её модернизации. Перечисленные виды инновационной деятельности (ИД) являются критическими в том смысле, что они определяют инновационный характер всего жизненного цикла продукта. Если радикальные инновации кардинально меняют положение вещей в той либо иной области и связаны с изменениями принципов построения, моделей инновационных продуктов, то инкрементальные инновации представляют собой доработку уже существующих инновационных продуктов при их производстве. Необходимость последних обусловлена ограниченным временем инновационного преимущества продукта и стремлением производителя увеличить доход от рыночной реализации инновационного продукта за счет продления прибыльных фаз его жизненного цикла.

Требование инвариантности как ключевого компонента системного подхода к разработке моделей управления

Важнейшим принципом системного подхода к разработке моделей действительности является принцип разработки системных классификаторов – инвариантов [1]. Инвариантный аспект системы – её категория, остающаяся неизменной при различных преобразованиях в системе. Теория моделей, каждый из двух ее аспектов – смысловой и формальный – должны отражать инвариантные свойства моделируемых объектов действительности. Выполнение этого требования позволит специалистам, занимающимся задачами анализа и управления, применять общие принципы формирования управляющих воздействий, приводящих объект управления (ОУ) в желаемое

состояние. При этом на ОУ открываются новые управляющие входы, влияющие на более «тонкие» элементы его выхода (реакции) и позволяющие более эффективно достичь требуемого результата управления.

С практической точки зрения инвариантность модели даст возможность расширить спектр доступных альтернативных (или множества допустимых) управленческих решений в отношении моделируемого объекта, что способствует принятию их более рациональных или в ряде случаев оптимальных вариантов.

Формальная инвариантность системного подхода на основе теории множеств – способность описывать структурно сходные процессы и явления, описываемые средствами различных научных областей, продемонстрирована в работе [2]. Содержательная инвариантность теории моделей в соответствии с системным подходом может быть достигнута в процессе составления семантического описания конкретной предметной области. Его задачами являются формулирование качества функционирования ОУ как системы, определение границ этой системы и задание смысловых модельных понятий. Отсюда следует важный вывод: именно смысловой, неформальный аспект теории моделей отвечает за выполнения требования инвариантности системного подхода при его практическом применении. Данный вывод согласуется с иерархической моделью управления ПС, верхний уровень которой занимает процесс построения семантического описания объекта управления [3].

Принцип инвариантов диктует создание *идеальной модели* управления, предполагающей выделение указанных выше существенных свойств объектов. Особенность идеальной модели состоит в том, что она показывает лишь принципиальные возможности получения заданных состояний объекта моделирования, а практические средства достижения этих состояний в модели могут быть не определены. Подобные модели требуют конкретизации с учетом особенностей предметной области, развития их семантической теории и идентификации на этой основе инвариантов ОУ, раскрывающих инструменты практической реализации модели. Таким образом, этап построения (выбора) идеализированной модели принципиально необходим для упрощения реального объекта в степени, достаточной для выявления инварианта, который, в свою очередь, позволяет сформировать практически реализуемый алгоритм управления. В качестве основы указанной идеальной модели, в рамках которой будет идентифицирован системный инвариант социально-экономического субъекта, предлагается принять алгоритм многоуровневого адаптивного управления (АУ) сложным объектом (предложен в [4], пример практического применение рассмотрен в [3]).

Таким образом, поиск инвариантных аспектов ПС, адекватно описывающих их на всех, в том числе ранних стадиях жизненного цикла продукции (услуг) ПС, становится первоочередной задачей в решении проблемы построения формализованных моделей и процессов управления ПС при проектировании, мониторинге качества и развитии инновационного продукта, который рассматривается как дифференцированный товар [3,5,6]. Покажем целесообразность и возможность решения указанной задачи на основе развития и применения концепции субъективной реальности и информационной инвариантности [7].

Концепция субъективной реальности и информационной инвариантности

Предмет исследований настоящей работы – подмножество социально-экономических систем, важнейшим компонентом которых является человек (разработчик, производитель, потребитель продукта). Именно поэтому необходимо проанализировать и учитывать процессы коммуникаций, осуществления выбора варианта действий активного «компонента» системы – человека и его поведения в целом. Процессы управления в таких системах невозможно совершенствовать без анализа феномена сознания с позиций восприятия, оценки личностью окружающего мира и себя в нем. Для такого анализа целесообразно применить *теорию субъективной реальности и информационной инвариантности* [7], основные положения которой с точки зрения решаемых проблем управления ПС приведены ниже.

Суть сознания, определяется как «субъективно переживаемое состояние». По автору концепции - Д.И. Дубровскому человек живет в мире «субъективной реальности», ощущаемой

посредством личного субъективного опыта в течение всей жизни. Поэтому такие человеческие категории, как разум и волеизъявление, свобода и самополагание зарождаются и формируются лишь в среде субъективной реальности: «Иные ценности, все целереализующие действия немыслимы вне этой формы, выражающей суть живого человеческого духа во всех его ипостасях» [7].

Важным компонентом рассматриваемой концепции является трактовка субъективной реальности как переживаемой личностью информации, которая представляет собой субъективное ощущение реального мира. Эта трактовка легла в основу одного из ключевых для решения поставленных задач положения - *положения информационной инвариантности*, значение которого, по нашему мнению, выходит за пределы той предметной области, для которой оно сформулировано Д.И. Дубровским - для анализа поведения человека как сложной самоуправляемой устойчивой системы. Ценность теории субъективной реальности и информационной инвариантности (далее для краткости – концепции информационной инвариантности) для решения проблем, поставленных в настоящей работе, обусловлена социальным аспектом ПС как объекта исследования.

Можно предположить, что в основе концепции информационной инвариантности лежит общая теория информации в целом и теория передачи информации в частности, в соответствии с которыми материальным носителем информации является физический процесс, параметры которого меняются (кодируются, модулируются) в соответствии с переносимой информацией [8]. Так, в технических системах наиболее часто, хотя и не исключительно, в качестве носителя информации используются электрические колебания. Способы изменения их параметров (варианты кодирования) различны: основными вариантами электрических носителей информации являются амплитудно-, фазо- и частотно-модулированные колебания, формируемые в процессе кодирования соответствующих параметров колебаний. «Приемник» информации декодирует (демодулирует, детектирует) полученный кодированный носитель и извлекает таким образом из «посылки» содержащуюся в ней информацию. Таким образом, кодовая реализация комплекса «носитель + информация» (при формировании, передаче и приеме информации) для одной и той же информации может быть разной по своим физическим свойствам. С другой стороны один и тот же носитель может «переносить» различную информацию от ее источника до получателя. В этом состоит принцип инвариантности информации по отношению к физическим свойствам ее носителя.

Представляется продуктивным с учетом предмета исследования эти положения развить для процессов производства и потребления продукта ПС на основе соответствующей интерпретации, составления и анализа схем информационных потоков от «источника» информации до его «приемника», как это принято в технических приложениях теории передачи информации.

Заключение

Принцип информационной инвариантности как основы механизма оценки личностью действительности и общие принципы передачи информации в технических приложениях должны быть учтены и адаптированы к решению задачи построения систем управления ПС при проектировании товарного продукта, в частности, при формализации качества продукта, формировании инвариантных аспектов ПС, уточнении семантических системных связей между понятиями «продукт» и «потребительская стоимость». Поскольку в работах [7,9] авторы не ставили свой целью раскрыть суть этой информации и показать механизм формирования её материальных носителей в производственных системах, постольку эти вопросы требуют решения в дальнейших исследованиях [10].

Библиографический список

1. Росс С.И. Математическое моделирование и управление национальной экономикой: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2006. 74 с.

2. Месарович М.Д. Общая теория систем и ее математические основы // Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. С.165-180.

3. 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.

4. Растригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. - М.: Советское радио, 1980. 232 с.

5. Ивлев М.А. Методология и интерактивная технология концептуального управления производственно-экономическими системами // Организатор производства.2011.№3(50).С.24–28.

6. Ивлев М.А. Математические основы теории производства-потребления: определение вида, структуры и параметров моделей // Бизнес-информатика. 2013. № 1(23). С.10–18.

7. Дубровский Д.И. Сознание, мозг, искусственный интеллект: сборник статей. – М.: Evidentis, 2007. 272с.

8. Марченко А.Л., Марченко Е.А. Основы преобразования информационных сигналов. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 210 с.: ил.

9. Петров А.Н. Моделирование субъективной реальности [Электронный ресурс]. URL: http://nounivers.narod.ru/pub/ap_egor.htm. (дата обращения: 13.11.2017).

10. Ивлев М.А. Семантические предпосылки формализованного управления производственными системами при проектировании товарного продукта. Информационная инвариантность // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 3. С. 11-15; URL: https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1168 (дата обращения: 16.02.2018).

M.A. Ivlev

INFORMATION INVARIANCY AS A COMPONENT THE THEORIES OF CONTROL MODELS OF INDUSTRIAL SYSTEMS AT DESIGNING A COMMODITY PRODUCT

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The opportunity of application of one of the known theoretical approaches to modeling processes of manufacture and consumption of a commodity product - principle of information invariancy to the decision of a task of control of industrial organization is considered at conceptual designing of a product with new quality and problems of development of a let out product. Now in this area the heuristic approaches are used, which intuitive character causes probable mistakes at acceptance of the administrative decisions, which price of themes is more, than earlier they are made. The object in view can be achieved at the expense of development of the automated system of support of acceptance of the decisions, which creation provides construction of the semantic and abstract theory of new control models. As a basis of semantic theory the known theory of a subjective reality and information invariancy is offered.

Key words: external designing of a commodity product, formalized circuit of control.

УДК 004.6

В.В. Крылов, С.В. Крылов

ПОДГОТОВКА И АНАЛИЗ ДАННЫХДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕНДЕРНОГО МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ

Национальный исследовательский университет-Высшая школа экономики,
Московский технический университет связи и информатики

В докладе излагается подход к экстракции, обработке и анализу данных, позволяющих оценивать эффективность тендерного метода распределения задач в команде по разработке программного обеспечения. Для указанной оценки требуется сбор ряда метрик. Авторы рассматривают возможности их сбора в процессе разработки и необходимые операции по исследованию аналитических моделей тендеров.

Ключевые слова: Тендер, распределение задач в команде, вес задачи, время выполнения работы, сбор данных, обработка данных, анализ данных.

Тендер по распределению задач – этоаукцион внутри отдельной команды, на котором исполнители борются за право решать задачи. Цель менеджера: распределить как можно большее число задач из списка (бэклога). Цель инженеров: как можно выгоднее использовать своё рабочее время.

Для функционирования тендера важны количественные характеристики задач, выставляемых на торги.Основных характеристик две: время на выполнение задачи и вес задачи. Вес формируется с учетом приоритета задачи и планируемого вознаграждения.

Выставленная на тендер задача будет выгодной или невыгодной для потенциальных исполнителей в зависимости от того каков её вес и каковы сроки её выполнения.Выгодность можноопределить как:

$a = \frac{F}{t}; t_{min} < t < T$, где t_{min}– минимальное время решения задачи, T–продолжительность итерации разработки, F–вес задачи.

Для подсчета эффективности работы команды рассмотрим все задачи команды в виде прямоугольников, одной стороной которых является время отведенное на решение t_iа другой - их выгодность для исполнителя a_i. Площадь такого прямоугольника будет представлять ресурс, требуемый для решения задачи.

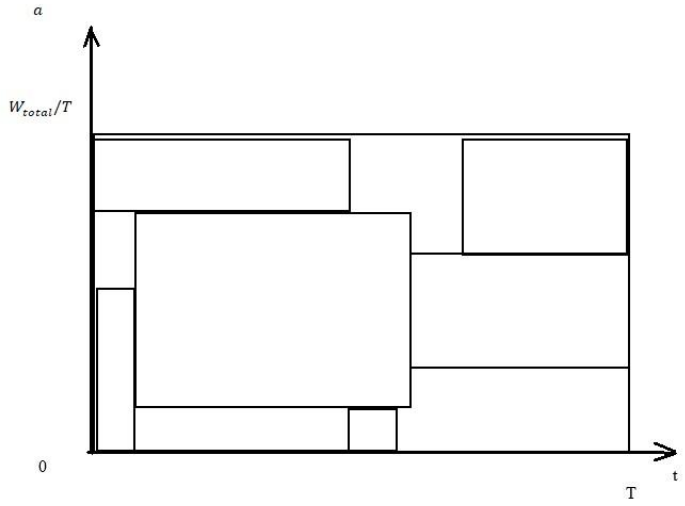


Рис.1. Отображение ресурсов

В виде прямоугольника мы можем изобразить и суммарный ресурс команды, выделяемый на все проекты (см. рис.1). Одна сторона будет иметь размер T, другая:$W_{total}\ /T$. T–продолжительность итерации разработки, W_{total} –бюджет команды на отчетный период, выраженный через вес задач.

Площадь этого прямоугольника – тот ресурс, которым располагает менеджер для распределения задач. Задача менеджера при планировании итерации - вписать в суммарный прямоугольник все прямоугольники задач, не меняя их ориентации по шкалам ti a.Оставшаяся нераспределенной площадь – свободный ресурс, который можно использовать для дополнительных задач.Отношение площади, не заполненной прямоугольниками задач, в суммарном прямоугольнике ресурса команды к площади суммарного прямоугольника ресурса команды и есть эффективность работы команды.

Для того, чтобы оценивать эффективность тендеров распределения задач на каждой задачи каждой итерации должны собираться следующие данные:

- классификатор задачи
- начальное totводимое на решение,
- выигравшее totводимое на решение,
- реальное t выполнения задачи,
- начальный вес,
- выигравший вес,
- идентификаторы участников торгов,
- идентификатор победителя,
- ставки t проигравших участников,
- ставки весапроигравших участников.

Поскольку данные могут быть неполными, искаженными и неоднозначными, перед анализом требуется предварительная обработка собранных данных.

Прежде всего следует удостовериться, что каждая задача представлена в массиве данных только один раз. Дубликаты должны быть удалены.

Все охраненные значения характеристик должны быть в допустимых диапазонах. Если есть нарушения, то такие записи о задачах должны быть поправлены или исключены.

Если задача не выполнена - то это должно быть указано специальным кодом в “реальное t”. Например, можно использовать значение -1.

Участники торгов, для которых неизвестны значение ставок должны быть исключены из рассмотрения.

Для оценки реальной эффективности применения тендеров распределения задач необходимо выполнить анализ насколько выигравший вес меньше начального веса в среднем и какова статистика такого уменьшения. К сожалению, реальных данных по применению тендерного метода в индустриальных разработках пока весьма мало [1]. Поэтому авторами было проведено исследование на данных о тендерах по выполнению проектно-изыскательских работ, которые публикуются в открытом доступе, в предположении, что общие закономерности поведения участников тендеров по снижению веса выигрыша в обмен на поле заказа существуют независимо от семантики тендеров.

Было проанализировано несколько тысяч протоколов проведения тендеров и выбраны данные, соответствующие приведенному выше списку. Особенностью таких данных является то, что кроме числовых данных в них важную роль играют категориальные данные – классификатор задачи, идентификатор победителя и идентификаторы участников каждого тендера. Обычно кодирование такого типа переменных осуществляется методом унитарного кодирования (one-hot-vector)[2].Однако в нашем случае такой подход вызвал бы расширение

размерности пространства переменных на несколько тысяч при чрезвычайно высокой разреженности представляющей матрицы, что делает дальнейшую работу с данными весьма непроизводительной и даже невозможной.

Нами был разработан и опробован новый метод встраивания множества идентификаторов в одномерное числовое пространство. Основная идея подхода состоит в том, что каждое значение категориальной переменной kc помощью некоторой функции F отображается в действительное число rтак, что каждому значению категориальной переменной должно соответствовать единственное значения числа и обратно (F - биективная функция). При этом она должна обладать свойством сохранения порядка на множествах категориальной переменной: соседним (по некоторому естественному правилу) значениям идентификаторов должны соответствовать меньше отличающиеся значения функции, чем не для соседних.

Для идентификатора победителя такой функцией является просто число – порядковый номер в словаре всех победителей. Нетрудно видеть, что при словаре, сконструированному по принципу рейтинга команд, все требования к функции отображения k ->rоказываются выполненными.

Для классификатора задачи и идентификаторов участников одного тендера, проблема построения такой функции более сложная, поскольку категориальной переменной k здесь оказывается список идентификаторов. Пусть каждый из таких идентификаторов представляет собой натуральное число, соответствующее номеру в соответствующем словаре. Тогда задача может быть сведена к отображению некоторого набора целых чисел в одно действительное так, чтобы выполнить условие биективности и сохранения порядка. В работе в качестве такой функции использован механизм построения цепной дроби [3]. В соответствие с свойствами цепных дробей обеспечивается биективность отображения, а независимость к перестановкам обеспечивается дополнительной сортировкой коэффициентов перед выполнением вычислений r.

После выполнения всех необходимых преобразований данных, называемых обычно featureengineering,из данных выбранных (1500) тендеров, экстрагированных из протоколов, была сформирована числовая матрица размерности 5, которая достаточно хорошо описывает анализируемые тендеры. Для выявления особенностей этих данных на начальном этапе была сделана интерактивная визуализация путем сокращения размерности до 3Dc помощью PCA преобразования. На рисунке 2 приведено несколько ракурсов полученного набора данных. Для интересующихся как этот набор выглядит более выразительно рекомендуем обратиться к видео [4]. Для визуализации данных был применен инструмент TensorBoard[5] и написанный конвейер приложений для экстракции и препроцессинга с использованием библиотек на Java , TensorFlow.

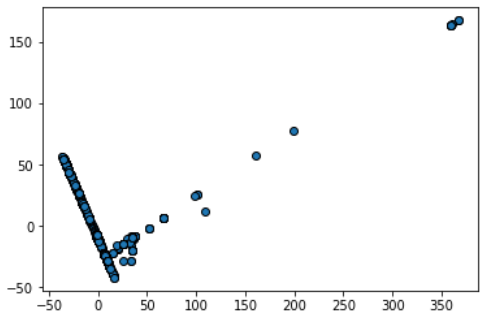


Рис.2 Визуализация тендерных данных

Как видно, данные имеют несколько выделяющихся многообразий и требуют более детального анализа. Нами были исследованы несколько срезов, показывающих существующие внутренние зависимости. На рис.3 показано распределение начальных весов по всем тендерам.

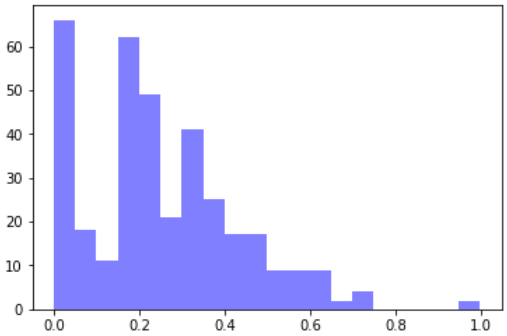


Рис.3. Гистограмма (bins=20) для начальных весов тендеров

Большой интерес представляет определение среднего выигрыша от применения тендерного метода планирования. На рис.4 приведена гистограмма распределения относительного снижения веса (цены) тендера. Атакже можно вычислить среднее снижение по всем тендерам. Оно равно 26%. Таким образом применение тендерного метода позволяет в среднем иметь выигрыш на четверть начального веса задачи, определенного расчетными методами.

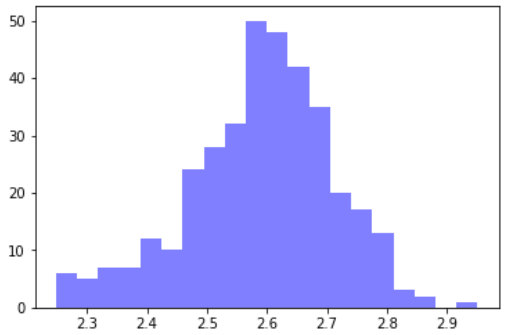


Рис.4 Распределение цены тендера

А вот так (рис.5) выглядит связь между снижением цены тендера и начальной ценой в логарифмическом масштабе.

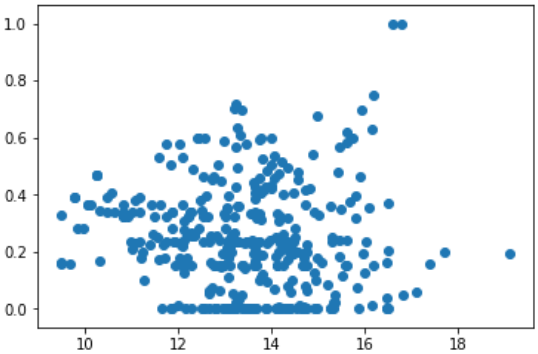


Рис.5 Зависимость снижения цены от начальной цены тендера

Как видно, никакой видимой связи между сложностью решаемой задачи и достижимым снижением не существует. Таким образом тендерный метод будет эффективен в равной степени как для дорогих, сложных проектов, так и для относительно несложных.

В заключение приведем оценку важности различных составляющих данных тендера на возможное снижение цены. На рис. 6 приведена диаграмма влияния трех основных составляющих на достигаемое снижение, полученная с помощью пакета Xgboost.

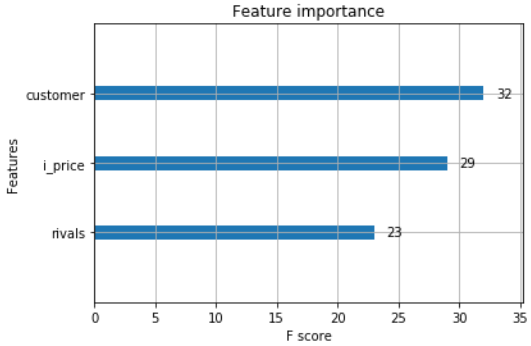


Рис.6 Ранжирование степени влияния различных параметров тендера на достижимое снижение цены.

Выводы

1. Применение тендерного метода позволяет в среднем иметь выигрыш на четверть начального веса задачи, определенного расчетными методами.
2. Никакой видимой связи между сложностью решаемой задачи и достижимым снижением не существует.

Библиографический список

1. Климова А.Г. Применение теории аукционов для распределения задач в команде : выпуская квалификационная работа – магистерская диссертация, ВШЭ, Нижний Новгород, 2015 URL: https://www.hse.ru/edu/vkr/153009677
2. Дьяконов А.Г. Методы решения задач классификации с категориальными признаками // Прикладная математика и информатика. 2014. № 46, с. 103-127. URL:http://alexanderdyakonov.narod.ru/sw-factors-dyakonov.pdf
3. Хинчин А.Я. Цепные дроби, Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва, 1949.
4. Визуализация модели данных по тендерам URL:https://www.youtube.com/watch?v=vLqtistgVgk
5. TensorBoard: Vizualizing Learning URL:https://www.tensorflow.org/programmers_guide/summaries_and_tensorboard

V.V. Krylov, S.V. Krylov

DATAPREPARATIONANDANALYSISTO EVALUATE TENDER METHOD OF TASKS ASSIGNMENT

National Research University-Higher School of Economics,
Moscow Technical University of Communications and Informatics

Thereportisaboutextraction, processandanalysisofdatato evaluate tender method of tasks assignment in software development teams. Some metrics are needed to build analytical model. The report names the parameters to collect. Authorsdescribethemodelandthen they reviewtheconclusionsthatareresultsoftender research.

Keywords: tender, taskassignment, weightoftask, time to work, data collection, data process, data analysis.

УДК 004.85: 004.415

В.В. Крылов, С.В. Крылов

SOFTWARE 2.0 – ТЕХНОЛОГИИ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Национальный исследовательский университет-Высшая школа экономики,
Московский технический университет связи и информатики

В работе рассматривается новое понятие, введенное в 2017 году руководителем разработок по искусственному интеллекту корпорации Тесла Моторз Андреем Карпаты - Software 2.0 (ПО 2.0). Сделано сравнение с традиционным стеком ПО 1.0, показаны основные возможности нового подхода. Рассмотрены отличия этапов разработки в рамках новой концепции. Сделан обзор основных технологий машинного обучения, используемых при проектировании ПО 2.0.

Ключевые слова: программное обеспечение, машинное обучение, искусственный интеллект, стек разработки, обучение, разработка.

Тема этой статьи продиктована появившейся необходимостью использования в промышленных разработка ПО новых технологий, основанных на методах машинного обучения, или в более общем смысле – элементов искусственного интеллекта. Однако публикаций на эту тему немного и акцент имеющихся обычно сделан на сами методы машинного обучения, а не на то как эти методы имплементируются в индустриальное ПО. Если говорить с этих позиций, то следует прежде всего определить, что нового требуется внести в процесс разработки, если начать применять в ней технологии машинного обучения. Известный специалист в области разработок искусственного интеллектадиректор департамента ИИ компании Тесла МоторзА.Карпаты сформулировал коренные отличия ПО на основе машинного обучения и выделил такое ПО в новое направление разработок, назвав его Software 2.0 [(Karpathy, Andrej, 2017)]. Изложим их кратко ниже.

Что такое Software 2.0. Начнем с привычного нам подхода к построению ПО. «Классический стек» Software 1.0 - это то, с чем мы все знакомы - оно написано на таких языках, как Python, C ++ и т. Д. Оно состоит из явных инструкций для компьютера, написанного программистом. Записывая каждую строку кода, программист идентифицирует конкретную точку в программном пространстве с некоторым желательным поведением.

Напротив, Software 2.0 написано в весах нейронной сети. Ни один человек не участвует в написании этого кода, потому что есть много весов (типичные сети могут иметь миллионы), а кодирование непосредственно в весах довольно сложно (я пробовал). Вместо этого мы указываем некоторые ограничения на поведение желаемой программы (например, набор данных для входных пар пар примеров) и используем вычислительные ресурсы, имеющиеся в нашем распоряжении, для поиска программного пространства для программы, которая удовлетворяет ограничениям.

Можно рассмотреть простой пример проектирования ПО для игры в «крестики-нолики» на основе 1.0 и 2.0 подхода. В первом случае основой разработки лежит конструирование алгоритма выполнения очередного хода. Анализируется поле игры и далее формулируется система правил: если в соседнем справа квадрате стоит крестик противника, а слева отсутствует и при этом в углу слева сверху находится….то поставь нолик в правый от текущей позиции квадрат. Процесс придумывания такой цепочки правил и дальнейшая их имплементаци в коде программы является основой разработки ПО.

Что же делается во втором случае. Делать очередной ход будет нейронная сеть. Она должна быть предварительно обучена. Для этого нужно перечислить ряд возможных комбинаций крестиков и ноликов и для каждой из них указать правильный ход. Сама архитектура нейронной сети выбирается из известных, имплементация ее кода берется в виде библиотечной функции (или совокупности). Главное набрать данные для обучения. И это является основой разработки ПО в стеке 2.0.

Software 2.0 не собирается заменять 1.0 (действительно, для обучения и вывода на компиляцию 2.0-кода требуется большая часть 1.0 инфраструктуры), но он будет принимать все более значительную часть того, что Software 1.0 несет на сегодня.

Новый стек имеет иное поведение, чем старый и это требует от разработчиков иных знаний и умений. Появляются иные этапы. Важнейший из них – обучение.

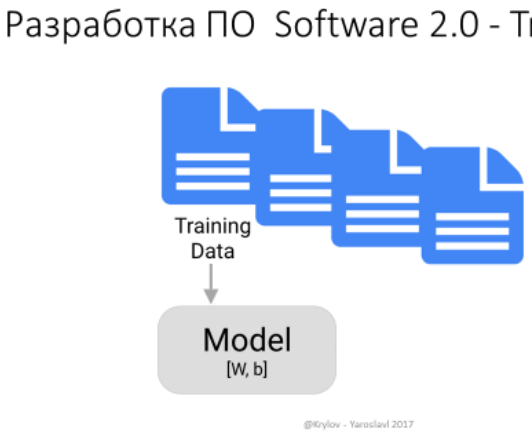


Рис.1. Этап обучения (training) имплементируемой в ПО модели

На этапе обучения используется большой объем данных и его выполнение требует огромных вычислительных ресурсов. При обучении происходит поиск значений внутренних параметров модели для наилучшего согласия, результатов генерируемых моделью и имеющихся фактов из обучающего набора.А вот процесс использования обученной модели представляет собой выполнение готовой обученной модели и может выполняться с весьма умеренными вычислительными затратами. Этот этап часто называют выводом (inference) или предсказанием (prediction).

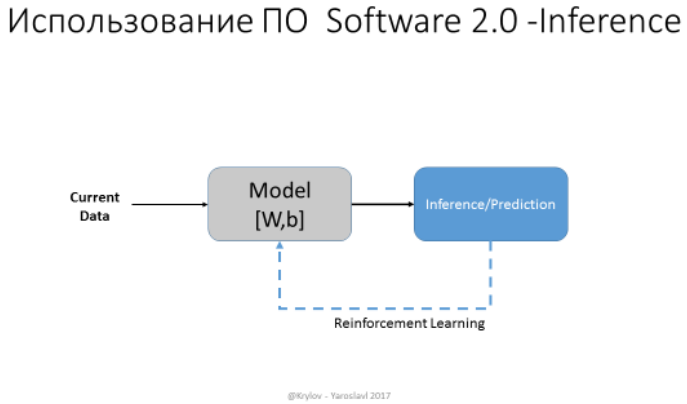


Рис. 2. Рабочее использование обученной модели

Возможная постоянная настройка механизмами ReinforcmentLearning.Если сравнить стеки ПО 1.0 и ПО 2.0, то нетрудно видеть главное отличие в практически полном отсутствии фазы разработки алгоритма и его имплементации.

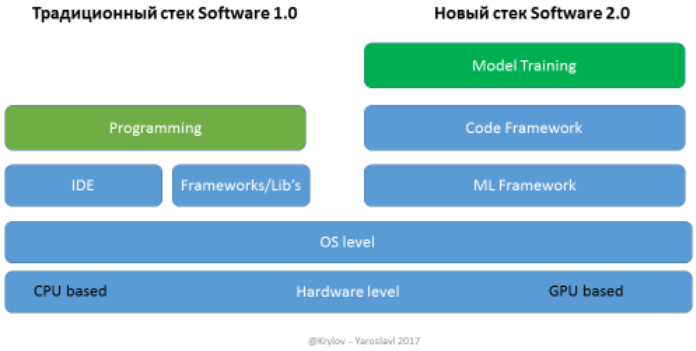


Рис.3 Сравнение стеков для Software 1.0 и Software 2.0

Заметим сразу, что применение машинного обучения может касаться самых различных фрагментов разрабатываемого ПО. Это может быть часть, касающаяся интерфейса пользователя (frontend). Весьма популярными сегодня становятся пользовательские интерфейсы на основе чат-ботов. Такие чат-боты разбираются в текстовых сообщениях от пользователя и инициируют в системе процессы, генерирующие адекватные требованиям пользователя ответы. Чат-бот в свою очередь осуществляет обертку сгенерированных данных в форму предложений на естественном языке и передает это пользователю. Вместо текстовой формы может использоваться речевой интерфейс, подобный с известным персональным помощникам типа Siri, GoogleNowAmazonEcho и т.п.

Но машинное обучение может эффективно использоваться и в backend. Сложнейшие конструкции алгоритмов принятия решений, прогнозирования будущих значений на основе решения сложных уравнений и формул в случае использования принципов ПО 2.0 заменяются на компактные библиотечные конструкции нейронных сетей и ансамблей таких моделей. Главным становится умение научить эти модели, найти и подготовить к использованию необходимые обучающие данные.

Основными отработанными для индустриального применения являются модели, которые можно отнести к следующим типам.

1. Обучение с учителем (supervisedlearning). Этот тип моделей реализует классическую парадигму обучения на примерах. Одним из основных применений являются задачи предсказания значений некоторой переменной по известным значениям других. Такие задачи часто называют регрессионными. Современные модели в виде глубоких нейронных сетей позволяют предсказывать в условиях очень сложных и многомерных данных. Другой класс задач относят к задачам классификации. Особенно интересных результатов удалось достичь в классификации объектов на изображениях и видеопотоке. Обучение с учителем успешно работает для построения нейронных машин перевода с одного естественного языка на другой, трансляции слов в изображения и т.п. Дополнительными важными функциями сетей с прямым обучением являются определение координат классифицируемых объектов и классов движений на последовательности видеокадров. В последнее время появились эффективные архитектуры сетей для классификации трехмерных изображений. Интерпретируемые в них в терминах «вокселей» (вместо «пикселей») изображения также могут быть классифицируемы и описаны словами.
2. Самообучение (unsupervisedlearning). Этоттипмоделей нацелен на решение задач кластеризации данных по заданным функциям близости наборов признаков, обнаружения аномалий в данных, снижения размерности данных для улучшения их интерпретируемости после визуализации или обработки. Самообучение лежит в основе построения связей

между наборами данных для выделения структурных свойств их наборов. К этим моделям относят архитектуру, называемую автоэнкодер(autoencoder), представляющую собой две нейронных сети, одна из которых осуществляет понижения размерности входных данных до минимума сохраняющего их принципиально важные признаки, а вторая – преобразует эти признаки в новое представление. Например, такие автоэнкодеры используются в системах распознавания речи, коррекции изображений и т.п.

3. Обучение с подкреплением (reinforcementlerning). Такие модели предназначены для перманентного процесса обучения в процессе вывода на основе интнрактивного взаимодействия с внешней средой. Модель создает воздействия на окружение и оценгивает его реакцию, получая одновременно воздействия в виде поощрения или наказания в зависимости от результативности произведенных действий по отношению к некоторой сформулированной цели. Такие модели широко применяются в робототехнике, однако являются весьма эффективными при реализации задач детектирования объектов в сложных условиях и даже при построении задач понимания текста.
4. Порождающие состязательные нейронные сети (GAN – GenerativeAdversarialNetworks).Эти модели содержат две одновременно обучающиеся нейронных сети, одна из которых генерирует данные из случайного шума, а другая сравнивает эти искусственные данные с известными ей (содержащимися в некотором опорном наборе данных) и вырабатывает оценку их отличия. Процесс обучения модели сводится к такой настройке сетей, чтобы генерирующая сеть порождала такие данные, чтобы вторая, дискриминационная сеть не смогла их различить от данных из опорного набора. Такие модели служат основой многочисленных систем для виртуальных действий над предметами (изображениями). Например, старение лица человека, поворот головы, получение вида сзади, восстановление лица по черепу и т.п. Эти модели породили даже новое искусство переноса стиля известных художников на любые изображения.

Внутри каждого из описанных классов существует множество исследованных архитектур моделей, многие из которых могут быть использованы уже после обучения, выполненного другими. Для интероперабельности обученных моделей созданы форматы данных для компактного хранения и загрузки настроенных коэффициентов нейронных сетей.

Библиографический список

Karpathy, Andrej. // Medium. - Medium software, 12 11 2017 г.. - 29 1 2018 г.. - https://medium.com/@karpathy/software-2-0-a64152b37c35.

V. Krylov, S. Krylov

SOFTWARE 2.0 – THE TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

National Research University-Higher School of Economics,
Moscow Technical University of Communications and Informatics

The paper considers a new concept introduced in 2017 by the head of the development of artificial intelligence of Tesla Motors Corporation Andrey Karpaty - Software 2.0. Made a comparison with the traditional Software 1.0 stack, shows the main features of the new approach. The differences of the development stages within the framework of the new concept are considered. An overview of the basic machine learning technologies used in Software 2.0 designis made.

Keywords: software, machine learning, artificial intelligence, development stack, training, software design.

УДК 004.4

В.В. Котлякова, И.В. Кузьмина, В.А. Новиков

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ, КОНФИГУРИРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

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 виртуализация. В данной работе было выполнено макетирование распределенной многопроцессорной системы на базе аппаратной и контейнерной виртуализации, рассмотрены преимущества и недостатки каждого подхода.

Ключевые слова: распределенная система, виртуализация, автоматизация конфигурирования.

В настоящее время при разработке программного обеспечения часто возникают ситуации, когда требования к системе меняются уже на конечных этапах разработки или наблюдается постоянный прирост функциональности в уже существующих системах. Помимо этого, к современному ПО предъявляются крайне высокие требования по производительности и отказоустойчивости. Классическая монолитная архитектура приложений перестала отвечать этим требованиям, и на смену ей пришел сервисно-ориентированный подход. Такой подход имеет значительные преимущества по сравнению с монолитными приложениями, такие как, лучшая масштабируемость, меньшая связанность между модулями, лучший контроль на этапах разработки, тестирования и развертывания [1].

Системы, построенные с помощью сервисно-ориентированной архитектуры, являются распределенными. Взаимодействие между сервисами осуществляется с использованием различных протоколов. Такая конфигурация необходима для обеспечения обработки больших объемов данных, возникающих при пиковых нагрузках, а также их репликации.

Ценой указанных выше преимуществ является значительное усложнение системы. Требуется поддерживать контракты протоколов, бороться с недоступностью сервисов, управлять распределенными транзакциями. Также к этим проблемам относится необходимость развертывания большого количества сервисов в различных окружениях на всех этапах разработки. В частности, при тестировании таких систем часто возникают следующие проблемы:

- необходимость испытаний ПО в различных пользовательских конфигурациях, количество которых превышает количество физических компьютеров, выделенных для тестирования;
- большие временные затраты на развертывание и настройку тестовых стендов, содержащих множество различных компонентов, между которыми обеспечивается сетевое взаимодействие;
- большие временные затраты на создание резервных копий систем и их конфигураций, а также восстановление после запуска тестов;
- невозможность воспроизведения дефекта, найденного специалистом по тестированию, на машине разработчика и потеря времени на его поиск, исправление;
- необходимость в испытаниях программы в условиях аппаратной среды, которой нет в распоряжении команды тестирования;
- необходимость тестирования программного продукта в условиях, требующих быстрого переключения между пользовательскими конфигурациями.

Для решения описанных проблем на всех этапах разработки, тестирования и эксплуатации программных комплексов в распределенных многопроцессорных системах широко используется

виртуализация вычислительных ресурсов, а также автоматизация их создания и конфигурирования.

Технологии автоматизации, как создания инфраструктуры распределенных многопроцессорных систем, так и управления этой инфраструктурой, сильно эволюционировали за последние годы. Одним из направлений этой области является автоматизация выделения ресурсов. 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 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 [2]. 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.

Таким образом, на сегодняшний день изучение технологий автоматизации инфраструктуры распределенных многопроцессорных систем и применение их на всех этапах разработки, тестирования и эксплуатации является актуальной задачей.

Специфика разработки и тестирования таких систем обуславливает широкое применение технологий виртуализации. Под виртуализацией подразумевается технология, которая позволяет разделить один физический сервер на несколько виртуальных. Виртуальная среда имеет свою файловую систему, а также доступ к процессорному времени, памяти и периферийных устройств, таких как сетевая плата. Виртуальных сред на одном компьютере может работать несколько. Они тем или иным образом распределяются по всем процессорам, памяти и дискам. Поэтому виртуальные среды, как правило, не зависят от аппаратуры и могут легко перемещаться с одного компьютера на другой. Кроме виртуальных сред есть базовая операционная система, которая объемлет все виртуальные среды. А именно, она скрывает подробности аппаратуры и занимается управлением реальными ресурсами компьютера.

Основной задачей технологии виртуализации является обеспечение разделения ресурсов различных виртуальных сред. Процесс, запущенный в одной виртуальной среде, не может получить доступ к файлам, памяти и процессам, принадлежащим другим виртуальным средам. Необходимо также обеспечить приемлемое взаимодействие процессов внутри виртуальной среды, ограничивая доступ к элементам извне. Все взаимодействия виртуальной среды с внешним миром выполняются через сеть. Локальные методы взаимодействия межпроцессорной связи блокируются. Это необходимо как для соблюдения правил безопасности, так и для обеспечения переносимости виртуальной среды на другой компьютер. Перемещение виртуальных сред с одного компьютера на другой позволяет организовать балансировку нагрузки, перемещение приложений туда, где они наиболее востребованы, и упростить техническое обслуживание аппаратуры.

Можно выделить два основных типа виртуализации: аппаратную и контейнерную.

Аппаратная виртуализация позволяет запускать несколько независимых виртуальных машин в соответствующих разделах аппаратного пространства компьютера [3]. Процессор при этом может работать в двух режимах root operation и non-root operation. В режиме root operation работает специальное программное обеспечение, являющееся «легковесной» прослойкой между гостевыми операционными системами и оборудованием — монитор виртуальных машин, носящий также название гипервизор (рис.1).

Каждая из гостевых операционных систем запускается и работает независимо от других и является изолированной с точки зрения аппаратных ресурсов и безопасности.

К наиболее популярным системам аппаратной виртуализации относятся такие системы как: VMware vSphere Enterprise Edition, VMware vSphere Standard Edition, VMware vSphere ESXi Hypervisor, Microsoft Hyper-V Server 2008 R2 SP1, Microsoft Windows Virtual PC, Citrix XenServer, Citrix XenServer Free Edition, Red Hat Virtualization 4.0, Oracle VirtualBox.

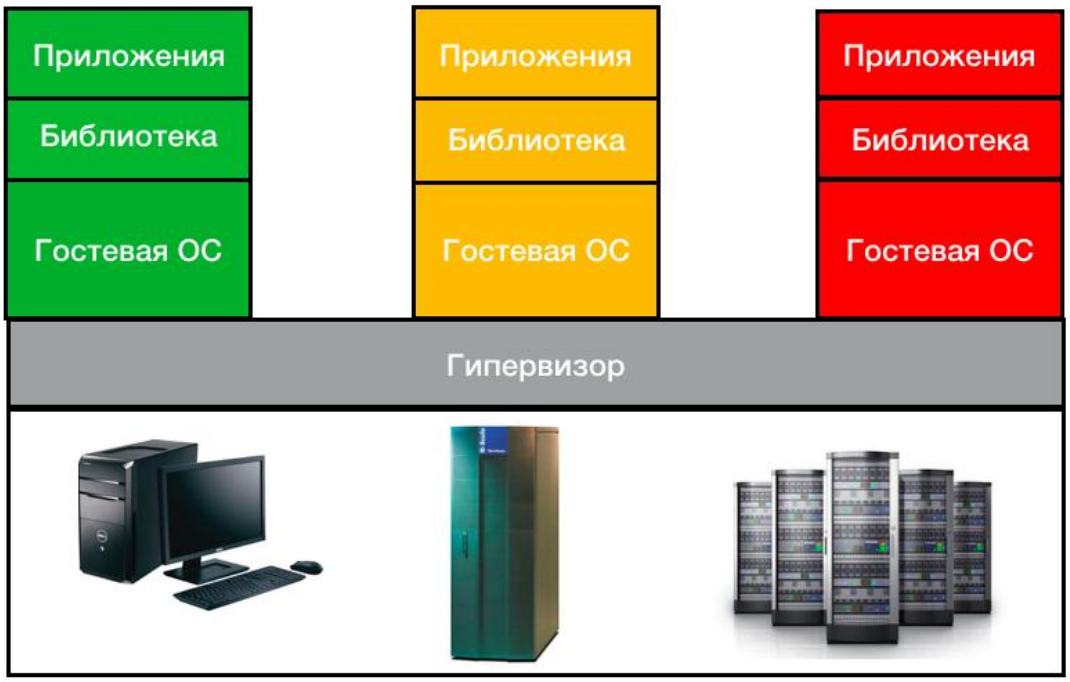


Рис.1. Схема аппаратной виртуализации

Недостатки традиционных виртуальных машин, такие как необходимость большого объема аппаратных мощностей хостовой машины, ограниченный набор аппаратного обеспечения и интерфейсов поддерживаемый платформами виртуализации и др., стали катализатором роста популярности технологий контейнерной виртуализации.

Контейнеры эффективно разделяют ресурсы, управляемые одной операционной системой, на изолированные группы, для того чтобы лучше сбалансировать противоречивые требования к использованию ресурсов между изолированными группами. Контейнеры могут запускать инструкции, относящиеся к основному процессору без каких-либо специальных механизмов интерпретации.

Предоставляя способ создания и ввода контейнеров, операционная система дает приложениям иллюзию запуска на отдельной машине и в то же время разделяет многие основные ресурсы.

В данном подходе, ядро операционной системы предоставляет изолированное виртуальное пространство. Каждое из виртуальных пространств называется контейнером. Контейнеры позволяют процессам создавать изолированное окружение на операционной системе содержащей эти контейнеры.

Данная технология также называется виртуализацией операционной системы и представлена на рис.2. В настоящее время широко известны такие системы управления контейнерами как: Linux-VServer, OpenVZ, LXC, Docker.

В данной работе было выполнено макетирование распределенной многопроцессорной системы на базе аппаратной и контейнерной виртуализации, рассмотрены преимущества и недостатки каждого подхода. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении научно-исследовательских работ [4] для оценки эффективности применения различных технологий виртуализации в процессе разработки и тестирования сложных программно-аппаратных комплексов.

Рис.2. Схема контейнерной виртуализации

Библиографический список

1. Маквитти, Л. Архитектура SOA как она есть / Л. Маквитти // Сети и системы связи. – 2006. – №2. – С. 50-53.
2. Leung, F. Intel Virtualization Technology / F. Leung, G. Neiger, D. Rodgers et al. // Intel Technology Journal. – 2006. – Vol. 10.
3. Пастухов, Д.А. Сравнительный анализ гипервизоров / Д.А. Пастухов, П.Ф. Юрчик, А.В. Остроух // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3-3. – С. 346-350.
4. 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. 44-49.

V.V. Kotlyakova, I.V. Kuzmina, V.A. Novikov

AUTOMATION OF DEPLOYMENT, CONFIGURING AND TESTING SOFTWARE COMPLEXES IN DISTRIBUTED MULTIPROCESSOR SYSTEMS

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 virtualization is widely used. In this work we modeled distributed multiprocessor system based on hardware and container virtualization. Advantages and disadvantages of the approach are discussed.

Key words: distributed system, virtualization, automation, configuration.

УДК 681.518.3

П.В. Мисевич, А.Э.Ермилов

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА КОНСОЛИДАЦИИ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описываются типовые задачи процесса консолидации данных. Авторы описали состав и структуру многоагентнойинтеллектуальной системы решения множества типовых задач. Архитектура система управления многоагентной системы описана в этой статье.

Ключевые слова: консолидация данных, чистка данных, база знаний, интеллектуальная поддержка, многоагентная система, архитектура системы управления, продукционная система

Введение

Обобщая практический опыт в докладе отмечается, что при консолидации слабо структурированных данных [1] (таблицы Word, Excel, Web – документы, данные из текстовых файлов и др.) задача консолидации распадается на две взаимосвязанные подзадачи.

Первая подзадача – это задача переноса данных из источника в приемник (как правило, это БД или ХД). Это задача конвертирования.

Вторая – анализ данных с целью выявления неточностей (интерактивные ошибки пользователей, выход длины данных из поля за допустимые пределы, нахождение в поле атомарных данных выходящих за область допустимых значений и др.).

Отметим, что первая задача решается системой программ- конвертеров, которые или входят в состав СУБД. Вторая задача требует создания специального инструментального комплекса, который ориентирован на анализ данных в каждой колонке конвертируемой таблицы (если работаем с реляционными БД) с целью выделения ошибок и их исправления (в автоматическом или интерактивном режиме).

Практический опыт работы со слабо структурированными данными показывает, что задача анализа и коррекции данных источника является типовой задачей, которая регулярно воспроизводится в рамках задачи консолидации данных.

Методика

На уровне концепции предлагаем рассматривать инструментальный комплекс поддержки решения задачи «чистки» слабоструктурированных данных, который способен «настраиваться» на конвертируемую таблицу и позволяет в автоматическом или интерактивном режиме выявлять и корректировать ошибки в данных источника.

Обобщая практический опыт решения задачи консолидации данных сформулируем требования к эксплуатационным требованиями системы интеллектуальной поддержки. Перспективная система должна:

- ориентироваться на постоянную модификацию и расширение;
- иметь возможность «настраиваться» на ограничения конвертируемой колонки данных;
- вести протокол своих действий;
- иметь возможность автоматической коррекции данных источника;
- иметь возможность диалоговой коррекции данных источника.

Предлагается рассматривать описываемую систему интеллектуальной поддержки в как мультиагентнуюсистему в которой каждый агент решает типовую задачу в своейпредметной области, т.е.реализует функционально завершенное событие алгоритма обработки данных источника.

Такое событие реализует операции по:

- анализу данных источника;
- выявлению факта несоответствия данных ограничениям;

- коррекции данных.

Кроме этого, агент должен поддерживать:

- протоколирование своих действий;
- взаимодействовать с системой управления;
- взаимодействие с другими агентами (в перспективе).

Ниже приведен далеко не полный перечень типовых задач поддержки процесса работы со, которые решают агенты:

- соответствие полей колонок необходимому типу данных;
- соответствие полей столбцов максимально допустимой длине;
- соответствие значения поля множеству допустимых значений;
- соответствие разделителя между целой и дробной чести чисел эталону;
- правильное позиционирование разделителя между колонок;
- отсутствие конфликтов между символом – разделителем колонок и содержимым полей данных источника;
- выявление полей без данных и их пометка в БД специальным символом;
- выявление фактов стирания текста в полях через его замещение пробелами;
- поиск в английском тексте символов кириллицы;
- поиск в русском тексте символов английского алфавита;
- и другие.

Каждая типовая задача решается соответствующим агентом. Например, задача поиска в английском тексте символов кириллицы заключается в:

- выделении значения текстового поля;
- его по символьное «расчленение» и запись символов в массив;
- выделение в массиве символову которых визуализация идентична в русском и английском алфавите (таблица 1);
- замена русских эквивалентов в тексте английскими символами;
- поддержка ведения протокола (ведение Log таблицы или файла).

Отметим, что данная типовая задача является весьма распространённой. Она актуализируется при необходимости конвертирования в БД данных из файлов Excel, которые формируются человеком (типичная интерактивная ошибка). Частое воспроизведение данной задачи делает актуальным создание специализированного агента (который ее решает) с целью включения в состав системы интеллектуальной поддержки.

Таблица 1 - Визуальное соответствие символов русского и английского алфавита

№	Английские символы	Русские эквиваленты	Комментарий
1	Aa	А а	
2	Bb	В в	Визуально совпадают только прописные буквы
3	C c	С с	
4	Ee	Е е	
5	Hh	Н н	
6	Kk	К к	
7	Mm	М м	Визуально совпадают только прописные буквы
8	Pp	Рр	
9	Tt	Т т	Визуально совпадают только прописные буквы
10	Xx	Хх	
11	Yy	У у	Визуально совпадают только строчные буквы

Если не осуществить детальные анализ данных источника, то «опечатки» будут перенесены из источника в БД. Такие грязные данные сделают некорректным срабатывание запросов.

Как следует из приведенного выше примера, агенты системы интеллектуальной поддержки работают по конкретному алгоритму. При этом программный код реализации агента может быть довольно громоздким. Сами же агенты являются теоретическими примитивами только в рамках концепции, которая позволяют из них строить систему интеллектуальной поддержки процесса консолидирования данных.

Практическая часть

Описанные выше требования к системе интеллектуальной поддержки и специфика реализации агентной системы позволяют сформулировать основные черты архитектуры системы интеллектуальной поддержки процесса. На рис.1 представлена архитектура агентной системы поддержки процесса консолидации данных.

В системе выделяются:

- библиотека агентов;
- система управления агентами;
- система протоколирования работы;
- библиотека сценариев.

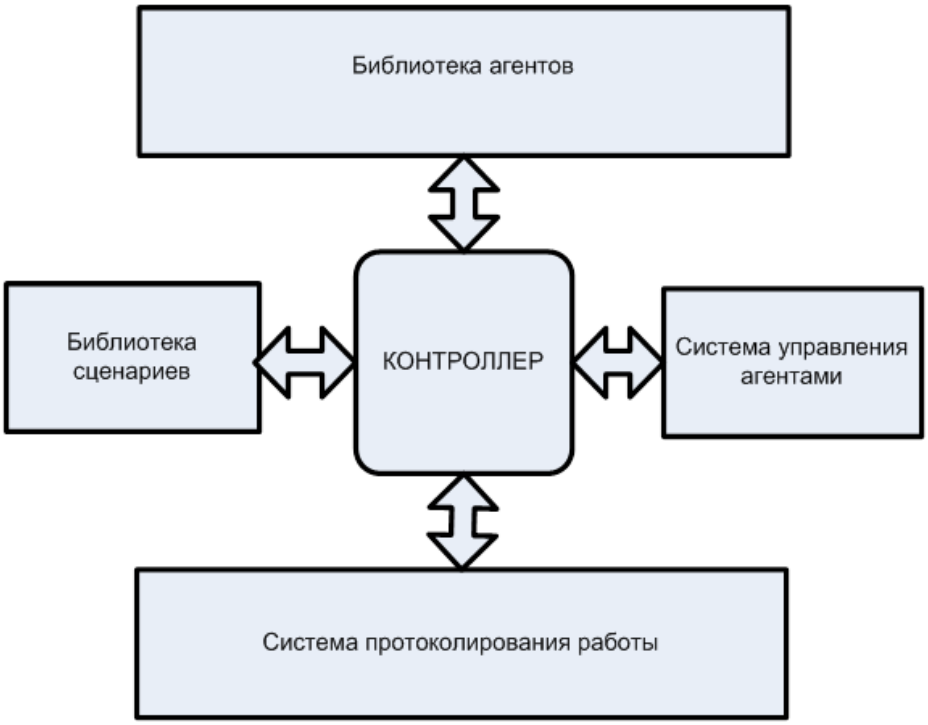


Рис. 1 – Архитектура агентной системы поддержки процесса консолидации

Библиотека агентов – специализированное хранилище агентов, которое позволяет включать в него новые элементы. Агенты, включенные в библиотеку имеют унифицированный интерфейс, позволяющий их подключать как к системе управления агентами, так и к системе протоколирования.

Система управления агентами – ключевой элемент, которой по формальному описанию сценария работы инициирует выполнение процедур необходимых агентов. Формальное описание алгоритма (в нашем случае синонимом этой категории является сценарий) в системе управления определяет ход процесса чистки данных.

При необходимости формальное описание алгоритма можно переместить из системы управления в библиотеку сценариев. Библиотека сценариев является специализированным хранилищем, которое поддерживает систему управления агентами в течение всего жизненного

цикла. Включение этого элемента облегчает процесс создания и отладки сценариев работы многоагентной системы интеллектуальной поддержки.

Система протоколирования работы генерирует протокол, который описывает, какой агент в какой колонке и в каком поле обнаружил «проблемы» и как их корректировал. Включение системы протоколирования в состав системы интеллектуальной поддержки процесса консолидирования данных позволяет анализировать ошибки.

Контроллер – это система управления, которая координирует взаимодействие описанных выше подсистем.

Отметим, что система управления агентами может строиться по различным технологиям. Авторами видится перспективным использовать в качестве системы управления продукционную систему. Тогда система управления агентами будет иметь следующую архитектуру (рис.2).

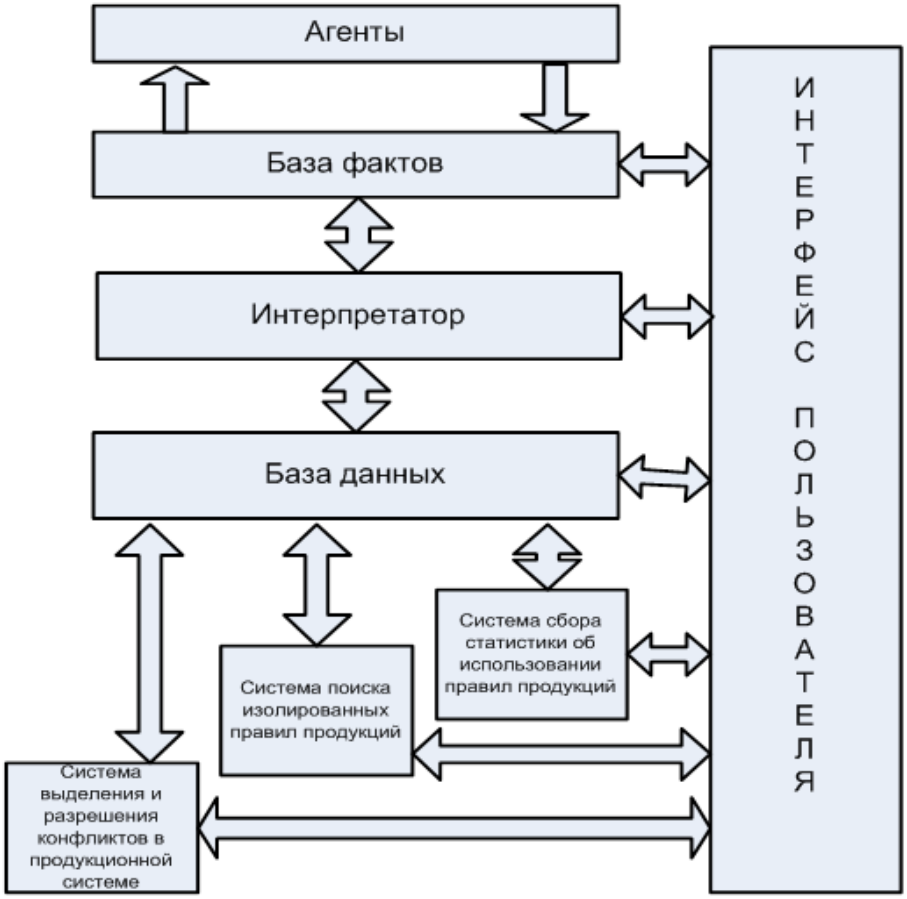


Рис. 2 – Архитектура системы управления агентов продукционного типа

База фактов используется для хранения фактов – ситуационного описания состояния агентной системы. Как показано на рис.2 база фактов взаимодействует с агентной системой двусторонними связями (по данным и по управлению).

Интерпретатор анализирует содержимое базы фактов и подбирает из базы знаний продукционное правило, которое способно определить какое событие сценария (реализуется агентом) необходимо инициировать.

База знаний хранит описание сценария продукционно системой сценарий работы системы интеллектуальной поддержки.

Система выделения и разрешения конфликтов в продукционной базе знаний предназначена для предотвращения возникновения конфликтных наборов (правил продукций у которых одинаковые левые части, но разные правые).

Система сбора статистики об использовании продукционных правил предназначена для сбора статистики о работе системы управления агентами. Цель сбора статистики - выделение узких мест в проекте (поиск неиспользуемых групп правил, поиск наиболее часто редактируемых элементов в базе фактов и др.).

Интерфейс пользователя предназначен для организации доступа пользователя ко всем ресурсам системы. Интерфейс позволяет в диалоге формировать сценарий работы агентной системы, в диалоговом режиме проверять его на корректность,

Выводы

Реализация описанной в статье системы интеллектуальной поддержки процесса консолидации данных показала, что практическое использование многоагентного инструментария сокращает время настройки системы на конвертируемую таблицу. Поступление в БД или ХД чистых (свободных от интерактивных ошибок пользователя) и типизированных данных позволяет повысить эффективность использования запросов и создавать средства автоматизации генерации отчетов.

Библиографический список

1. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: Учебное пособие. 2-е изд., испр. - Спб. Питер, 2013 - 704 с.:ил.

Misevich P.V.,Ermilov A.E.

THE MULTI-AGENT SYSTEM OF INTELLIGENT SUPPORT FOR THE PROCESS OF DATA CONSOLIDATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

Describes typical tasks the process of data consolidation. The authors described the composition and structure of multi-agent intellectual system of solving many typical problems. The architecture of the control system the multi-agent system described in this article.

Keywords: data consolidation, data cleaning, knowledge base, intellectual support, multiagent system, architecture of the management system, production system

УДК 004.415

П.В. Мисевич, А.Э. Ермилов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИТУАЦИОННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ СКЕЛЕТНОЙ ОБОЛОЧКИ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева

В данной статье рассматривается инструментарий, который облегчает построение систем ситуационного мониторинга. Инструментарии выполнены в форме скелетной оболочки системы мониторинга. Комплекс рассчитан на создание и поддержку системы мониторинга во время ее эксплуатации.

Ключевые слова: системы мониторинга, скелетная оболочка, инструментальные системы, создание и поддержка, мониторинг.

Введение

Предметная область систем мониторинга (СМ), сегодня активно развивается. Это является следствием поддержки всех бизнес-процессов в человеческом обществе, элементами человеко-машинной среды, которые носят глобальный характер (интернет, GPS, ГЛОНАСС, системы умный дом, современные системы поддержки энергетики и др.). Такие проекты активно развиваются как в России, так и за рубежом [1-3].

СМ являются частью таких систем и программно-аппаратные комплексы из описанной выше предметной области также активно развиваются. В работах [1-2] приводятся результаты исследования динамики развития систем дистанционного мониторинга и управления (СДМУ) и систем автоматизации тестирования (САТ). Показано, что уровень сложности этих систем растёт нелинейно. Количество систем данного класса растёт по экспоненциальному закону. Тенденция роста имеет весьма динамичный характер. Выявленные закономерности развития систем «переносятся» на СМ, которые являются подсистемами СДМУ и САТ.

Из вышеизложенного следует, что создание инструментариев автоматизации построения и поддержки СМ является актуальной задачей.

Методика

В данной работе предлагается подход, который позволяет снизить затраты на создание и поддержку СМ. Авторами разработан инструментарий оболочки – в форме типовой СМ. При построении конкретной СМ скелетная оболочка наполняется данными и знаниями конкретной предметной области. При этом инструментарии – элементы оболочки «трансформируются» в саму систему, становясь инструментариями сопровождения и поддержки СМ.

Функциональный состав такой оболочки СМ – определяется тенденциями развития анализируемой предметной области [4].

На рис. 1 представлены подсистемы разработанной, скелетной оболочки СМ. В состав инструментального комплекса включены следующие элементы.

1. Интерфейс пользователя – человеко-машинный интерфейс, который открывает возможность работать с СМ [5].

Основными типовыми задачами подсистемы являются:

- просмотр данных результатов мониторинга;
- ситуационный анализ;
- формирование банка эталонных ситуаций;
- выделение в банке ситуаций дублирующих элементов, конфликтов и их разрешение.

2. Интерфейс СМ с внешним миром:

Поддерживает различные способы сбора информации об объекте мониторинга.

Информация может поступать в СМ как в режиме реального времени, так и по компьютерной сети из других СМ и БД.

3. БД. Эта подсистема является средством накопления «сырых» данных, которые не описывают ситуацию в предметной области, то есть не представлены в форме информационных структур – фреймов [5].

4. Интерпретатор – обрабатывает сырые данные, при этом: формирует из сырых данных ситуационное описание – фрейм. Сравнивает ситуационное описание с элементами ситуационного банка, оценивает ситуацию на объекте мониторинга и взаимодействует с пользователем (оператором СМ), предупреждая человека (в случае необходимости), о негативных тенденциях развития ситуации на объекте мониторинга.

Рис. 1 – структура скелетной оболочки системы мониторинга

5. Ситуационный банк – хранит эталонные ситуации в предметной области мониторинга, которые представлены в форме фреймовой модели, с процедурами – демонами.

В [5] предложено включать в состав фреймов процедуры нечёткой логики, которые позволяют совместить преимущества фреймового (ситуационного) и логического подходов.

6. Система обработки статистических данных позволяет получить из сырых данных «традиционные» характеристики временных рядов [6].

7. Система управления (СУ). Этот элемент инструментального комплекса поддерживает корректное взаимодействие между различными подсистемами.

8. Система протоколирования работы СМ облегчает расширение и отладку, как инструментального комплекса, так и построенных на его базе СМ.

Все подсистемы скелетной оболочки СМ, являются функционально завершёнными элементами, которые выполнены в форме скелетных оболочек настраиваемых на конкретную предметную область (вычислительная техника, транспорт, медицина, и т.д.). Скелетная оболочка СМ выполнена в соответствии с принципом расширяемости, то есть поддерживает подключение новых подсистем. Например, если строится многопользовательская СМ, то поддерживается подключение системы администрирования, и подсистемы протоколирования действий пользователей.

Практическая часть

С использованием MS SQL SERVER 2005 и MS VS.NET созданы информационное и программное обеспечения вышеописанного инструментария. UML диаграмма классов-фреймов представлена на рис.2. Фреймовая модель описания ситуаций строится в соответствие со следующей технологией.

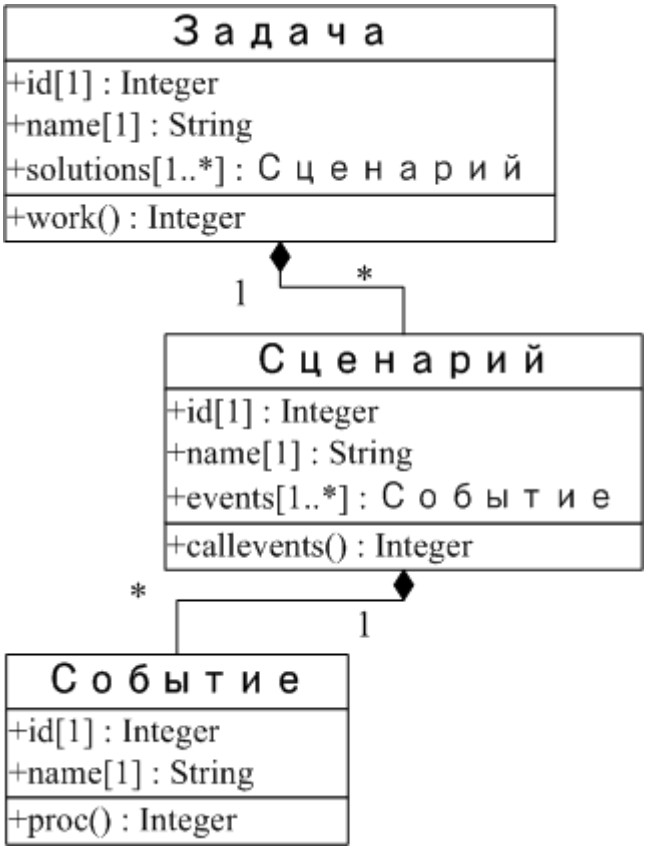


Рис. 2 – UML диаграмма классов-фреймов

Шаг 1. При исследовании предметной области формализуется множество типовых задач мониторинга и задаются ассоциативные связи между ними. Далее каждой типовой задаче ставится в соответствие ситуационное описания – фрейм. Ассоциативные связи между типовыми задачами «трансформируются» в связи фреймовой модели. Таким образом, получаем сеть фреймов наивысшего уровня, которая описывает иерархию задач.

Шаг 2. Каждой типовой задаче соответствует несколько способов её решения. Каждому способу – типовой сценарий. Поставим в соответствие каждому типовому сценарию ситуационное описания – фрейм. Ассоциативные связи между типовыми задачами и типовыми сценариями так же «трансформируются» в связи фреймовой модели. Таким образом, получим фреймовое описание второго уровня иерархии – уровня типового сценария и связи между уровнем типовой задачи и уровнем типовых сценариев (рис.2).

Шаг 3. Представим сценарий в форме событий (рис.2) и причинно-следственных связей. Поставим в соответствие события элементы фреймового формализма. Причинно-следственные связи «трансформируются» в связи фреймовой модели. К ним добавляются связи с элементами более высокого уровня иерархии.

На рис. 3 представлена подсхема ситуационного банка, которая хранит описание эталонных ситуаций предметной области системой классов-фреймов – схема данных БД.

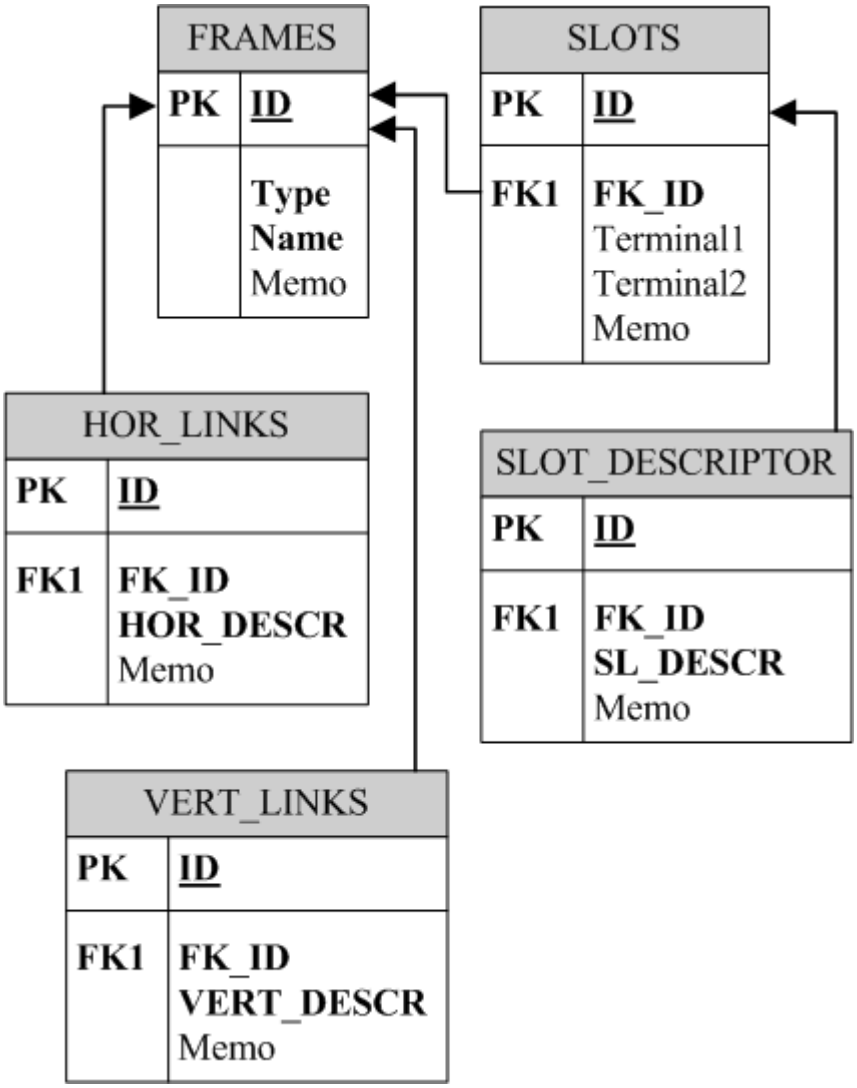


Рис. 3 – Логическая подсхема ситуационного банка

Таблица с именем «FRAMES» хранит список имён фреймов, которые используются для формирования ситуационного описания предметной области. Поле «Type» хранит тип фрейма: «задача», «сценарий» или «событие». Поле с именем «Memo» хранит комментарий технического специалиста.

Таблица с именем «SLOTS» хранит список слотов каждого фрейма. Количество слотов у каждого фрейма ничем не ограничивается. Поэтому таблица «SLOTS» связана с таблицей «FRAMES» связью типа «один ко многим». Кроме значений первичного и вторичного ключа с этой таблице хранится имя слота и два класса терминалов. Первый класс терминалов «Terminal1» позволяет хранить текстовую информацию. Второй класс «Terminal2» – численные значения. В скелетной оболочке для комментариев зарезервировано поле «Memo».

Фреймовая модель описания ситуации в предметной области поддерживает «прикрепление» к каждому слоту некоторого множества процедур. Процедуры прикрепляются при помощи указателей (дескрипторов). Количество связей в инструментарии ничем не ограничено. Совокупность дескрипторов хранится в таблице с именем «SLOT_DESCRIPTOR» (связь с таблицей «SLOTS» типа «один ко многим»). Кроме ключевых полей в данной таблице хранится указатель на процедуру – элемент специализированной библиотеки, в которой хранятся процедуры – демоны. Поле с именем «Memo» хранит комментарий.

Каждый фрейм имеет возможность взаимодействовать с другими элементами ситуационного описания (фреймами) через горизонтальные и вертикальные ассоциативные связи. Связи устанавливаются при помощи дескрипторов.

Горизонтальные связи (причинно-следственные) в скелетной оболочке назначаются при помощи таблицы «HOR_LINKS», вертикальные связи (иерархические) – при помощи отношения «VER_LINKS». Обе таблицы связаны с отношением «FRAMES» связью типа «один ко многим». Обе таблицы кроме первичного и вторичного ключа хранят дескриптор на ID фреймов. Для комментария используется поле «Memo».

Выводы

В данной статье проанализированы тенденции развития предметной области систем мониторинга. Показана актуальность инструментариев автоматизации создания и поддержки СМ. Предложен инструментальный комплекс автоматизации создания и поддержки СМ. Рассмотрено ядро информационного обеспечения скелетной оболочки, которое автоматизирует ситуационное описание предметной области при помощи фреймовой модели [5].

Библиографический список

1. В.А. Лазарев, П.В. Мисевич, В.П. Хранилов. Анализ тенденций и выбор направления развития перспективных систем поддержки автоматизированного тестирования программных комплексов. – Экономика и менеджмент систем управления. №2.2 (15) 2015, с. 273-279.
2. Белов, Д.А. Модель анализа оценок качества инструментальных средств разработки автоматизированных систем / Д.А. Белов, В.П. Хранилов // Системы обработки информации и управления: труды НГТУ / Нижегор. гос. техн. ун-т.-Н.Новгород, 2008. Т.74. Вып. 15.С.93-96.
3. Громов, Г.Р. Очерки информационной технологии / Г.Р. Громов. - М.: ИнфоАрт, 1993.-336 с.
4. Мисевич П.В., Ермилов А.Э. Позиционирование систем мониторинга в области автоматизированных систем. Информационные системы и технологии (ИСТ-2017): материалы XXIII междунар. науч.-тех. конф./ Нижегор. гос. техн. ун-т.-Н.Новгород, 2017, С. 379-384.
5. Ермилов А.Э., Мисевич П.В. Построение инструментариев систем мониторинга с использованием фреймовой модели и нечёткой логики. Системы управления и информационные технологии, 2014, №3(57). С. 57-60.
6. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: Учебное пособие. 2-е изд., испр. - Спб. Питер, 2013 - 704 с.:ил.

P.V. Misevich, A.E. Ermilov

AUTOMATIZATION OF BUILD SITUATIONAL TYPE MONITORING SYSTEMS BASED ON SKELETAL CODE OF SYSTEM

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

This article describes CAE tools, which can help to build situational monitoring systems. CAE tools are made of skeletal code of monitoring system. This suite is meant for creating and support of monitoring system.

Key words: monitoring system, skeletal code, CAE tools, creating and support, monitoring.

УДК 004.056.53

С.П. Никитенкова [1], Д.А. Ковригин Д.А. [2]

ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ УЧЕТНЫХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
[2] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной работе предлагается новый метод организации подсистемы хранения учетных данных в информационных системах различного назначения. Введение дополнительного уровня ложного представления учетных данных позволяет усилить защищенность информационной системы. Предложенный алгоритм обфускация учетных записей также затрудняет взлом подсистемы аутентификации. Использование предлагаемого метода организации подсистемы хранения учетных данных позволяет восстановить работоспособность информационной системы в кратчайшие сроки.

Ключевые слова: аутентификация, парольная политика, хеш, шифрование

Информационная безопасность критически важных объектов неразрывно связана с защищенностью систем автоматизации промышленных объектов. В этой области проделана немалая работа — государственные органы в разных странах совершенствует законодательную базу, центры реагирования на компьютерные инциденты проводят исследования и все больше производителей систем автоматизации промышленных объектов понимают, что уязвимости их продуктов могут привести к человеческим жертвам [1].

Основой любых информационных систем являются идентификация и аутентификация пользователей, так как все механизмы защиты информации рассчитаны на работу с поименованными субъектами и объектами автоматизированной системы [2].

Идентификация – процесс распознавания пользователя автоматизированной системой, для чего он сообщает ей свое уникальное имя, к примеру логин. Аутентификация – средство защиты, устанавливающее подлинность лица, получающего доступ к автоматизированной системе, путем сопоставления сообщенного им идентификатора и предъявленного подтверждающего фактора. Для аутентификации пользователя обычно используются следующие факторы: секретная информация, например, пароль; уникальный предмет или техническое устройство (смарт-карта, USB-токен и пр.); биометрия и т.д. Причем эти факторы аутентификации могут применяться не только по отдельности, но и в комплексе, что повышает уровень безопасности. Правила и процедуры управления средствами аутентификации (аутентификационной информацией) регламентируются в организационно-распорядительных документах по защите информации.

Уязвимости, связанные с хранением паролей пользователей в открытом виде, могут привести к перехвату контроля над системой автоматизации промышленных объектов. Штатно авторизовавшись в системе, злоумышленник может влиять на технологический процесс, что грозит не только экономическими потерями, но и поломкой оборудования и даже авариями. А в случае получения пароля к базам данных злоумышленник может нелегитимно модифицировать информацию, создавая предпосылки к возникновению различных нештатных ситуаций. Все перечисленные выше методы аутентификации пользователя в автоматизированных системах имеют недостатки. Метод многофакторной аутентификации, основанный на использовании уникальных технических устройств-токенов требует от предприятия значительных затрат на сопровождение внедренных средств идентификации и аутентификации. Биометрическая идентификация и аутентификация также подвержена различным угрозам. К примеру, к устройству сканирования биометрических данных можно легко поднести муляж (запись голоса, муляжи пальцев из баллистического геля и др.). Также следует учитывать то, что биометрические данные любого человека меняются со временем, и таким образом, необходимо каждый раз через какой-то промежуток времени обновлять базу данных шаблонов. Если биометрические данные сотрудников

будут скомпрометированы, то организация будет вынуждена производить полную модернизацию всей системы.

Таким образом, парольная аутентификация остается самым простым и безопасным методом проверки подлинности, обладающим достаточной криптостойкость. Парольную аутентификацию просто и дешево реализовать, а всё что нужно от пользователя, так это запомнить 8-12-ти символьную комбинацию из букв, цифр и различных знаков. Однако, на практике всё совершенно иначе. Как показали последние исследования, большинство используемых паролей могут быть легко подобраны без всяких утечек конфиденциальных данных. Вообще слабая парольная политика является главной причиной взлома корпоративных информационных систем [1].

С компрометацией пароля может столкнуться любой пользователь. Компрометация пароля – известность пароля или принципа его формирования посторонним лицам. В 2017 году количество инцидентов, связанных с кражей учетных данных, выросло на 40% по сравнению с 2016-м. В 2017 году была опубликована база с 320 млн уникальных паролей. Базы данных учетных записей выставляются на продажу.

Эффективность самых сложных и дорогостоящих механизмов защиты сводится к нулю, если пользователи игнорируют элементарные правила парольной политики. Парольная политика относится ко всему персоналу, кто имеет или ответственен за доступ к конфиденциальной информации всех уровней (или любая форма доступа, которая поддерживает или требует пароля) на любой системе, оборудовании, имеющем доступ (или хранящем конфиденциальную информацию.

Использование словарных паролей — одна из самых распространенных уязвимостей, которую можно встретить практически в любой инфраструктуре. По данным Positive Research центра данный недостаток обнаружен в рамках всех без исключения проектах. При этом в 91% случаев было выявлено использование слабых паролей для привилегированных учетных записей [2]. При этом, пароль администратора, как привилегированного пользователя, позволяет иметь фактически неограниченный доступ ко всем типам данных, включая конфиденциальную информацию, персональные данные сотрудников и документы, содержащие коммерческую тайну. Риск, которому подвергает компанию рядовой пользователь, применяя нестойкий пароль, безусловно, высок. Но он не идёт ни в какое сравнение с тем ущербом, который может понести компания вследствие несанкционированного доступа с последующей утечкой конфиденциальных данных «от рук» администратора.

Словарные пароли использовались как на уровне веб-приложений, так и для доступа к различному сетевому оборудованию и серверам. Используемые ключи безопасности в ряде случаев имеют недостаточную длину или сложность и могут быть без труда подобраны нарушителем. Успешный подбор словарных или простых комбинаций может быть произведен за несколько секунд.

Пользователи, как правило, задают слабые пароли, что связано с физиологией человека. Мышление ассоциативно и напрямую связано с речью. Обычно человек мыслит образами, каждый из которых имеет название, поэтому в качестве пароля выбирается название одного из них. Таким образом, большинство паролей, задаваемых пользователями, можно найти в обычном словаре, а потому они легко подбираются методом перебора по словарю.

Для защиты паролей от подбора обычно используются однонаправленные криптографические функции. Криптографическая хеш-функция, чаще называемая просто хешем, — это математический алгоритм, преобразовывающий произвольный массив данных в состоящую из букв и цифр строку фиксированной длины. Причем при условии использования того же типа хеша длина этой строки будет оставаться неизменной, вне зависимости от объема исходных данных. Криптостойкой хеш-функция может быть только в том случае, если выполняются главные требования: стойкость к восстановлению хешируемых данных и стойкость к коллизиям, то есть образованию из двух разных массивов данных двух одинаковых значений хеша. В настоящее

время под данные требования формально не подпадает ни один из существующих алгоритмов, поскольку нахождение обратного хешу значения — вопрос лишь вычислительных мощностей.

Потенциальная уязвимость данного метода состоит в возможности подбора пароля по хэшу и использования его для password reuse attack - попытке зайти с тем же логинов и паролей в автоматизированную систему. Хэш пароля подвержен атакам типа поиска хэша по "радужным таблицам" (rainbow tables): огромным базам данных, где собираются заранее посчитанные хэши для любых возможных строк. Для подбора пароля может быть использован метод грубой силы (bruteforce): перебор всех комбинаций символов и применение к ним хэширующей функции до тех пор, пока она не вернёт искомый хэш. Как было сказано выше, в 2017 году была опубликована база с 320 млн уникальных паролей. Все пароли в базе представлены в виде хешей SHA1.

Для того, чтобы максимально усложнить процесс подбора паролей используются различные методы. Один и тот же пароль, использованный разными пользователями, должен дать разный хэш. Это увеличит время на расшифровку пропорционально количеству пользователей. Использование «соли» и «перца» - строки из случайных символов, добавляемых к паролю для вычисления хеша. Этот метод вынуждает подбирать каждый пароль в отдельности. Для организации более защищенной аутентификации был разработан алгоритм TOTP — Time-basedOneTimePasswordAlgorithm, генерирующий пароли в зависимости от времени, которые действительны в пределах определенного интервала. Такой способ защиты является более надежным, чем применение многоразовых паролей.

Сложность пароля обычно оценивают в терминах информационной энтропии. Использование паролей с высокой энтропией, состоящие из случайной комбинации символов и знаков, не дают информации, позволяющей использовать метод перебора по словарю. Однако сложные пароли можно легко забыть, и их с большей вероятностью будут записывать на бумаге, что подразумевает собой определенный риск. С другой стороны, если требовать от пользователей запоминать пароли наизусть, то они будут придумывать более лёгкие пароли, что серьёзно увеличит риск взлома.

По данным InfoWatch центра 53% атак, в результате которых был получен доступ к ресурсам внутренней сети организации, пришлись на использование словарных учетных данных. Данная уязвимость была наиболее распространенной в 2016 году, а в 2017 году выявлена на сетевом периметре 78% систем. Во всех этих системах были обнаружены простые пароли привилегированных пользователей. В 44% компаний словарные учетные данные использовались для доступа к общедоступным веб-приложениям. Слабые пароли часто используются не только простыми пользователями, но и привилегированными; самые популярные словарные пароли, используемые администраторами, — admin и P@ssw0rd. У рядовых пользователей лидируют пароли, совпадающие с именем пользователя, и пароли, состоящие только из цифр. Среди таких паролей самый распространенный — 123456: в одной крупной организации его использовали более тысячи пользователей. А если требования к минимальной длине пароля чуть более жесткие, пальму первенства захватывает пароль 12345678. Несоблюдение элементарных требований к парольным комбинациям подвергает риску всю систему корпоративной информационной безопасности. Согласно исследованию, вероятность компрометации пароля из 4-ех символов равна ~97%, а при условии использовании 9-тисимвольного пароля этот показатель почти в 6 раз меньше и составляет ~17%. Эту проблему могло бы снизить внедрение несложных политик безопасности, не позволяющих применять пароли длиной менее 8-10 символов. Добавление правил о том, что пароль не должен содержать комбинации из соседствующих символов и символов одного регистра, позволяет существенно повысить уровень защиты доступа. Однако, порог запоминаемости лежит в зоне 4-5 паролей, если их больше – принятые меры по безопасности станут стимулом для их обхода [1].

В данной работе мы представляем метод аутентификации, позволяющей не опираться на стойкость хеш-функций и необходимость задания сложных паролей. Предлагаемый метод позволяет устранить данную проблему за счет шифрования паролей, а также новой архитектуры

хранения учетных данных в информационной системе. Предложенная архитектура информационной системы соответствовала принципу Керкгоффса.

При регистрации в информационной системе пользователь вводит идентификатор учётной записи пользователя: (логин) и пароль. Идентификатор учётной записи (логин) пользователя шифруется. одним из алгоритмов симметричного шифрования. Симметричное шифрования выполняется достаточно быстро и может быть использовано для шифрования больших объемов данных. Ключ для симметричного шифрования данных обладает несколькими слоями защиты, и его значение хранится отдельно таким образом, чтобы его было сложно обнаружить атакующему (не в базе данных). С периодической частотой ключ симметричного шифрования меняется, поэтому, даже если ключ был украден, появится новый, и старый больше не будет представлять никакой пользы для злоумышленников. Результатом шифрования идентификатора учётной записи является некоторая цифровая последовательность. Далее эта цифровая последовательность добавляется в пароль пользователя, в результате чего получается новая пара значений логин/пароль. Таким образом осуществляется переход на дополнительный уровень - уровень ложного представления учетных данных.

Далее снова применяем к логину пользователя симметричный алгоритм шифрования, получаем зашифрованный логин. К ложному паролю пользователя добавляется сумма логина и ключа и шифрование применяется вновь. В конце всей операции новая пара логин/пароль отправляется нашу новую пару на валидацию с эталоном в базе данных учетных записей. Шифрование позволяет нам в случае необходимости расшифровать данные, что не позволяет сделать хеширование. Эта возможность может быть использована при расследовании инцидента безопасности. Обфускация (перепутывание) учетных записей позволяет до неузнаваемости необратимо их переделать, что также затрудняет взлом подсистемы аутентификации пользователей информационной системы.

Преимущество предлагаемого подхода также заключается в том, что сменив ключ шифрования и обеспечив миграцию данных, возможно полностью нивелировать ущерб от утечки базы данных учетных записей и сократить сбой работы информационной системы до нескольких минут, что важно для компаний, для которых даже кратковременный сбой в работе ведет к колоссальным финансовым и репутационным потерям. Предлагаемый метод защиты целостности подсистемы аутентификации позволяет восстановить работу информационной системы в кратчайшие сроки без необходимости информирования пользователей о компрометации паролей и привлечения к инциденту внимания.

Предлагаемый метод, а также разработка эффективной парольной политики и постоянный контроль за ее соблюдением, позволяет усилить защищенность систем автоматизации промышленных объектов [3].

Библиографический список

1. Аналитический центр InfoWatch Глобальное исследование утечек конфиденциальной информации в 2017 году // URL https://www.infowatch.ru/analytics/reports
2. Positive Research 2017. Сборник исследований по практической безопасности // URL https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Positive-Research-2017-rus.pdf
3. Руководящий документ. Автоматизированные системы Защита от несанкционированного доступа к информации Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации // Сборник руководящих документов по защите информации от несанкционированного доступа. М.: Гостехкомиссия России, 1998. С. 16-32

Svetlana P. Nikitenkova [1], Dmitry A. Kovruguine [2]

ORGANIZATION OF ACCOUNTS STORAGE IN INFORMATION SYSTEMS

[1] Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia
[2] Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev, Russia

The new method of storage accounts subsystem in information systems is proposed. The additional level of false representation of accounts makes it possible to strengthen the cybersecurity of the information system. The proposed obfuscation algorithm of accounts also makes it difficult to crack the authentication subsystem. The proposed method of accounts storage allows to restore the information system operability in the shortest possible time.

Keywords: authentication, password policy, hash, encryption

УДК 378.147.227

Ю.С. Павлючик, Ю.А. Скудняков

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г.Минск

В работе проведена оценка эффективности системы адаптивного электронного обучения. На основе результатов проведенного анализа сформулирован вывод о целесообразности разработки, использования и развития системы адаптивного электронного обучения в силу имеющихся у нее достоинств: гибкости, оперативности, комфортности процесса обучения, обеспечение высокого уровня усвояемости изучаемого материала.

Ключевые слова: методы оценки; системы адаптивного электронного обучения; эффективность; успеваемость.

Введение

Электронное обучение – обучение, реализованное на базе всестороннего применения мультимедиа, удаленного доступа к распределенным образовательным ресурсам на основе веб-технологий, с автоматизированным контролем и анализом результатов обучения и широким использованием разнообразных сетевых средств взаимодействия обучаемых между собой и с преподавателем. Развитие электронного обучения вызвано недостаточной эффективностью традиционных систем обучения, таких как лекционные и практические занятия, вследствие их малой информативности и сложности в выработке индивидуального подхода к обучаемому. С использованием технологии адаптивного обучения, обучаемый получает возможность самостоятельно работать с учебным материалом, проходить контроль знаний и анализировать его результаты. Задания для контроля знаний подбираются с учетом успеваемости обучаемого.

Таким образом, вырабатывается индивидуальный подход к обучению.

Оценка эффективности адаптивного обучения

Эффективность адаптивного обучения определяется по его показателям качества, к основным из которых можно отнести:

1) трудность решаемого задания, определяемая числом правильных на него ответов;
2) доля правильных ответов, вычисляемая по формуле:

$$p_j = \frac{R_j}{N}, \quad (1)$$

где R_j – трудность задания, или общее количество правильных ответов на задание в группе обучаемых; N – количество обучаемых;

3) доля неправильных ответов, определяемая по формуле:

$$q_j = \frac{W_j}{N}, \quad (2)$$

где W_j – количество неправильных ответов на задание в группе обучаемых, N –количество обучаемых;

4) логит трудности задания L_d, определяющий меру трудности задания:

$$L_d = ln\frac{q_j}{p_j}, \quad (3)$$

где q_j – доля неправильных ответов, определяется по формуле (2); p_j – доля правильных ответов, определяется по формуле (1).

Чем выше значение данного показателя, тем труднее задание для группы обучаемых.

С точки зрения обучаемого существуют аналогичные характеристики – доля правильных и неправильных ответов обучаемого, логит уровня знаний.

Доля правильных ответов обучаемого на тестовые задания p_i определяется как

отношение количества правильных ответов к общему количеству заданий:

$$p_i = \frac{Y_i}{K}, \quad (4)$$

где Y_i – количество правильных ответов обучаемого; K –количество заданий.

Доля неправильных ответов q_i определяется как доля неверных ответов к количеству заданий:

$$q_i = \frac{Z_i}{K}, \quad (5)$$

где Z_i – количество неправильных ответов обучаемого; K –количество заданий.

Логит уровня знаний L_k определяется как отношение доли правильных ответов к доле неправильных ответов обучаемого:

$$L_k = ln\frac{p_i}{q_i}, \quad (6)$$

где p_i – доля правильных ответов обучаемого, определяется по формуле (4); q_i – доля неправильных ответов обучаемого, определяется по формуле (5).

Логиты трудности задания (3) и уровня знаний (6) являются симметричными. Таким образом, имея значения данных показателей, возможно подобрать обучаемому задания согласно его уровню знаний. На основании логитов трудности задания и успеваемости обучаемых имеется возможность рассчитать вероятность решения задания обучаемым P при помощи метрической системы Г. Раша [1]:

$$P = \frac{e^{1.7(L_k - L_d)}}{1+e^{1.7(L_k - L_d)}}, \quad (7)$$

где L_k – логит уровня знаний обучаемого, определяется по формуле (6); L_d – логит трудности задания, определяется по формуле (3).

Однако однопараметрическая модель Раша не может быть применена в том случае, если тест содержит задания с различной дифференцирующей способностью или дискриминативностью (способность заданий теста выявлять сильных и слабых обучаемых, дифференцировать обучаемых по их подготовке). Решение данной проблемы предложил А.Бирнбаум, который ввел еще один параметр – a [1]:

$$P = \frac{e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}{1+e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}, \quad (8)$$

где a_i – дифференцирующая способность отдельного задания.

Для еще более точного соответствия эмпирическим данным А.Бирнбаум ввел третий параметр – коэффициент угадывания c [1]:

$$P = c_i + (1 - c_i)\frac{e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}{1+e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}, \quad (9)$$

где c_i – коэффициент угадывания ответа на отдельное задание.

Также существует ещё четырёхпараметрическая модель, которая включает в себя дополнительно параметр «невнимательности» - d [1]:

$$P = c_i + (1 - c_i - d_i)\frac{e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}{1 + e^{1.7a_i(L_k - L_d)}}, \quad (10)$$

где d_i – коэффициент невнимательности при ответе на отдельное задание.

Однако расчет всех параметров четырехпараметрической модели является достаточно сложной задачей. Если для модели Г.Раша получен последовательный алгоритм нахождения параметров модели, то для остальных моделей для определения параметров используются численные методы на основе подхода максимального правдоподобия, что при большом объеме данных требует значительных вычислительных ресурсов [1].

Логиты трудности задания и уровня знаний являются одними из ключевых характеристик, поскольку позволяют подобрать задания обучаемому исходя их его уровня знаний. Следует отметить, что вышеприведенные показатели не отображают взаимосвязи между заданиями внутри теста, поэтому не могут отвечать за качество составления тестовых заданий. Для

определения качества составления заданий и их соответствия друг другу внутри теста необходимо рассчитать общий уровень успеваемости, вариацию, дисперсию и дифференцирующую способность.

Общий уровень успеваемости является одним из наиболее простых показателей, характеризующий успеваемость обучаемых в группе. Он определяется путем вычисления среднего балла M в группе обучаемых:

$$M = \frac{\sum Y_i}{N}, \quad (11)$$

где $\sum Y_i$ – сумма правильных ответов обучаемых, принимавших участие в тесте; N –количество обучаемых.

Вариация показывает наличие отклонения между значениями баллов и средним арифметическим значением. Чем меньше значение вариации, тем менее сопоставимы задания внутри теста, поскольку они обладают примерно одинаковой сложностью. То есть все обучаемые решают задачу одинаково, например, не делают ошибок или допускают максимальное количество ошибок.

Из этого следует, что задача является либо слишком легкой, либо слишком сложной.

Расчет показателей вариации тестовых баллов начинается с определения суммы квадратов отклонений значений баллов от среднего арифметического SS_y:

$$SS_y = \sum (Y_i - M)^2, \quad (12)$$

где Y_i – количество правильных ответов испытуемого; M – средний балл в группе обучаемых, определяется по формуле (11).

Показатель SS_y зависит от числа обучаемых: при прочих равных условиях, чем больше группа, тем большей оказывается сумма квадратов отклонений значений баллов от среднего арифметического, что делает этот показатель несопоставимым для групп с разным числом обучаемых. Из этого следует, что значения показателя будут некорректными для групп с большим числом обучаемых. Поэтому для исправления отмеченного недостатка используют второй прием – делят SS_y на число обучаемых в группе. В результате получается показатель вариации тестовых баллов, называемый дисперсией, который показывает величину квадрата суммы отклонений баллов от среднего арифметического балла:

$$s_y^2 = \frac{SS_y}{N-1}, \quad (13)$$

где SS_y – вариация баллов, определяется по формуле (12); N – количество обучаемых, при $N > 1$.

Стандартное отклонение S_y является общепринятой мерой вариации тестовых баллов, которое вычисляется путем извлечения квадратного корня из значения дисперсии:

$$S_y = \sqrt{\frac{SS_y}{N-1}}, \quad (14)$$

где SS_y – вариация баллов, определяется по формуле (12); N – количество обучаемых, при $N > 1$.

Чем ниже показатели стандартного отклонения и дисперсии, тем выше вероятность того, что задания внутри теста подобраны некорректно. В этом случае на задания отвечают правильно или неправильно наибольшее число участников. Такие задания некорректно объединены внутри теста и подлежат удалению.

Задание в тестовой форме нельзя называть тестовым, если оно не коррелирует с суммой баллов по всему тесту. При наличии больших выборочных совокупностей и нормального распределения баллов по всему тесту рассчитывается вариант коэффициента корреляции Пирсона, который называется point-biserial (коэффициентом корреляции r) [1]:

$$r = \frac{M_1 - M_0}{S_y} \cdot \sqrt{\frac{n_0 \cdot n_1}{n \cdot (n-1)}}, \quad (15)$$

где M_1 – среднее арифметическое по всему тесту для обучаемых, решивших задание верно; M_0 – среднее арифметическое по всему тесту для обучаемых, решивших задание неверно; S_y– величина стандартного отклонения результатов тестового балла от среднеарифметического значения, рассчитывается по формуле (14); n_0 – число обучаемых, решивших задание неверно; n_1 – число обучаемых, решивших задание верно, n – число обучаемых, решавших задание, определяется как сумма показателей n_0 и n_1.

Нулевая корреляция свидетельствует об отсутствии у задания системных свойств (задание слабо или не связано с другими заданиями внутри теста, либо является слишком сложным для данного теста), присущих тесту. Такие задания, равно как и задания с отрицательными значениями r, устраняются из тестовых материалов, как не выдержавшие эмпирической проверки.

Анализ системы адаптивного электронного обучения

В [2] было предложено рассматривать процесс обучения как процесс управления сложной системой. Аналогично можно представить и процесс управления адаптивным контролем знаний (рис.1).

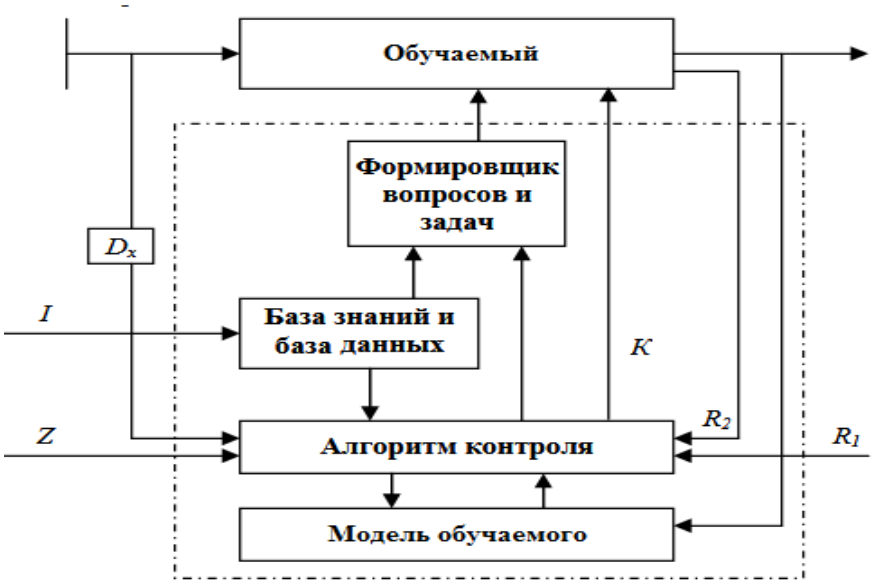


Рис.1. Модель адаптивного контроля знаний

Блок «Алгоритм контроля» выполняет следующий функционал:

1) проверка правильности ответов обучаемого и выполняемых им действий;
2) определение результатов выполнения обучаемым заданий [2].

«Модель обучаемого» содержит информацию об обучаемом (предыстория обучения, результаты текущей работы, общий уровень подготовленности).

«Формировщик вопросов и задач» используется для формирования и выдачи обучаемому очередного задания.

«База знаний (БЗ)» содержит методы и/или модели процесса контроля, а также совокупность знаний предметной области. «База данных (БД)» включает наборы вопросов и задач, предназначенных для проверки знаний обучаемого и/или данные для формирования заданий. Блок «Алгоритм контроля» на основе анализа ответа обучаемого, целей контроля Z и используемого метода проведения контроля, учитывая внешние ресурсы R_1 (например, возможности системы контроля) и внутренние ресурсы обучаемого R_2 (например, время контроля), а также состояние среды D_x, определяет параметры задания, которое должно быть предложено обучаемому. «Формировщик вопросов и задач», получив от «Алгоритма контроля» данные о параметрах следующего задания, выбирает из БД и/или БЗ необходимую информа-

цию *I*, формирует текст задания и выдает его обучаемому. В простейшем случае работа этого блока сводится к выбору нужного вопроса или задачи из базы данных. При некоторых видах контроля (например, при текущем контроле знаний или самопроверке) может быть предусмотрена обратная связь *K*,которая состоит в выдаче комментария на ответ обучаемого [2].

Рассмотренная модель реализована с помощью разработанного программного средства на языке T-SGL.

Заключение

В работе проведена оценка эффективности функционирования системы адаптивного электронного обучения, основанной на анализе и использовании ряда основных показателей качества адаптивного обучения, математические модели которых легко поддаются программной реализации и, тем самым, достигается автоматизация контроля успеваемости обучаемых, высокое качество составления тестовых заданий и методических материалов.

При использовании данной системы обеспечиваются оперативность, комфортность гибкость процесса обучения, высокий уровень усвояемости изучаемого материала.

Библиографический список

1. Мазорчук, М.С., Добряк, В.С., Емельянов, П.С. Методы и модели анализа качества тестовых заданий и моделирование компьютерного адаптивного тестирования в системах адаптивного дистанционного обучения //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии No73, 2016.

2. Зайцева, Л.В., Прокофьева, Н.О. Модели и методы адаптивного контроля знаний // EducationalTechnology&Society 7(4), 2004.

Y.S. Pavlyuchik, Y.A. Skudnyakov

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM OF ADAPTIVE E-LEARNING

Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

In this paper we evaluated the effectiveness of the system of adaptive e-learning. On the basis of the results of the analysis the conclusion about expediency is formulated development, use and development of adaptive e - learning system due to its advantages: flexibility, efficiency, comfort of the learning process, ensuring a high level of digestibility of the studied material.

Key words: evaluation methods; adaptive e-learning systems; efficiency; academic performance.

УДК 681.3.06

Н. О. Пашковский, Ю.А. Скудняков

ЭЛЕКТРОННОЕ СРЕДСТВО ОБУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАНИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Разработано электронное средство обучения (ЭСО) для получения и оценки полученных знаний по дисциплине «Защита компьютерной информации» для учащихся ССУЗов. ЭСО состоит из трёх модулей (изучение материала, тестирование, главное меню), элементов управления, базы данных для изучаемого материала, генератора тестов.В основе работы ЭСО используется разработанное программное средство(ПС),которое также может применяться в качестве шаблона для новых средств учебного характера. Первыймодуль включаетзаданные администратором страницы с материалом для изучения, второй представляет собой блок тестовых заданий для их выполнения и оценки полученных знаний, модуль главного меню используется для вывода ознакомительной информации и результатов. В качестве базы данных изучаемого материала используются точечные рисунки. Генератор тестов представлен в виде случайным образом выбираемых тестовых заданий. Для разработки ЭСО использовалась средаMicrosoftVisualStudio 2017 и язык C#.

Ключевые слова:электронное средство обучения; программное средство; шаблон; процесс обучения.

Введение

Актуальность работы заключается в том, что в последнее время тема создания ЭСО становится обсуждаемой и востребованной.

Современная система образования все активнее использует информационные технологии (ИТ) и компьютерные телекоммуникации.

Динамично развивается система дистанционного образования, чему способствует ряд факторов, и прежде всего - оснащение образовательных учреждений мощной компьютерной техникой и развитие сообщества сетей Интернет.

ЭСО могут использоваться как в целях самообразования, так и в качестве составной части дистанционного образования.

Практика использования ЭСО показала, что обучаемые качественно усваивают изучаемый материал, о чем свидетельствуют результаты тестирования.

Таким образом, развитие ИТдает широкую возможность для создания новых методов и методик в образовании и тем самым повысить его качество [1].

Реализация ЭСО

Учебное ПС несложно использовать в качестве шаблона для других тестов, поскольку реализация достаточно простая и понятная практически любому пользователю, имеющему минимальный опыт в сфере ИТ.

В лекционном материале используется для отображения компонент TabControl. Также этот компонент используется для обеспечения связи между тестовыми вопросами и для последовательного перехода между ними, по мере ответа на вопросы. Свойство SelectTab используется для перехода к следующему вопросу теста.

Внешний вид главного меню представлен на рис.1.

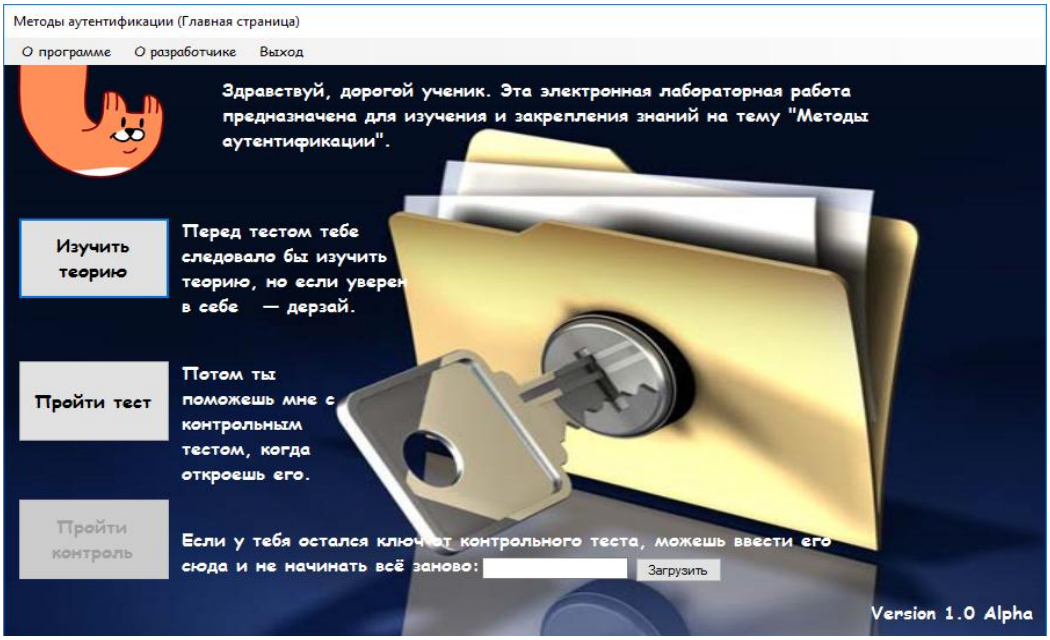


Рис. 1. Главное меню

На рис.2 приведён пример представления лекционного материала.

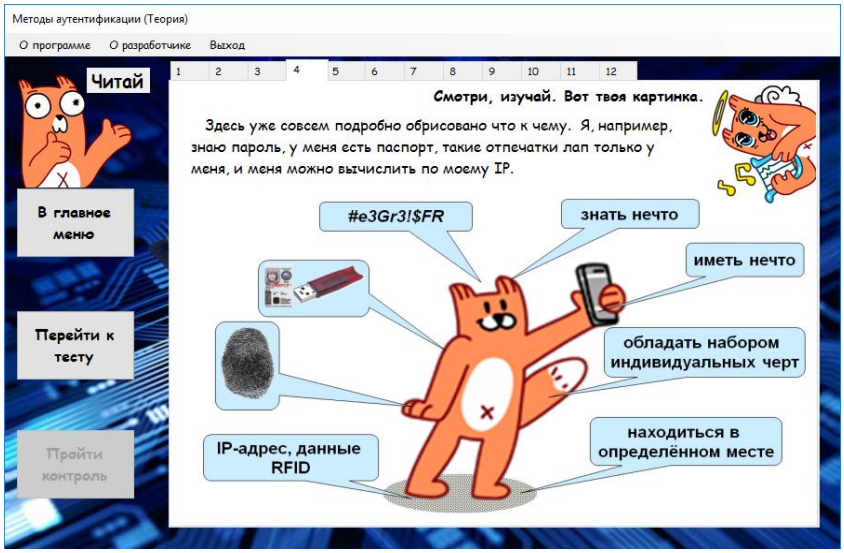


Рис. 2. Пример представления лекционного материала

Лекционный материал можно без особых трудностей заменить на другой путём конвертирования презентации с лекцией в точечные рисунки, после чего вставив их вместо уже имеющихся. Это реализовано так, чтобы программа могла быть шаблоном для других тестов и других лекций, не вызывая сложностей с сопровождением.

Из рис.2 видно, что средство обучения оформлено в оригинальном стиле. Такой подход использовался для большей наглядности и для того, чтобы заинтересовать обучаемых в изучении материала. Как оказалось, этот подход, совмещающий игру и обучение, достаточно эффективный, чтобы улучшить усвоение лекционного материала.

Для разработки интерфейса ЭСО использовались графические редакторы CorelDRAW 11 и AdobePhotoshop 7.0.Тестовые задания представлены в виде текстовых Label и связанных между собой компонентов CheckBoxиButton. Таким образом, текст вопроса располагается в информационном Label, варианты ответа выбираются с помощью соответствующих CheckBox, а подтверждение ответа происходит при нажатии Button (кнопки).Генерация новых тестов, с использованием ПС в качестве шаблона, не вызывает трудностей, поскольку механизм создания прост и интуитивно понятен.

Пример внешнего вида тестового вопроса представлен на рис.3.

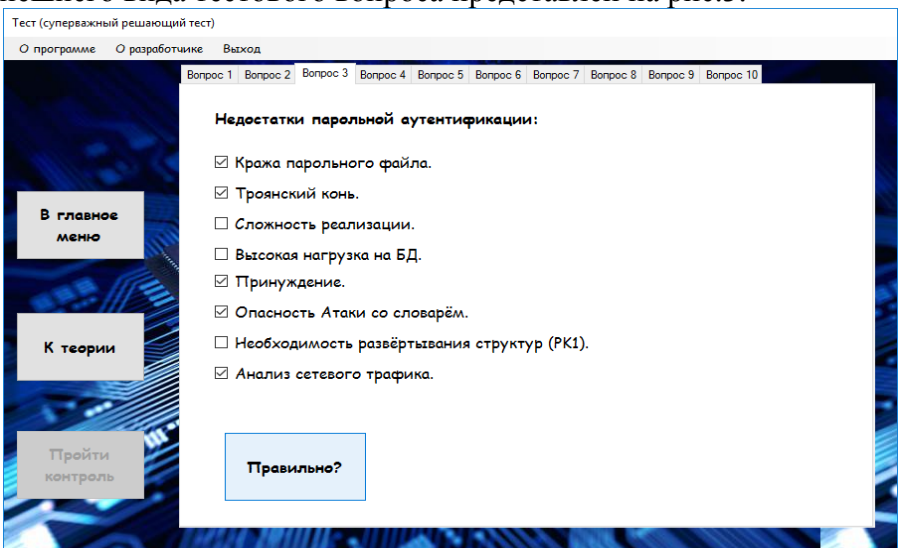


Рис. 3. Внешний вид тестового вопроса

Со временем появилась необходимость в объединении лекционного материала и лабораторного практикума в одном электронном пособии. Также есть потребность в проверке полученных знаний. Проверить усвоение материала можно посредством электронного тестирования.Это дает возможность обучаемому, после освоения материала, закрепить полученные навыки и проверить себя на знание материала.

ЭСО реализовано с простым интерфейсом, что позволяет каждому обучаемому самостоятельно работать с ЭСО, экономить время дополнительной работы преподавателя с отстающими обучаемыми. С внедрением ЭСО преподаватель получает дополнительные возможности в своей работе с обучаемыми, поскольку у него появляется больше времени на индивидуальную работу с каждым обучаемым [2], а также снижается потребность в издании методического материала на бумажных носителях. Внедрение ЭСО, помимо экономии материальных средств и времени, способствует росту качества образовательного процесса. Пользователями разработанного ЭСО могут быть организации как образовательного, так и другого профиля.

По статистическим данным, обучаемый с первого раза усваивает примерно 1/4 часть услышанного, 1/3 часть увиденного, 1/2 часть услышанного и увиденного одновременно. Педагоги и психологи утверждают, что наибольший объем, а именно - 3/4, изучаемого материала, усваивается в действии. Следовательно, электронные учебные пособия с успехом могут создавать сами обучаемые, так как в процессе разработки обучаемый сможет оперировать большим количеством не только теоретического материала по изучаемой дисциплине, но также будет составлять практические и проверочные задания, контрольные тесты и др.

В условиях недостаточного количества учебников по разнообразным дисциплинам значимость пособий, изготовленных обучаемыми самостоятельно, еще более возрастает. Для

обучаемого процесс создания учебного пособия связан, прежде всего, с осознанием и пониманием тематики учебного материала, охватываемого данным учебным пособием.

Таким образом, включаясь в процесс конструирования, обучаемый сможет тщательнее изучить предметный материал, по которому создается электронное учебное пособие [1-3].

Диаграмма деятельности программы приведена на рис.4.

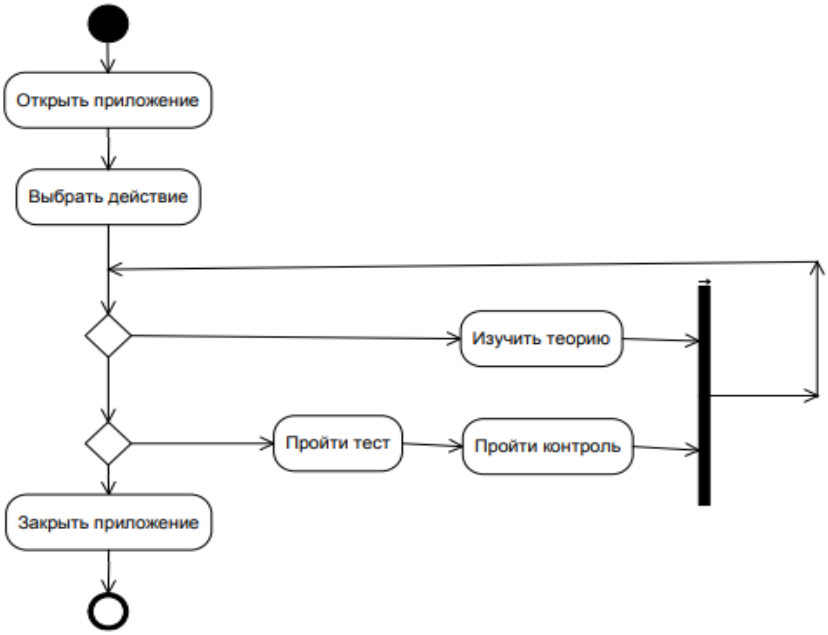


Рис. 4. Диаграмма деятельности

Выводы

Использование результатов разработки позволяет существенно сэкономить временные и трудовые ресурсы преподавателей, а также повысить успеваемость обучаемых.

Библиографический список

1. Брябрин, В.М. Программное обеспечение персональных ЭВМ. – М.: Наука, Физматлит., 1990.–272с.
2. Гриценко, Е.М. Технология разработки мультимедийных образовательных систем. – Красноярск: СибГТУ, 2008. – с. 10–68.
3. Скабцов, Н.В.Аудит безопасности информационных систем – Питер: Библиотека программиста, 2018.–272с.

N.O.Pashkowski, Y.A. Skudnyakov

ELECTRONIC MEANS OF TRAINING AND ASSESSMENT OF ACQUIRED KNOWLEDGE

Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics

Developed e-learning tool for receiving and evaluation of the acquired knowledge on the subject "computer security" for the students of Colleges. E-learning tool consists of three modules (material study, testing, main menu), controls, database for the studied material, test generator.Based on the work ofe-learning tool used developed software tool,which can also be used as a template for new funds for public education. The first module includes pages set by the administrator with material for study, the second is a block of test tasks for their performance and evaluation of knowledge, the main menu module is used to display introductory information and results. Bitmaps are used as the study material database. The test generator is presented in the form of randomly selected test tasks. For the development of e-learning tool has been used the environment MicrosoftVisualStudio 2017 and the C# language.

Key words: e-learning tool; software tool; a template; a process of learning.

УДК 004.891

Ю.А. Скудняков, А.С. Барсук

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Разработана продукционная экспертная система диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. В качестве первоначальных заболеваний для диагностики выбраны стенокардия, очаговые дистрофии миокарда, микроинфаркт, инфаркт миокарда. Выделено 9 клинических характеристик болезней. Определена структура и несколько правил логического вывода. В качестве инструмента реализации используются язык и среда разработки экспертных систем CLIPS.

Ключевые слова:экспертная система; сердечно-сосудистые заболевания; база знаний; диагностика; продукционная модель.

Введение

Экспертные системы были разработаны как научно-исследовательские инструментальные средства в 1960-х годах и рассматривались в качестве искусственного интеллекта специального типа, предназначенного для успешного решения сложных задач в узкой предметной области, такой как медицинская диагностика заболеваний [1]. Экспертные системы относятся к классу интеллектуальных информационных систем, то есть основанных на использовании искусственного интеллекта. Подобные системы способны частично заменить эксперта в той или иной области деятельности. Основные функции экспертных систем – осуществлять рассуждения на основании имеющихся фактов, заданных правил логического вывода и непрерывно накапливать новые знания о предметной области. Экспертная система способна не только делать тот или иной вывод, но и обосновывать его путём описания хода рассуждений. Данные возможности могут быть очень полезными в медицинских информационных системах, так как это позволит не только предоставлять справочную информацию, но и помогать сотрудникам анализировать данные и принимать решения при диагностике заболеваний.

В данной работе рассматривается процесс диагностики ряда сердечно-сосудистых заболеваний и пути его автоматизации при помощи достижений в области проектирования и разработки интеллектуальных информационных систем.Для этого были решены следующие задачи: изучение предметной области и разработка модели экспертной системы.

Предметная область

Сердечно-сосудистые заболевания представляют собой группу болезней сердца и кровеносных сосудов, в которую входят [2]:

1)ишемическая болезнь сердца – болезнь кровеносных сосудов, снабжающих кровью сердечную мышцу;

2) болезнь сосудов головного мозга – болезнь кровеносных сосудов, снабжающих кровью мозг;

3) болезнь периферических артерий – болезнь кровеносных сосудов, снабжающих кровью руки и ноги;

4)ревмокардит – поражение сердечной мышцы и сердечных клапанов в результате ревматической атаки, вызываемой стрептококковыми бактериями;

5) врожденный порок сердца – существующие с рождения деформации строения сердца;

6) тромбоз глубоких вен и эмболия легких - образование в ножных венах сгустков крови, которые могут смещаться и двигаться к сердцу и легким.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смерти во всем мире: ни по какой другой причине ежегодно не умирает столько людей, сколько от ССЗ. По оценкам, в 2012 году от ССЗ умерло 17,5 миллиона человек, что составило 31% всех случаев смерти в мире. Из этого числа 7,4 миллиона человек умерли от ишемической болезни сердца и 6,7 миллиона человек в результате инсульта [2].

В данной работе рассмотрена диагностика лишь некоторых отдельно взятых ССЗ, поскольку охватить всю область является сложной задачей. Предполагается, что со временем проектируемая экспертная система будет расширяться, получит возможность диагностировать больше заболеваний. Первоначально экспертная система будет помогать диагностировать следующие заболевания: стенокардия, очаговые дистрофии миокарда, микроинфаркт, инфаркт миокарда.

Стенокардией называются приступы внезапной боли, возникающие из-за острого недостатка кровоснабжения миокарда. Как правило, это раннее проявление развивающейся ишемической болезни сердца [3].

Инфаркт миокарда – острая сердечная недостаточность, сопровождающаяся некрозом участка миокарда [3].Инфаркт миокарда развивается вследствие закупоривания участка миокарда тромбом, вследствие чего в поражённый участок прекращает поступать кровь и он начинает отмирать. Чаще всего инфаркт миокарда возникает в стенке левого желудочка и иногда распространяется на правый желудочек и предсердие [3].

Очаговые дистрофии миокарда и микроинфаркт являются промежуточными этапами между стенокардией и средним/тяжёлым инфарктом миокарда.

Основные клинические характеристики данного заболевания приведены в табл.1 [3].

Таблица 1

Диагностика различных форм коронарной недостаточности

Клиническаяхарактеристика	Форма коронарной недостаточности			
	стенокардия	очаговые дистрофии миокарда	микроинфаркт	инфаркт миокарда
1	2	3	4	5
Условиявозникновенияболей	Физическое и нервно-психологическое перенапряжение, выход на холод, подъём на возвышенность, реже в покое	Физическое и нервно-психологическое перенапряжение, выход на холод, подъём на возвышенность, реже в покое	Физическое и нервно-психологическое перенапряжение, выход на холод, подъём на возвышенность, реже в покое	В покое, а также после больших физических и эмоциональных нагрузок

Окончание табл.1

1	2	3	4	5
Длительностьболей	До10 минут	30-40 минут	30-60 минут	От 30 минут до нескольких часов и более
Эффект от приёма нитроглицерина или валидола	Имеется	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Сердечная недостаточность (одышка, отёк лёгкого, тахикардия, увеличение печени)	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Может иметь место
Падениеартериальногодавления	Отсутствует	Отсутствует	Может иметь место	Может иметь место
Повышениетемпературытела	Отсутствует	Отсутствует	Небольшое повышение температуры через 6-8 часов после начала приступа, которое сохраняется 1-2 дня	Небольшое повышение температуры через 6-8 часов после начала приступа, которое сохраняется 1-2 дня
Нарушениеритма	Отсутствует	Может иметь место	Может иметь место	В 50-60% случаев, при непрерывном наблюдении за ЭКГ – в 90% случаев
Лейкоцитоз	Отсутствует	Небольшой в первый день	Имеет место	Имеет место чаще всего в течение нескольких дней
Шумтрениеперикарда	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Может иметь место на 2-3-й день

Таким образом, в этом разделе были кратко рассмотрены основные характеристики выбранных для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Данные характеристики положены в основу модели разрабатываемой экспертной системы.

Разработка модели экспертной системы

Структура стандартной экспертной системы представлена на рис.1.Такая система включает следующие компоненты [1]:

1) пользовательский интерфейс – механизм, с помощью которого происходит взаимодействие пользователя и экспертной системы;

2) средство объяснения – компонент, позволяющий объяснить пользователю ход рассуждения системы;

3) рабочая память – глобальная база фактов, используемая в правилах;

4)машина логического вывода – программный компонент, который обеспечивает формирование логического вывода (принимаются решения о том, каким фактам удовлетворяют правила или объекты), располагает выполняемые правила по приоритетам и выполняет правила с наивысшим приоритетом;

5) рабочий список правил – созданный машиной логического вывода и расположенный по приоритетам список правил, шаблоны которых удовлетворяют фактам или объектам, находящимся в рабочей памяти;

6) средство приобретения знаний – автоматизированный способ, позволяющий пользователям

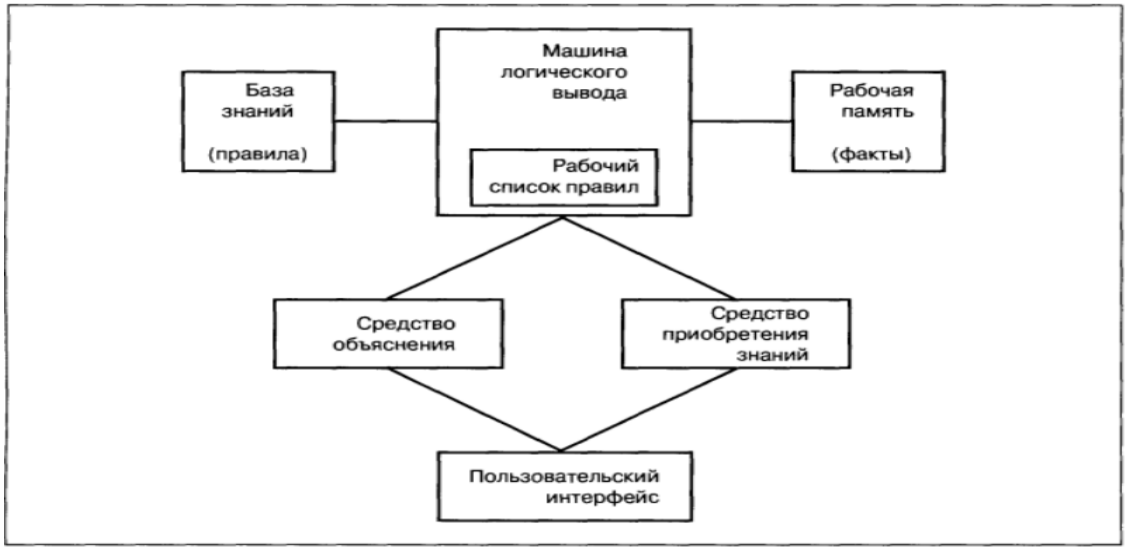


Рис.1. Структура экспертной системы, основанной на правилах[2]

вводить знания в систему без привлечения инженера по знаниям.

В системе, основанной на правилах, знания в проблемной области, необходимые для решения задач, закодированы в форме правил и содержатся в базе знаний или продукционной памяти [1]. Данные экспертные системы основаны на продукционной модели знаний. По своей сути продукционные модели знаний близки к логическим моделям, что позволяет организовать весьма эффективные процедуры логического вывода данных[4].Правила (продукции) в продукционной модели можно представить в следующем виде [4]:

(i) Q; P; A>B; N,

где i – это имя продукционной модели знаний или ее порядковый номер;Q – сфера применения правила;A > B – ядро продукции, представляющая условную конструкцию ”ЕСЛИ-ТО”;P – условие применимости ядра продукции;N – постусловие продукции.

Таким образом, главными задачами разработки экспертной системы, основанной на правилах, является создание правил вывода и наполнение ими базы знаний. Поскольку правила обрабатывают факты, то необходимо также определиться с набором первоначальных параметров, которые будут содержать факты для обработки правилами.

В качестве основных параметров разрабатываемой экспертной системы используются клинические характеристики форм коронарной недостаточности (табл.1). Возможныйнабор продукций для диагностики вышеперечисленных заболеваний представлен в табл.2.

Таблица 2

Примеры правил для разрабатываемой диагностической системы

(i)	Q	P	A > B	N
1	Диагностика	-	ЕСЛИ есть боль,длит_болей<= 10 ТО приём валидола или нитроглицерина	-
2	Диагностика	Принят валидол или нитроглицерин	ЕСЛИ приём дал эффект ТО подозрение на стенокардию	-
3	Диагностика	Принят валидол или нитроглицерин	ЕСЛИ приём не дал эффекта ТО измеритьартериальноедавление	-
4	Диагностика	-	ЕСЛИ длит_болей>10,длит_болей<= 40 ТО измерить артериальное давление	-
5	Диагностика	Измерено артериальное давление	ЕСЛИ давление не понижено ТО проверить сердечный ритм	Подозрение на очаговые дистрофии миокарда
6	Диагностика	Измерено артериальное давление	ЕСЛИ давление понижено ТО измерить температуру	Подозрение на микроинфаркт или инфаркт миокарда
7	Диагностика	Измерена температура	ЕСЛИ температура повышена ТО проверить наличие шума трения миокарда	-

Приведённый список правил далеко не полный, однако он отражает принципы, по которым могут быть построены правила логического вывода базы знаний разрабатываемой экспертной системы. В качестве машины логического вывода используется одна из известных систем разработки продукционных экспертных систем, таких как CLIPS [1]. Основными компонентами CLIPSявляются: список фактов, база знаний и машина логического вывода. Для описания фактов используются шаблоны, представляющие собой объекты с полями для хранениязначений. В этом случае приведённые выше правила должны быть переписаны в соответствии с правилами языка CLIPS. Для сбора клинических характеристик необходимо определить соответствующий шаблон, где каждой характеристике отведено собственное поле. В качестве пользовательского интерфейса используются как веб-страница, взаимодействующая со средством объяснения и средством приобретения знаний на сервере, так и настольное и мобильное приложение.

Заключение

В данной работе была определена предметная область: избраны заболевания для диагностики и определены их основные клинические характеристики. Для разрабатываемой экспертной системы была определена структура, выбрана продукционная модель представления знаний и разработан ряд первоначальных правил, хотя их список на данный момент не полный.Результаты данной работы будут использованы в дальнейшей разработке базы знаний экспертной системы.

Библиографический список

1. Джарратано, Д., Райли, Г. Экспертные системы. Принципы разработки и программирование // 4-е издание / Вильямс, 2007. – 1152с.
2. Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]: Сердечно-сосудистые заболевания. – Режим доступа: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru/. – Дата доступа: 20.02.2018.
3. Гардиенко, А. Н. Справочник врача-кардиолога / А. Н. Гардиенко – Мн.: Современный литератор, 2002. – 128с.
4. Базы данных: конспект лекций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.libma.ru/kompyutery_i_internet/bazy_dannyh_konspekt_lekcii/. – Дата доступа: 21.02.2018.

Y.A. Skudnyakov, A.S. Barsuk

DESIGNING THE EXPERT SYSTEM FORDIAGNOSIS OF CARDIOVASCULAR DISEASES

Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics

Developmed a product expert system for diagnosis of cardiovascular diseases. As initial diseases for the diagnosis selected angina, focal dystrophies of the myocardium, microinfarction, myocardial infarction. There are 9 clinical characteristics of diseases. The structure and several rules of inference are defined. As a tool for implementation, the language and the development environment for CLIPS expert systems are considered.

Key words: expert system; cardiovascular diseases; knowledge base; diagnosis; production model.

УДК 681.3

Ю.А. Скудняков, А.С. Барсук, А.В. Гордеюк

МОДЕЛИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Разработаны модели и программное обеспечение организации современного дистанционного обучения.Эффективность данной разработки подтверждается ее высокими показателями качества и практическими результатами использования в современной системе дистанционного обучения (СДО), заключающимися в минимизации временных, нервно-психологических издержек, повышении комфортности, гибкости, глубины и полноты освоения изучаемого материала в процессе обучения.

Ключевыеслова:образование;дистанционное обучение; математические модели; программное средство.

Введение

Информационные технологии уже долгое время применяются при организации учебного процесса в образовательных учреждениях и дистанционном обучении (ДО). ДО — взаимодействие преподавателя и обучаемых между собой на расстоянии, отражающее все присущие учебному процессу компоненты (цели, содержание, методы, организационные формы, средства обучения) и реализуемое специфичными средствами интернет-технологий или другими средствами, предусматривающими интерактивность [1]. ДО — это самостоятельная форма обучения, а информационные технологии в дистанционном обучении являются ведущим средством. ДО обладает рядом преимуществ: позволяет снизить затраты на проведение обучения,сократить время на обучение, проводить обучение большого количества человек, повысить качество обучения за счет применения современных информационных технологий, создать единую образовательную среду.

За последние годы для нужд ДО были разработаны средства тестирования обучаемых, электронные учебные пособия, справочники и программы-тренажёры. Интенсивное развитие сетевых технологий, средств передачи информации в сети Интернет и их широкое распространение в самых разных сферах человеческой деятельности существенно расширили возможности учебных заведений и преподавателей при организации ДО. Теперь появилась возможность проводить прямые трансляции лекций в сети Интернет, публиковать обучающие видеоролики, взаимодействовать с аудиторией через форумы, чаты и конференции в режиме реального времени.

В процессе разработки были проанализированы существующие формально-алгоритмическое обеспечение и программные системы для организации ДО. Были выявлены достоинства и недостатки существующих методов и средств для передачи учебно-методического материала и взаимодействия преподавателей и обучающихся в СДО.Основным недостатком существующих решений в области организации ДО является отсутствие системного подхода, использование которого позволяет обеспечить процесс взаимосвязи и взаимодействия основных компонентов СДО какматематическое, алгоритмическое и программное обеспечения.

В данной работе сделана попытка органически увязать все вышеперечисленные компоненты в единую СДО. Использование такого подхода позволяет повысить эффективность процесса организации современного ДО, поскольку, при этом, создается единое информационно-образовательное пространство для подготовки квалифицированных специалистов.

Исходя из вышеизложенного, данная работа является актуальной и имеет перспективы своего развития.

Проблемы и технологии реализации организационного процессадистанционного обучения

При организации ДО необходимо решить три базовые проблемы:

1) организационная: включаетв себя общие проблемы при организации обучения: учёт и регистрация обучаемых, мониторинг текущей успеваемости каждого обучаемого, пересылка учебных материалов, организация связи между обучаемыми и преподавателями и т.д.;

2) учебно-методическая: подготовка учебных материалов и организация учебной работы как при непосредственных контактах преподавателей с обучаемыми, так и разработка специфических приемов педагогической дистанционной работы, в том числе методик проведения телеконференций, учебного контроля и других учебно-методических мероприятий;

3) техническое обеспечение функционирования системы: включает в себя работу серверов и сетей (программное обеспечение и функционирование),технические проблемы организации и устойчивой связи через Интернет, создание и функционирование интрасетей. Сюда относится и разработка программного обеспечения для пользователей, обустройство средствами связи и слежение за их бесперебойным функционированием, средства создания, размножения и доставки обучающих курсов и других учебно-методических материалов.

На данный момент времени разработаны технологии, в той или иной мере решающие обозначенные выше проблемы. Можно выделить три основные технологии [1]:

1) «кейсовая» технология: учебные материалы собираются в «учебный кейс» (портфель), который передаётся обучаемому для самостоятельного изучения. При этом предусматривается организация дополнительных консультаций у преподавателя. Консультации могут быть организованы как при личной встрече обучаемых и преподавателя, так и с помощью средств дистанционной связи;

2) технология телевизионной связии телеконференций: технология базируется на применении прямых трансляций. Ранее данная технология требовала применения специального оборудования и телевизионных каналов связи, однако сейчас, благодаря Интернету, организовать прямую трансляцию для широкой аудитории слушателей стало значительно проще. Например, сервис «YouTube» позволяет организовать прямую трансляцию через сеть Интернет с минимальными затратами на подготовку и оборудование. Трансляции в этом сервисе могут быть записаны и сохранены на сервере для последующего многократного просмотра;

3) сетевая технология: организуется изучение отдельных дисциплин с помощью автоматизированных средств и комплексов обучения, размещённых на удалённых серверах и доступных через Интернет.

Перечисленные технологии принято сочетать друг с другом в процессе обучения для того, чтобы добиться максимальной эффективности. По отдельным дисциплинам в вузах создаются комплексы (или комплекты) учебных средств, включающие компьютерные учебники и учебные электронные книги (часто с мультимедийной поддержкой), тренажные компьютерные программы, в большинстве случаев использующие распределенные учебные системы, опирающиеся на сеть Интернет и серверное обслуживание.

Общий недостаток дистанционного обучения состоит в ограничении личного взаимодействия и контактовобучаемых с преподавателями, заменой их дистанционной связью. Чтобы уменьшить значимость этого недостатка прибегают к увеличению частоты дистанционных контактов при различных формах организации обратной дистанционной связи от обучаемых к преподавателям, а также к организации периодических сессий с личными встречами (например, контрольные и тренировочные занятия). Кроме того, как было отмечено выше, для описания общих принципов построения и функционирования СДО в необходимом объеме и качестве отсутствует формально-алгоритмическое обеспечение.

Некоторые аспекты организации современных системдистанционного обучения

К некоторым аспектам организации СДО можно отнести:1) построение и описание функционально-структурной модели СДО; 2) разработка и использование технологии функционирования СДО;3) составление и применение методики обучения в рамках СДО;
4) разработка перспективных направлений развития СДО.

Рассмотрим сначала первый аспект, суть которого основана напостроении и описании функционально-структурной модели СДО, включающей внешнюю информационную среду, содержащую информационные ресурсы соответствующих сетей,внутреннюю информационную среду, включающую биологическую память обучаемых, хранящую информацию, накопленную обучаемым к началу обучения; ресурсы персонального компьютера (ПК), к которым можно отнести программно-информационное и техническое обеспечение.

Поскольку во времени часть информации внешней и внутренней информационных сред устаревает, то необходимо в рассмотренной модели в соответствии с требованиями развития современного общества периодически осуществлять обновление данных и поколение информационных сред актуальной информацией.

На рис.1 представлена схема технологического процесса функционирования СДО, использование которого позволяет рационально организовать обучение.

На рис.1 обозначены: УИСУО – учебно-информационный сайт учреждения образования, часть состава которого представлена в виде: ИР – информационных ресурсов учебно-методического и справочного характера; ППС – профессорско-преподавательского состава; МС – методических систем; ПК – персональный компьютер; О – обучаемый; ЭУМО – электронное учебно-методическое обеспечение, представляющее собой электронные средства обучения (ЭСО), каждый из которых предназначен для изучения конкретной дисциплины учебного плана; ТУМО – традиционное учебно-методическое обеспечение на бумажном носителе в виде учебников, учебных и методических пособий, указаний, практикумов и т.д.

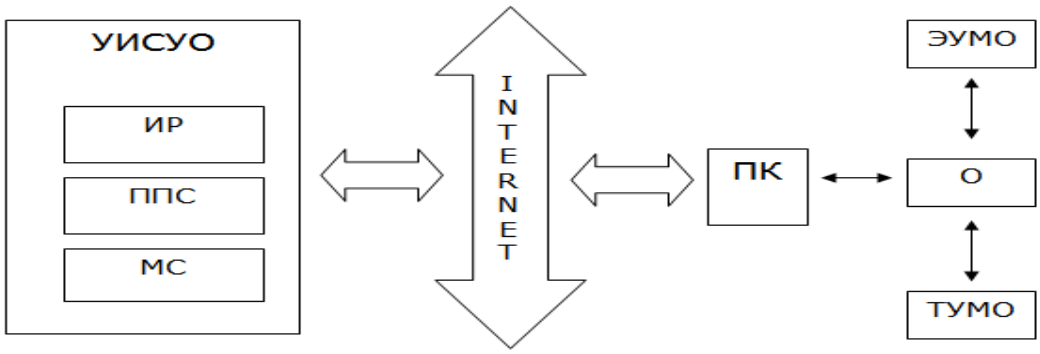


Рис. 1. Схема технологического процесса функционирования СДО

Третий аспект организации СДО заключается в создании и изменении методики рациональной реализации технологии «Web-АУМО», где Web – internet-ресурсы, АУМО – автономное учебно-методическое обеспечение СДО.

Заглядывая в будущее, связанное с четвёртым аспектом, перспективными направлениями в развитии СДО могут быть:создание и использование в образовательном процессе модульной структуры учебно-методического и организационного обеспечения с целью обеспечения гибкости, эффективности и актуальности СДО с учётом динамики требований и развития общества;разработка и совершенствование обучающее-тестирующих систем, применение которых позволит повысить эффективность образовательного процесса за счёт снижения временных, нервно-психологических издержек, повышения комфортности и гибкости условий обучения.

Математическое обеспечение организациидистанционного обучения

Рассмотрим динамику процесса обучения во времени: *i*-й обучаемый (O_i) инициирует процесс по той или иной изучаемой дисциплине, осуществляет поиск информации, анализирует ее и выделяет (фильтрует) из нее необходимый для освоения материал по конкретному разделу дисциплины, усваивает требуемыеблоки изучаемого материала, сохраняя усвоенное в своей и, если необходимо, во внешней памяти.

Далее производится тестирование уровня знаний обучаемого O_iпо изученному материалу и выставляется соответствующая оценка по десятибалльной системе. В случае наличия неудовлетворительной оценки (0, 1, 2, 3) или отличной (10) обучаемому рекомендуется: в первом случае вновь усвоить материал, во втором – приступить к изучению следующего раздела дисциплины. В других случаях обучаемый сам принимает решение о выполнении последовательности изучения материала. Выполнение процессов продолжается до тех пор, пока не будет изучена вся дисциплина.

Математически процесс дистанционного обучения (ПДО) для O_iможно описать следующим образом: $P_i = <t_i, A_i, T_i>$,где t_i– момент инициирования процесса обучаемым O_i; A_i– атрибуты процесса, определяющие имя обучаемого O_i, инициировавшего процесс, программы режима обработки информации и т.д.;T_i– $\{S_1, S_2, \ldots, S_n\}$ – трасса процесса, характеризующая порядок использования ресурсов $R=\{ r_1, r_2, \ldots, r_m\}$ СДО и представляемая в виде последовательности событий $S_1, S_2, \ldots, S_n$в моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_n$($t_1 <= t_2 <= \ldots <= t_n$), отражающих изменения состояния процесса.Естественно, все функции, выполняемые обучаемым O_iи программной обучающе-тестирующей системой требуют использования соответствующих ресурсов СДО, базирующихся на современных компьютерных сетях.

Итак, производительность функционирования ПДО будет зависеть от времени изучения дисциплины, определения уровня усвоения изученного материала обучаемым O_i, а также от степени использования ресурсов СДО.

Общее время выполнения ПДО запишем:

$$T_0 = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{b_i}{V_i},$$

где b_i, V_i – сложность и скорость выполнения различных функций обучаемым иобучающе-тестирующей системой;*k*-число изучаемых разделов дисциплины.Эффективность ДО зависит от множества факторов $F = \{f_p, p = 1,2, \ldots, n\}$, $|F| = n$,среди которых основными являются:уровень начальной подготовки обучаемых (O) для изучения множества дисциплин$D = \{d_j, j = 1,2, \ldots, m\}$, $|D| = m$, которые необходимо освоить по выбранной специальности;мотивацияO, заключающаяся в заинтересованности изучать дисциплины специальности;качество ЭСО, использование которых позволяет в полной мере или частично осваивать изучаемые дисциплины специальности; эффективность усвоения учебного материала дисциплин специальности обучаемыми O;характер и степень ответственности обучаемых O в процессе дистанционного обучения;эффективность организации процесса дистанционного обучения.

В процессе полноценной подготовки современного специалиста и формирования его как гармоничной личности необходимо использовать интеграцию всех эффективных и перспективных технологий (образовательно-педагогических, компьютерных [2,3], тестирующих, управленческих, ротационных и др.). Такая интеграция возможна путем создания и использования ротационно-гибридной модели (РГМ), представляющей собой совокупность оптимально сочетающихся и взаимодействующих различных современных технологий.РГМ представляет собой интеграцию различных современных технологий, разумное сочетание применения которых позволяет осуществить подготовку квалифицированных специалистов O и воплощающих в себе социокультурные ценности современного общества.Для эффективной реализации РГМ необходимо использовать современные технологии принятия решений [4], учитывающие различные факторы и образовательные модели, а также использующие новейшие достижения в области современных информационных технологий.

Программное обеспечение организации дистанционного обучения

При разработке ПС организации дистанционного обучения был использован PHP-фреймворкYii[5]. Данный фреймворк предоставляет широкий набор библиотек классов для решения различных задач.

На рис.2 представлена структура приложения, разработанного при помощи Yii.

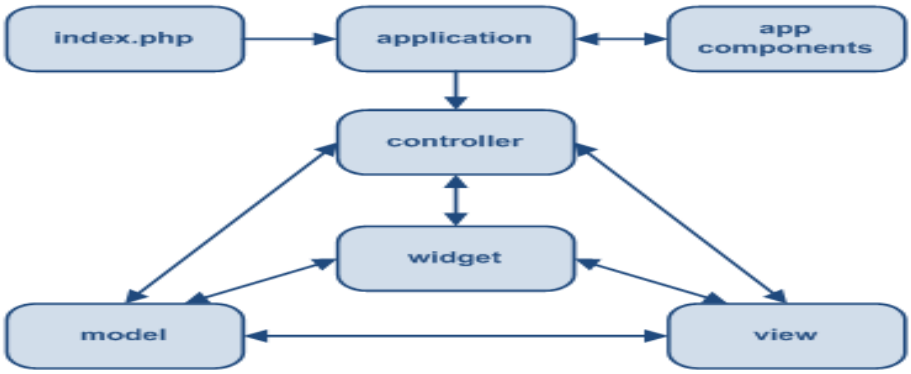


Рис.2. Структура приложения Yii

На рис.3показано, что запрос клиента обрабатывает контроллер. Для написания собственного контроллера нужно создать класс-наследник от класса Controller.

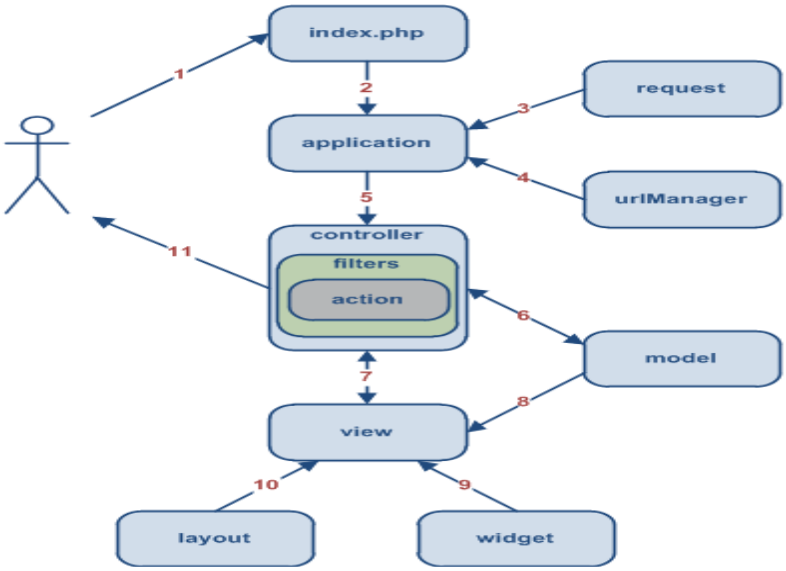


Рис. 3. Последовательность работы приложения Yii

ПС реализовано в виде веб-портала, что позволяет сделать его более доступным для пользователей различных программно-аппаратных платформ. ПС соответствует заявленным функциональным требованиям и спроектированным алгоритмам работы. Работоспособность ПС была проверена при помощи тестов, которые подтвердили его пригодность к эксплуатации.

Заключение

В процессе проведения исследований: разработана функционально-структурная модель СДО, отражающая основные принципы её функционирования; предложена схема технологии «Web-АУМО», применение которой позволяет рационально организовать процесс обучения;разработана РГМ для реализации оптимального организационного процесса ДО;разработано программное обеспечение, использование которого позволяет на основе предложенных моделей автоматизировать процесс организации ДО и обеспечить высокую эффективность подготовки специалистов.

Библиографический список

1.Кривицкий, Б.Х.Учебные электронные средства в ВУЗе / Б. Х. Кривицкий.-М.: МГУ, 2013. – 208 с.
2. Скудняков, Ю.А. Формально-логическое обеспечение компьютеризации современного процесса обучения // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: материалы VI международной науч.-метод. конф., Минск: БГУИР, 2012, с. 281-282.
3. Скудняков, Ю.А., Гурский, Н.Н. Современные формы образовательного процесса // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах: материалы науч.-тех. конф., Минск: РИВШ, 2015, с.71-76.
4.Фатхутдинов, Р. А. Управленческие решения: учебник/Р.А. Фатхутдинов-М.:Инфро- М, 2007. – 352 с.
5. Макаров, А. С. Yii. Сборник рецептов/ А. С. Макаров.–М.: ДМК Пресс, 2013.– 372 с.

Y.A. Skudnyakov, A.S. Barsuk, A.V. Hardzeyuk

MODEL AND SOFTWARE ORGANIZATION DISTANCE LEARNING

Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics

Models and software of modern distance learning organization have been developed. The effectiveness of this development is confirmed by its high quality indicators and practical results in the use of modern distance learning system, which consists in minimizing the time, neuropsychological costs, increasing comfort, flexibility, depth and completeness of the study material in the learning process.
Key words:education, distance learning, mathematical models, software tool.

УДК 004.415.2

Ю.А. Скудняков, Д.А. Калачев, И.И. Шпак

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА И АНАЛИЗА ЛОГИРУЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ANDROID

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г.Минск

Разработана автоматизированная система (АС) сбора и анализа логируемой информации разрабатываемых и используемых мобильных приложений (МП) на основе операционной системы Android. Автоматизированный процесс сбора и анализа логируемой информации осуществляется с помощью разработанного программного средства (ПС). Использование АС позволяет упростить и ускорить этапы разработки, тестирования и поддержки мобильного приложения, что значительно повышает эффективность работы разработчиков и тестировщиков мобильных приложений, а также предоставляет более широкие возможности для поддержки существующих приложений.

Ключевые слова: автоматизированная система; операционная система Android; логируемая информация; мобильное приложение; программное средство; клиент; сервер; система управления базой данных.

Введение

Целью данной работы являлась разработка АС сбора и анализа логируемой информации, использование которой позволяет повысить эффективность данного процесса с точки зрения упрощения и сокращения разработки, тестирования и поддержки МП.

Объектом исследования являлись процессы сбора и анализа логируемой информации разрабатываемых и используемых МП на основе операционной системы Android.

Сбор и анализ логируемой информации на мобильных устройствах позволяет получать широкий диапазон информации о произошедших у пользователей МП ошибок и другие сообщения, способствующие производить анализ действий пользователя и улучшать качество МП.

Логируемая информация может быть следующих типов: сообщения об ошибках и аварийном закрытии приложения; информация об устройстве, на котором запущено приложение; параметры сессии пользователя мобильного приложения; специальные сообщения, логируемые разработчиками для отправки на сервер и используемые для анализа действий пользователей приложения.

Дополнительно к основным возможностям средства сбора и анализа логируемой информации часто имеют реализованную интеграцию со сторонними ПС, а также используемыми при разработке мобильного приложения. Использование интеграции позволяет легко передать интересующую разработчиков информацию в другие ПС, а также для применения ПС управления задачами или ПС коммуникации. В случае с ПС управления задачами использование интеграции позволяет переносить информацию о новых ошибках в систему и создаёт новые задачи для разработчиков. Примерами таких ПС являются: Pivotal, Trello, Jira. Интеграция с ПС коммуникации позволяет оповестить всех заинтересованных в этом разработчиков о новых ошибках, произошедших в системе, наличие которых может потребовать их срочного устранения. Примерами таких ПС являются: Slack, HipChat.

Также такие ПС имеют возможность расчёта аналитики о количестве пользователей и их сессиях использования приложения на основании логируемой информации.

Обзор существующих АС сбора и анализа логируемой информации показал, что большинство из них имеют ограниченные или избыточные функциональные возможности, что в первом случае решаются несложные задачи, а во втором повышается сложность использования систем [1].

Для проведения обзора существующих аналогов были выбраны АС, в основе функционирования которых используются следующие ПС: «Apteligent»; «SplunkMint»; «Crashlytics».

На основе результатов проведенного анализа данных ПС выявлены их достоинства и недостатки: возможность подключения модуля сбора метрик скорости выполнения http-запросов; большой выбор возможных интеграций (достоинства ПС «Apteligent»); сложный интерфейс; ограниченный бесплатный набор функционала; нестабильная работа; нет поддержки русского языка (недостатки ПС «Apteligent»); наличие очень большого набора возможностей; постоянное развитие и поддержка ПС (достоинства ПС «SplunkMint»); сложный интерфейс; высокая стоимость; нет поддержки русского языка (недостатки ПС «SplunkMint»); постоянное развитие и поддержка проекта; простой, удобный и понятный интерфейс; большой набор возможных интеграций; возможность получить состояние различных сенсоров устройства(достоинства ПС «Crashlytics»);нет возможности программно отправлять сообщения на сервер; нет поддержки русского языка (недостатки ПС «Crashlytics»).

Архитектура АС

В работе было осуществлено обоснование выбора архитектуры АС, а для разработки – ПС–платформ и языков программирования, системы управления базами данных, стека технологий для клиентской и серверной частей.

Архитектура АС состоит из клиентской, серверной частей и android-библиотеки с подключением системы управления базой данных (СУБД) (рис.1).

Клиентская часть АС отвечает за взаимодействие с пользователем, графический интерфейс пользователя и взаимодействие с программным интерфейсом серверного приложения.

Серверное приложение взаимодействовует с базой данных, предоставляет программный интерфейс для клиентского веб-приложения и библиотеки, обеспечивает целостность данных и отвечает за безопасность всей системы.

Android-библиотека подключается к android-приложениям на стадии их разработки и отвечает за сбор и отправку логируемой информации на серверное приложение.

В качестве СУБД выбрана объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL [2], обладающая следующими достоинствами: наиболее развитая СУБД с открытым кодом; надежность и устойчивость на очень больших нагрузках; кросс-платформенность: работает в широком диапазоне диалектов UNIX (Linux, FreeBSD, Solaris и т.д.), а также на платформе Microsoft Windows; высокий уровень соответствия стандартам; существует множество интерфейсов и библиотек взаимодействия для других языков: Java (JDBC), ODBC, Perl, Python, Ruby, C, C++, PHP, Lisp, Scheme и Qt; поддержка баз данных практически неограниченного размера; наследование; быстродействие; расширяемость. СУБД может находиться как на одном сервере с серверной частью АС, так и на отдельном сервере.

Взаимодействие между компонентами АС происходит по протоколу HTTP, используя сообщения в текстовом формате обмена данными JSON, который за счёт своей лаконичности, по сравнению с XML, может быть более подходящим для сериализации сложных структур, так как сериализованная структура имеет меньший размер.

Основными достоинствами данной архитектуры являются: использование REST-подхода к построению приложения; возможность реализовать своих клиентов или библиотек под каждую платформу за счёт использования одного REST-интерфейса; снижена нагрузка на сервер по сравнению с обычным веб-приложением за счёт того, что сервер будет отвечать только за предоставление данных; вся информация передается в формате JSON, что сокращает объём передаваемой информации и нагрузку на сервер, также есть возможность включить сжатие передаваемой информации; используя браузер, можно сделать универсальный клиент под все платформы и операционные системы.

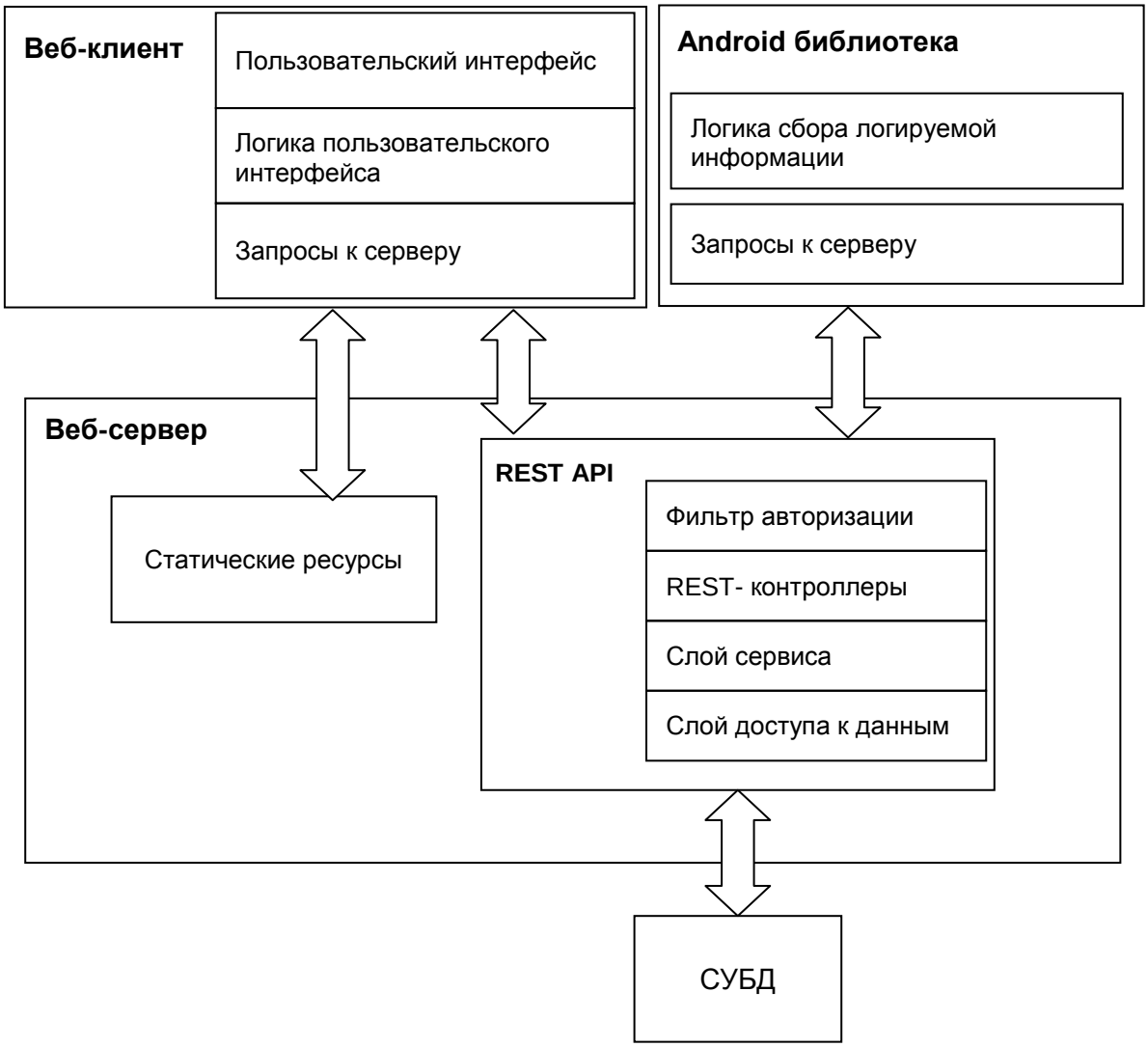


Рис.1. Архитектура АС

Предложенная архитектура АС позволяет написать клиента под любую платформу (мобильную или стационарную) и под любую операционную систему. Для обеспечения гибкой архитектуры АС в качестве клиента был выбран браузер, обладающий следующими достоинствами: есть реализации под все платформы и операционные системы; в настоящее время браузер установлен на всех устройствах с выходом в сеть; все пользователи сети Интернет постоянно пользуются браузером (не нужно тратить время на обучение); при каждом обновлении страницы пользователь получает последнюю версию приложения и не может использовать устаревшую версию; универсальность отображения содержимого для различных устройств при использовании адаптивного дизайна. В качестве языка приложения для android-библиотеки используется статически типизированный язык программирования Kotlin, работающий под платформу JVM и полностью совместимый с языком Java, что позволяет разработчикам постепенно перейти с Java на Kotlin.

Разработаны алгоритмы регистрации новых пользователей, создания, редактирования и удаления новых проектов МП, сбора и просмотра списка ошибок в МП с информацией о пользователях, их устройствах и версиях МП, создания и использования групп логируемых сообщений, предоставления широкого доступа к проекту МП. Предложенные алгоритмы реализованы с помощью разработанного ПС на языках:TypeScript (клиентская часть) и Java (серверная часть). Проведено тестирование ПС.

Заключение

В процессе выполнения данной работы разработана АС сбора и анализа логируемой информации, использование ПС которой позволяет обеспечить: применение современных информационных технологий и архитектурных решений; удобный и безопасный доступ к необходимой информации в зависимости от прав доступа; удобство использования мобильных устройств; возможность в дальнейшем разработки библиотек для других мобильных платформ; интуитивно понятный и удобный графический пользовательский интерфейс, не требующий специальной подготовки; высокая скорость работы; невысокая стоимость; интерфейс на русском языке.

Библиографический список

1. Wikipedia [Электронный ресурс]: – Режим доступа : http://wikipedia.org- Дата доступа 19.02.2018.

2. База данных PostgreSql [Электронный ресурс]:–Режим доступа: http://www.postgresql. org - Дата доступа 19.02.2018.

Y.A. Skudnyakov, D.A. Kalachev, I.I. Shpak

AUTOMATED SYSTEM FOR THE COLLECTING AND ANALYZING LOGGEDINFORMATION IN MOBILE APPLICATIONS, BASED ON ANDROID OPERATING SYSTEM

Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

An automated system for collecting and analyzing of logged information in developed and used mobile applications, based on the Android operating system has been developed. The automated process of collecting and analyzing the logged information is carried out with the help of the developed software. The use of automated system allows you to simplify and accelerate the stages of development, testing and support of mobile applications, and thussignificantly increases the efficiency of developers and testers of mobile applications, as well as provides more opportunities to support existing applications.

Key words: automated system; Android operating system; logged information; mobile application; software; client; server; database management system.

УДК 629.5.064-52

А.В. Соловьёв

ЕДИНОЕ ЦЕЛЕОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕСЭУ КАК ЭЛЕМЕНТ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СУДОВ

Волжский государственный университет водного транспорта

В статье показано, что применение единой целеориентированной системы управления судовой энергетической установкой (СЭУ) с подсистемой сбора параметров технического состояния объектов СЭУ позволит отказаться от специализированных диагностических комплексов, а также дает возможность использования результатов её работы в классификационной деятельности. Изложены принципы взаимодействия единой целеориентированной системы управления СЭУ с интеллектуальной системой управления классификационной деятельностью. Предложена структура интеллектуальной системой управления классификационной деятельностью и её составных частей.

Ключевые слова: система автоматического управления, судовая энергетическая установка, сценарий управления, единое цифровое решение, классификационная деятельность.

Оснащение судов современными системами управления, использующими достижения кибернетики, информатики и элементы искусственного интеллекта позволяет реализовать принципиально новые как схемные, так и алгоритмические решения при разработке систем управления совокупностями объектов.

Решение задач по повышению безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок на внутреннем водном транспорте (ВВП), невозможно без кардинального изменения решений в области автоматизации технологических процессов на судах, создания алгоритмов управления с использованием некоторых элементов интеллекта для управления автоматизированным судовым комплексом в целом.

Предложенная в работе [1] концепция единого целеориентированного автоматического управления (ЕЦСУ) СЭУ позволяет решить данные задачи, а кроме того, повысить техническую безопасность плавания. ЕЦСУ СЭУ предусматривает восемь «сценариев» управления, на основе которых разрабатывается линейка настроек:

- «сценарий 1» — максимальная мощность главных двигателей;
- «сценарий 2» — номинальная мощность главных двигателей;
- «сценарий 3» — максимальная экономичность СЭУ;
- «сценарий 4» — минимальная или регламентированная скорость движения судна;
- «сценарий 5» — максимальная экологическая безопасность;
- «сценарий 6» — максимальная долговечность;
- «сценарий 7» — максимальная техническая безопасность;
- «сценарий 8» — маневровый режим.

Безусловно, что внедрение такой системы особенно эффективно там, где под контролем находится значительное количество взаимосвязанных параметров и существует необходимость переключения объектов управления на различные режимы работы в зависимости от желаемого их состояния, задающих и возмущающих воздействий. Реализация ЕЦСУ СЭУ возможна при использовании концепции единого цифрового решения системы управления (см. рис. 1).Кроме задач целеориентированного управления объектами СЭУ, применение цифровой системы управления позволяетрешать задачи технической диагностики объектов СЭУ, поскольку современные электронные системы управления [2-4] осуществляют сбор и обработку информации, полученной от датчиков регулируемых величин и процессов, которая может обрабатываться центральным компьютером управления в целях диагностирования всей СЭУ.

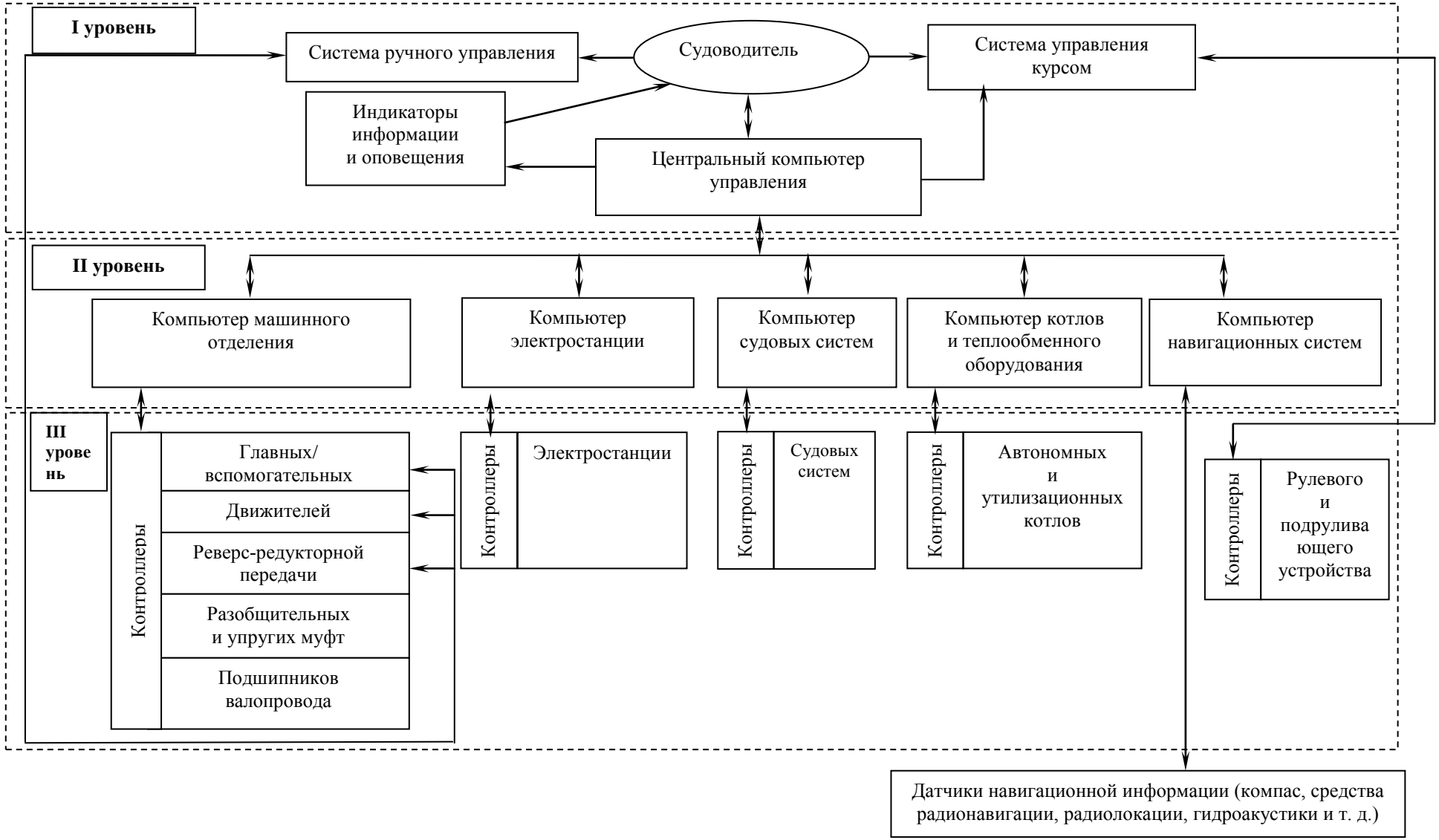


Рис. 1. Блок-схема концепции единого цифрового решения системы управления

Применение ЕЦСУ СЭУ с подсистемой сбора параметров технического состояния (ТС) объектов СЭУ позволит отказаться от специализированных диагностических комплексов, которые устанавливались для двигателей достаточно высокой мощности [5-7] и в основном на морских судах, а также дает возможность использования результатов её работы в классификационной деятельности [8].

Выполненные автором предварительные исследования показывают, что цель снижения затрат Речного Регистра на осуществление классификационной деятельности при сохранении по сравнению с существующим положением дел в рассматриваемой сфере качества оказания классификационных услуг или даже повышение этого качества, получаемое путем замены выборочного контроля контролем технического состояния всех объектов СЭУ, может быть достигнута благодаря синергетическому эффекту взаимодействия ЕЦСУ СЭУ и интеллектуальной системы управления классификационной деятельностью (ИСУКД)Речного Регистра, периодически (при освидетельствованиях) подключаемой к ЕЦСУ СЭУ (рис. 2). Как следует из этого рисунка, основными частями ЕЦСУ СЭУ конкретного судна, которую можно представить как систему в понятиях системного анализа, являются подсистема реализации сценариев управления СЭУ, подсистема реализации технологий и протоколов обмена данными и подсистема сбора параметров технического состояния объектов СЭУ.

Основными частями ИСУКД, представляемой в качестве системы в понятиях системного анализа, являются подсистема «Электронный филиал», включающая в себя подсистему более низкого уровня «ЭФС», подсистема реализации технологий и протоколов использования и обработки данных и рассматриваемая в качестве подсистемы ИСУКД система инновационной поддержки освидетельствования судов (СИПОС). Понятно, что в данном случае речь идет об укрупненном анализе.

Укажем, что до настоящего времени результаты работы автоматизированных диагностических систем оборудования СЭУ в классификационной деятельности не использовались.

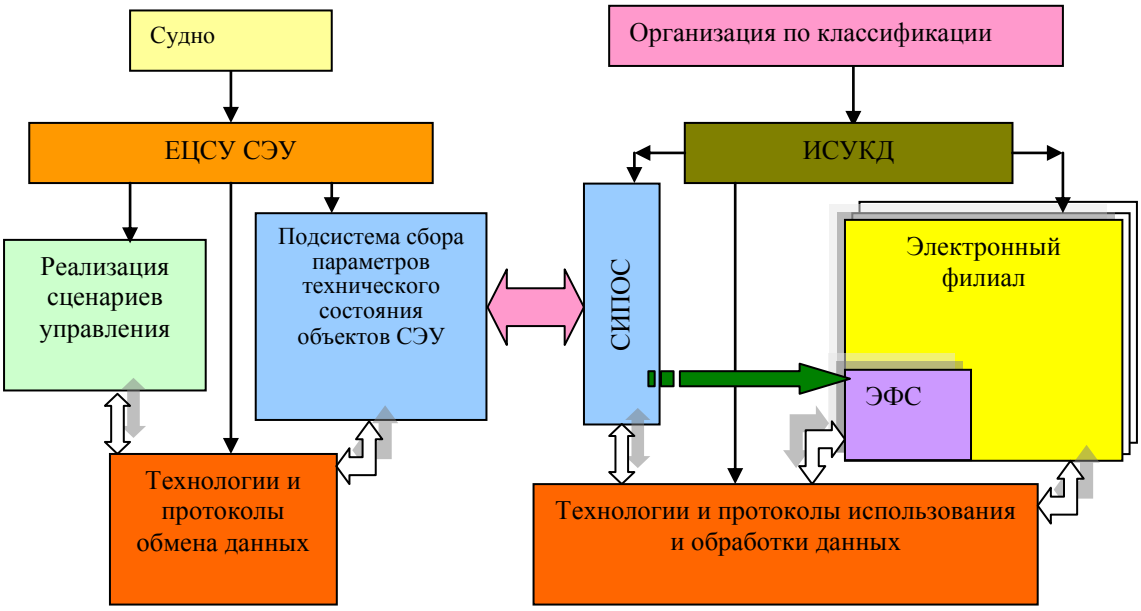


Рис. 2 Укрупненная схема взаимодействия ЕЦСУ СЭУ и ИСУКД

При организации взаимодействия ЕЦСУ СЭУ и ИСУКД важную роль играет функциональность СИПОС. Укрупненная структура СИПОС, обеспечивающая требуемую функциональность, должна быть близкой к изображенной на рис. 3.

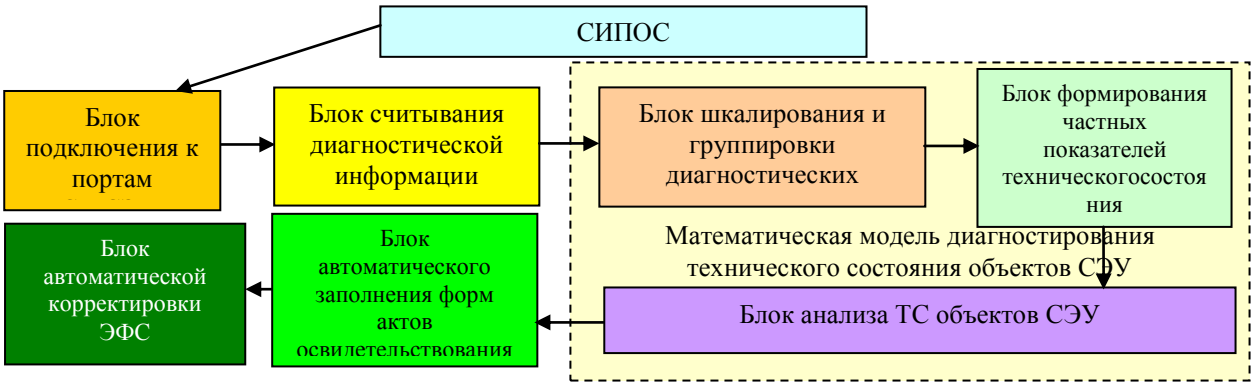


Рис. 3 Структура СИПОС

Эту структуру образуют блок подключение к портам ЕЦСУ СЭУ, блоки считывания диагностической информации и ее обработки, блок автоматического заполнения форм актов освидетельствования, блок автоматической корректировки части базы данных - электронного формуляра судна (ЭФС), в которой содержатся все данные освидетельствуемого судна. В базе данных модуля «Электронный филиал» помимо модулей, необходимых для управления работой филиала, содержатся и регулярно корректируются ЭФС всех судов, принятых на классификационный учет филиала.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что ИСУКД, частью которой является СИПОС, должна использовать электронный двойник реального судна (электронный формуляр судна), протоколы и технологии, позволяющие производить обмен данными со всеми подразделениями Речного Регистра в течение всего жизненного цикла судна.

Электронный формуляр судна (ЭФС) должен содержать все особенности и свойства судна, в том числе и физические параметры, которые позволяют выполнять расчеты параметров крутильных колебаний, остойчивости и непотопляемости, прочности, а также и результаты самих расчетов.

Одной из инновационных технологий ИСУКД является применение в ЭФС протокола обмена информацией, позволяющего при проведении освидетельствования судна, получать данные от судовой системы сбора параметров технического состояния объектов СЭУ, обработанные СИПОС с постановкой двухпозиционного диагноза технического состояния СЭУ «годное» или «негодное», как это принято в Речном Регистре.

ЕЦСУ СЭУ с помощью подсистемы сбора параметров технического состояния объектов СЭУ должна контролировать параметры всех установленных на судне главных и вспомогательных двигателей, например, от трех до девяти, всех вентиляторов, скажем 49, и т.д. Контролируемые параметры всех объектов СЭУ должны передаваться в блок автоматического заполнения форм актов освидетельствования СИПОС, при этом одни параметры сразу могут быть идентифицированы как диагностические, а другие должны быть преобразованы в диагностические путем расчетных преобразований.

Библиографический список

1. Соловьёв А.В. Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой / А.В. Соловьёв // Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С.О. Макарова, 2017. – Т 9. № 5 – С. 1027 - 1039.

2. Лашко В.А. Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС/ В.А. Лашко // Электронное научное издание Ученые заметки ТОГУ, 2014, Т 5. № 1 - С. 260-287.

3. Елизаров И. А.Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: учеб.пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов //М.: Машиностроение, 2004. — С. 180.

4. Грошева Л.С. Разработка комплексной системы контроля и управления на базе промышленных контроллеров FASTWEL/ Л.С. Грошева, В.И. Мерзляков, С.И. Перевезенцев, В.И. Плющаев // Журнал "Современные технологии автоматизации" 2015- №3 – С. 46 – 50.

5. Ивановский В.Г. Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации / В.Г. Ивановский, Р.А. Варбанец // Всеукраинский научно-технический журнал, 2004. – Вып. 2. С. 138 – 141.

6. Епихин А.И. Модуль диагностики двигателя внутреннего сгорания в системе поддержки принятия решений экипажем танкера-газовоза / А.И. Епихин // Вестник АГТУ, Сер.: Морская техника и технология, 2017. - №4 - С. 31 - 39.

7. Характеристики систем диагностики судовой дизельной установки. URL:http://vdvizhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistem-diagnostiki-sudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html.

8. Соловьёв А.В.Интеллектуальная система управления классификационной деятельностью на водном транспорте / А.В. Соловьёв // Международный журнал речников Речной Транспорт XXI век, 2017. № 84 – С. 40 – 42.

A.V. Soloviev

UNIFIED GOAL DIRECTED MANAGEMENT OF SHIP POWER PLANT AS AN ELEMENT OF INNOVATIVE SYSTEM FOR THE CLASSIFICATION OF SHIPS

Volga State University of Water Transport

The article shows that the use of a single target-oriented management system of ship power plant (SPP) with the subsystem of the collection parameters of the technical condition of objects of SPP will eliminate the need to specialized diagnostic systems but also enables use of its results in the classification of activities. The principles of interaction of the single target-oriented management system SPP with intelligent control system classification activity.The structure of intelligent control system classification activities and its component parts.

Key words: automatic control system, ship power plant, the management scenario, a single digital solution classification activity.

УДК 004.657

Г.А. Тукманов

СЕМАНТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ SQL-ЗАПРОСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В докладе рассмотрена проблема автоматического построения запросов при работе с базой данных. Представлена гибкая модель построения запроса без привязки к конкретному языку СУБД, с возможностью расширения. Для построения модели применён семантический подход, что делает возможным разработку удобной и расширяемой системы. Обоснована актуальность разрабатываемой системы, приведены преимущества перед другими генераторами SQL запросов.

Ключевые слова: SQL, запросы, автоматизация, семантика, модель, генерация, выборка

В настоящее время ни одна организация, даже маленькая, не обходится без построения базы данных (далее БД). Будь то сайт продаж, школа или бизнес сфера. В каждой отрасли есть информация, которую необходимо структурировать.

Данный доклад сделан с целью обоснования и решения главной проблемы при работе с любой БД. Основные действия любого пользователя с любым скоплением информации – осуществлять поиск и редактировать данные. При работе с базой данных любого размера и любой структуры, человек сталкивается с проблемой построения запросов, которые называют выборками.

Предлагается создать модель построения запросов на основании классификации существующих типов выборок. Её основная цель - максимально упростить поиск нужной информации в любой базе данных. Для решения этой задачи необходимо классифицировать запросы, выявить признаки, различия и сгруппировать их по типу.

Был проведён анализ различных СУБД и выстроенных к ним запросов для выявления наиболее распространённых видов выборок.

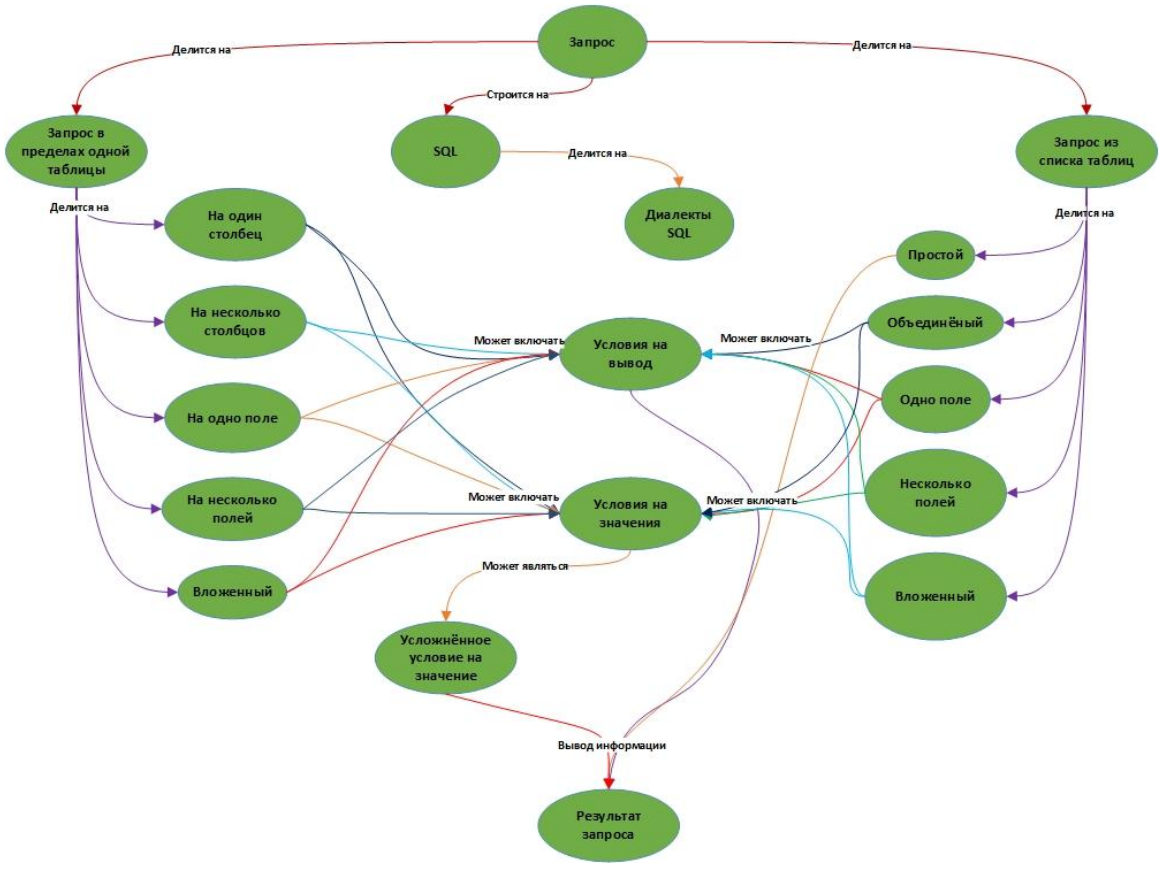


Рис. 1 – Граф модели

Все запросы делятся на две группы:

1) **Запросы-выборки** – это выбор данных из таблиц (одной или нескольких) с заданными параметрами поиска.

2) **Запросы-действия** – это изменение данных в таблицах: удаление, обновление или добавление записей.

При построении модели внимание акцентировано на подробном изучении запросов-выборок. Основываясь на тщательном анализе всевозможных выборок построена классификация запросов языка SQL в виде графа (Рис. 1).

На Рис. 1 изображён связный граф, отображающий проделанную классификацию выборок, построенный с применением семантического подхода. При построении запроса пользователь поэтапно выбирает области базы данных, из которой хочет получить необходимую информацию, выстраивать запрос для вывода результата, указывает область поиска (таблицы и поля в них), критерии поиска (различные фильтры, конкретные поля). Если необходимо укажет сортировку (будет предоставлен выбор вариантов) и критерии вывода результата (изменить названия полей, таблиц). Всё это – стандартный путь получения информации из любой БД.

Гибкость системы

Именно семантика даёт серьёзное преимущество перед другими генераторами запросов, так как появляется чёткая связь между каждым элементом в процессе построения любой выборки. Это даёт возможность безграничного расширения функциональности системы и встраивания новых модулей, независимость от программных платформ и максимальную понятность при работе с БД любого размера. При таком подходе любой пользователь сможет легко получить необходимую информацию, не задумываясь о сложности своего запроса. Плюс ко всему данная модель делает возможным создавать свои генераторы запросов для любой СУБД. Представленная модель обладает преимуществами перед аналогами и является отличным инструментом генерации SQL кода.

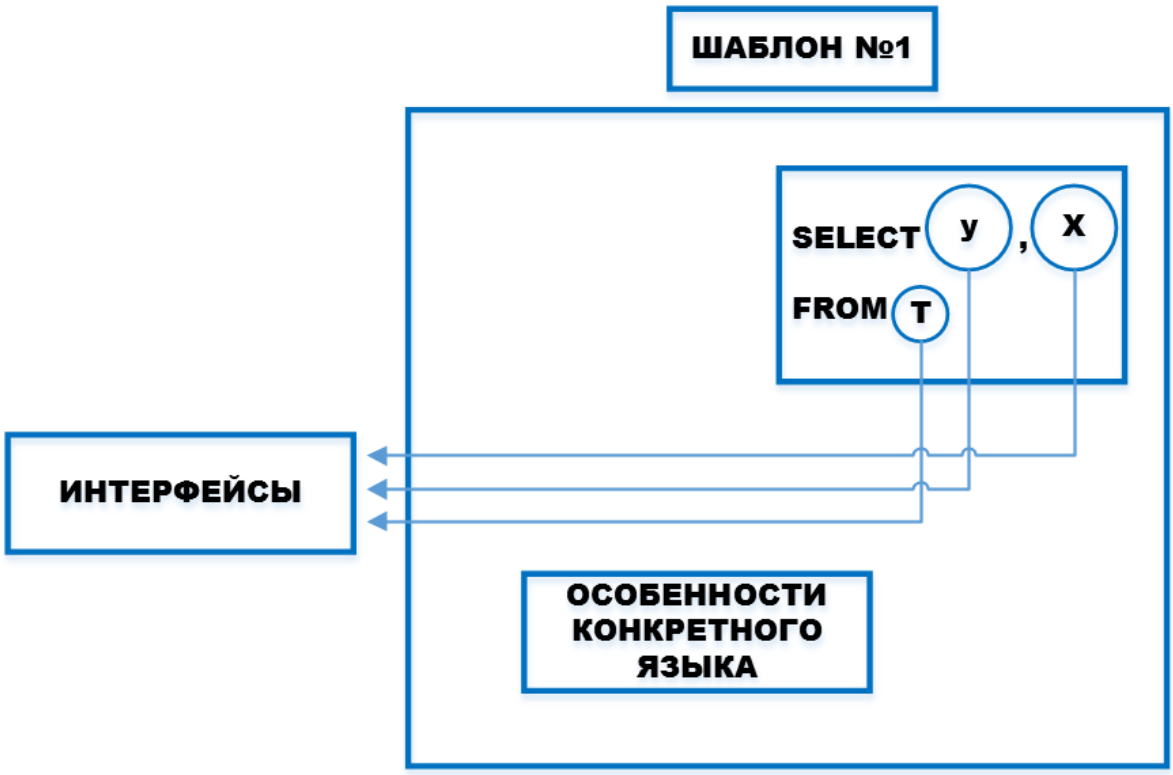


Рис. 2 – Модульное представление системы

Семантический подход позволяет связать data-логические и инфологические понятия запросов. Процесс создания выборки разбит на шаги, которые представляют собой сущности, связанные друг с другом. Тщательно анализируя SQL-запросы был сделан вывод, что можно определить набор шаблонов, состоящий из структур известных запросов. Каждый язык SQL различных СУБД имеет свои особенности, распространённые схемы выборок, которые можно представить в виде различных шаблонов (Рисунок 2). Именно из таких связанных шаблонов и предлагается выстроить систему. Связь блоков в единую систему происходит через интерфейсы.

Построение семантической сети генерации SQL-запроса

Исходя из приведённым выше достоинств семантического подхода используя проделанную классификацию была построена семантическая сеть (Рис. 2), которая отображает процесс построение SQL запроса

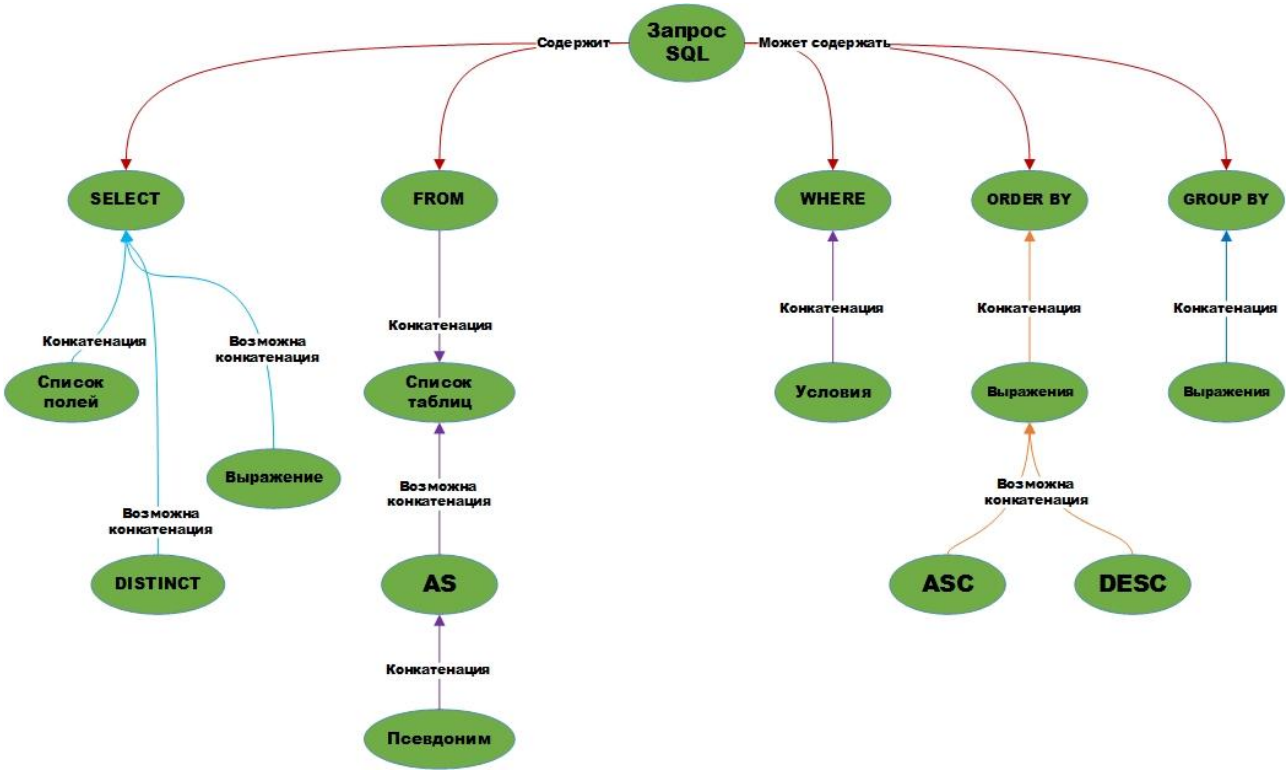


Рис. 2 – Семантическая сеть генерации SQL запросов

В модели применено понятие **Конкатенация** — операция склеивания объектов линейной структуры, обычно строк. Например, конкатенация слов «микро» и «мир» даст слово «микромир».

Связь «**Возможная конкатенация**» означает, что пользователь в праве не выбирать связанную с ней сущность.

По семантической сети явно отслеживается, что запрос SQL обязательно должен состоять из команд **SELECT** (соединяется со списком имен полей, из которых будет вестись поиск информации) и **FROM** (соединяется со списком таблиц, из которых будет вестись поиск информации). Команда **SELECT** также может содержать команду **DISTINCT**, исключающую повторы полей. На список полей может быть наложены имена-псевдонимы за счёт команд **AS** + **Псевдоним**.

К необязательным командам относятся:

- **WHERE**. Соединяется с выбранными пользователем условиями.

- **ORDER BY**. Задаёт сортировку + выражение, по которому будет выполнена сортировка. Может соединяться с командами **DESC** и **ASC**, которые задают вид сортировки (по возрастанию и убыванию)

- **GROUP BY**. Задает группировку. Соединяется с выражением, задающее группировку

Заключение

Для экономии драгоценного времени человека при запросе информации из любой БД предлагается построить автоматизированный систему генерации SQL запросов. В её основе будет заложена данная семантическая сеть, которая удобно отображает все зависимости элементов системы между собой и основана на шаблонах. Шаблоны построены на основе часто применяемых запросах.

Библиографический список

1. Н. Н. Гринченко, Е. В. Гусев, Н. П. Макаров Проектирование баз данных. СУБД Microsoft Access. Учебное пособие. Москва Горячая линия – Телеком 2004. – 240с.
2. Alan Beaulieu Learning SQL. ИМБО Санкт-Петербург – Москва 2007. – 310с.
3. Грофф Дж. Р., Вайнберг П.Н., Оппелъ Э. Дж. SQL. Полное руководство. 3-е изд. : Пер. с англ. - М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2015. - 960 с.

G.A. Tukmanov

SEMANTIC MODEL OF GENERATION OF SQL-REQUESTS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The report considers the problem of automatic query building when working with a database. A flexible model for constructing a query without binding to a specific DBMS language is presented, with the possibility of extension. To construct the model, a semantic approach is applied, which makes it possible to develop a convenient and extensible system. The urgency of the developed system is substantiated, the advantages over other SQL query generators are given.

Key words: SQL, requests, automation, semantics, model, generation, sampling

УДК 004:681.5:629.5.005

А.В. Чернышов[2], Е.Н. Поселенов[1], М.М. Чиркова[1]

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

«Волжский государственный университет водного транспорта» [1],
АО «Индустриальный парк «ОКА-ПОЛИМЕР» [2]

В работе обсуждаются вопросы возможности создания автоматических подвижных объектов на примере анализа безопасности движения судов при прохождении узостей в условиях меняющейся внешней среды. Предлагаются пути улучшения показателей процесса управления за счет увеличения информационной составляющей в алгоритме управления движением судна и его совершенствование.

Ключевые слова: динамика судов, информационное обеспечение процесса управления, навигационная безопасность.

В настоящее время интенсивно развивается направление по созданию подвижных объектов, управляемых от автопилотов, в том числе и судов.

Не учитывается тот факт, что суда (речные, смешанного типа плавания, морские в акваториях порта) относятся к объектам, неустойчивым на заданном направлении, меняют свои гидродинамические характеристики при изменении глубины фарватера и идут с углом дрейфа (угол между диаметральной плоскостью судна и вектором линейной скорости движения), величина которого зависит от направления и силы ветра, волны. течения. Особое внимание и тщательность проводки судна по заданной траектории требуется при проходе пролетов моста. Система обеспечения безопасности судоходства при прохождении мостовых зон является недостаточной, о чем свидетельствует статистика аварий, в том числе и навалов судов на опоры мостов

Анализ опубликованных в литературе аварийных ситуаций [1, 2], показывает, что среди причин аварий, в том числе, можно выделить:

- износ судов и оборудования, а также неполадки в системах управления ими;
- устаревшие навигационные приборы;
- недостаточная информационность для ориентирования положения судна относительно фарватера;
- внезапные смены гидрометеорологических условий, например, резкое воздействие ветра при выходе на мелководье или в момент проводки судна в пролете моста.

Система обеспечения безопасности судоходства при прохождении мостовых зон и входа в шлюз не обеспечивает должной информацией систему управления движением судна по заданному курсу, несмотря на установленное на судне навигационное оборудование. По определению [3]:

«Навигационное оборудование судов – это многокомпонентная электронная система водного транспортного средства, установленная с целью вычисления оптимального маршрута движения ... . За точность вычисления и выполнения навигационных расчетов ответственен судовой навигационный комплекс, состоящий из судовых технических средств навигации: инерциальная судовая навигационная система, астрономическая судовая навигационная система (точность определения местоположения судна на данный момент ≈100 м), судовая система курсоуказания (точность определения курса ±0.5°), судовая навигационная система радиолокационной прокладки, информационно-вычислительная судовая навигационная система и др.».

Но кроме оборудования установленного на судах навигационное оборудование должно быть установлено и на судовом ходе.

Как правило [4] «Средства навигационного оборудования внутренних водных путей – это специальные сооружения и устройства, предназначенные для обеспечения безопасного судоходства. К ним относятся навигационные огни и знаки на мостах. Указатели оси судового хода в судоходных пролетах мостов на фермах или пролетных строениях мостов представляют собой сигнальный ... ромбовидный щит красного цвета, обращенный острыми углами ... ». При такой информационной обеспеченности возможность построения автоматических систем управления движением судна практически отсутствует. И, тем не менее, в настоящее время наблюдается тенденция увеличения габаритных характеристик и грузовместимости речных судов с установкой на них авторулевых без должного анализа возможности проводки таких судов по речным фарватерам.

В работе был проведен анализ показателей движения речных судов в режиме стабилизации на заданном направлении в сложных условиях плавания. Моделирование проводилось с использованием модели, предложенной в [5], коэффициенты модели оценивались по результатам натурных испытаний. Результаты моделирования представлены на рис.1, 2, 3. Моделировалась проводка судна в пролетах 3-х мостов, расположенных на расстоянии 100 м, расстояние между опорами мостов 80 м, район – г. Н-Новгород. Управление формировалось на основании различной по количеству и качеству информации:

Первая ситуация, рис. 1: устойчивое на курсе судно, спокойная внешняя среда.
Информация поступает от:

- гирокомпаса об отклонении судна от курса (точность измерения ±0.5°);
- гироскопического датчика угловой скорости ухода судна с курса (точность измерения ±0.05°/с);
- информации об отклонении от оси судового хода нет.

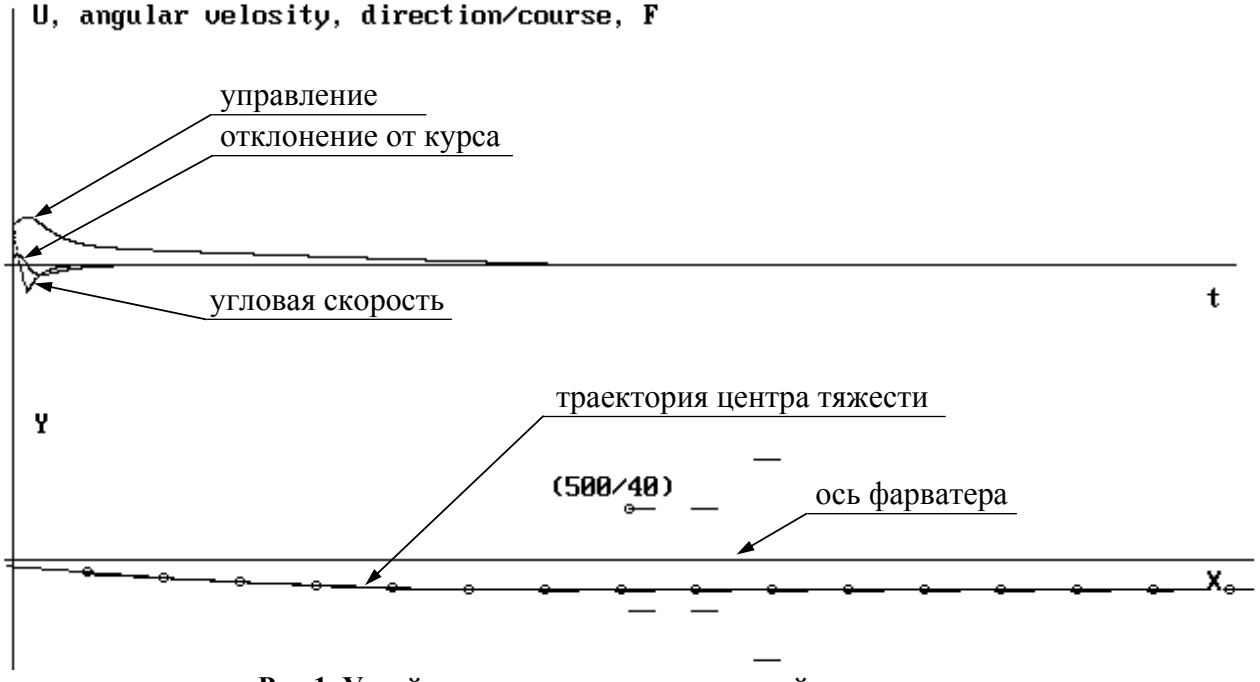


Рис.1. Устойчивое на курсе судно, спокойная внешняя среда.

Вторая ситуация, рис. 2: устойчивое на курсе судно, при подходе к мосту – боковой ветер. Судно развернулось на ветер, увеличился угол дрейфа. Навал на опоры моста возможен при отсутствии информации об отклонении центра тяжести судна от оси судового хода. Управление формировалось на основании той же информации.

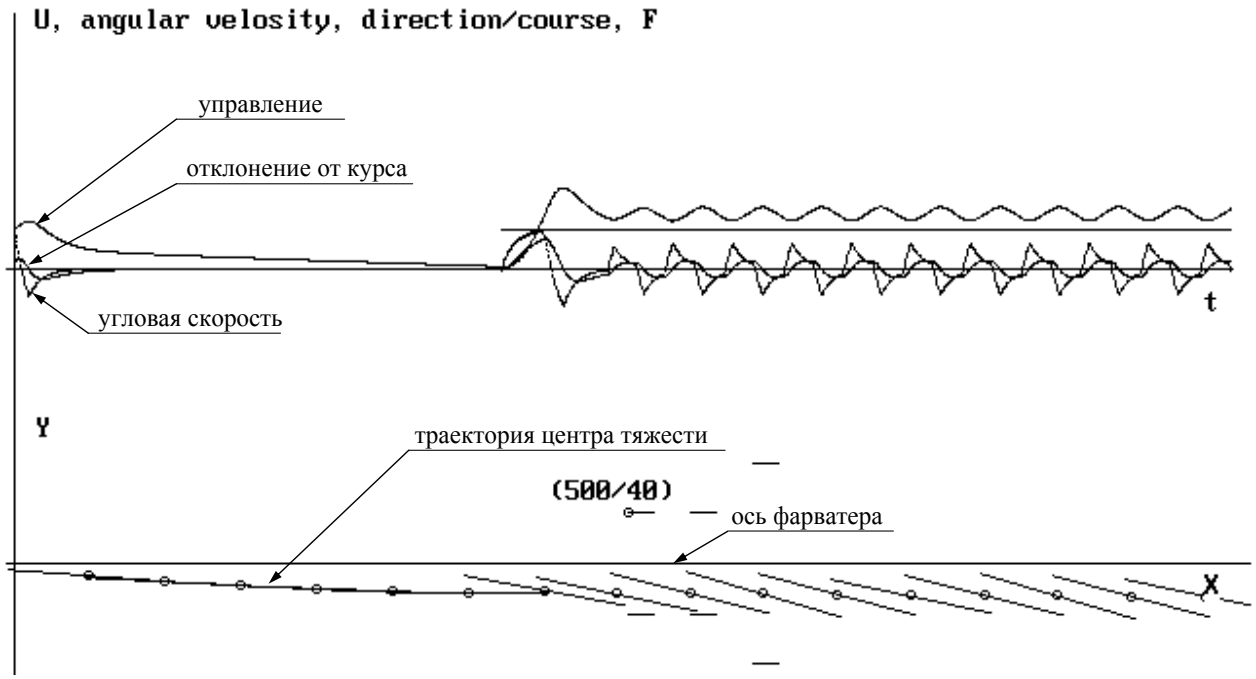


Рис.2. Устойчивое на курсе судно, при подходе к мосту – боковой ветер.

Третья ситуация, рис. 3: судно неустойчивое, при подходе к мосту – боковой ветер. Информация поступает от:

- гирокомпаса об отклонении судна от курса;
- гироскопического датчика угловой скорости ухода судна с курса;
- от навигационного комплекса судового хода (точность информации об отклонении от оси судового хода – 5м).

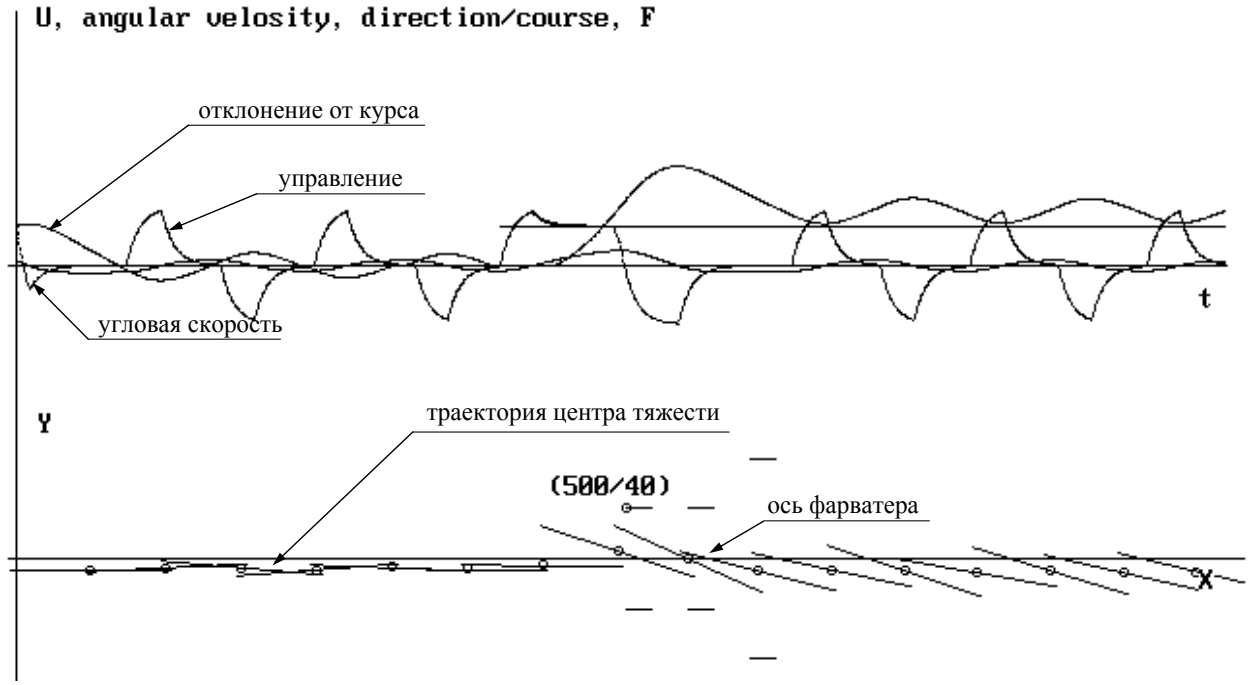


Рис. 3. Судно неустойчивое, при подходе к мосту – боковой ветер.

При данных габаритах судна безаварийная проводка возможна, но всё будет определяться алгоритмом перекладки органов, управляющих направлением движения судна.

Влияния количества и качества информации на точность, а соответственно, и безопасность проводки судна при ветре по узкому фарватеру проверялось на судах разных проектах. По результатам моделирования были сделаны выводы: при небрежном ручном управлении или управлении от автопилота, но с упрощенным пропорционально-дифференциальном алгоритмом работы, а также недостаточном информационном обеспечении системы управления движением судна увеличиваются отклонение объекта от оси судового хода; при ветре, сильном течении увеличивается угол дрейфа; вероятность аварий (посадка на мель, навал на опоры моста) возрастает.

Проведенный анализ характеристик движения судна позволяет предложить некоторые пути решения проблемы повышения надежности прохождения узостей в условиях меняющейся внешней среды:

- использовать радиобуи, РЛС и приемник ГНСС для расчета координат судна и отклонения его центра тяжести от генерального направления;
- совершенствовать алгоритм управления – разработка интеллектуального алгоритма, использующего информацию о расширенном количества координат состояния;
- включить в требования Речного Регистра проведение испытаний новых образцов судов для оценки их реакций на изменения внешней среды во время прохода узостей.

Библиографический список

1. Петров, С. В. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них: учебное пособие / С. В. Петров, В. А. Макашев. – Москва: ЭНАС, 2008. – 191 с.
2. Зайков, В.И., Колосов М.А. Повышение безопасности при движении судов под мостами / В.И. Зайков, М.А. Колосов //Транспорт Российской Федерации. –2006. – № 5. С. 39-40.
3. Судовое навигационное оборудование [электронный ресурс]: URL: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4528-Sudovoe-navigatsionnoe-oborudovanie
4. Навигационное оборудование ВВП [электронный ресурс]: URL: https://www.pravanalodku.ru/files/exam02.pdf
5. Войткунский, Я.И. Управляемость водоизмещающих судов: Справочник по теории корабля / Я.И. Войткунский - Л.: Судостроение, 1985. – Т.3. – 544 с.

A.V. Chernyshov, E.N. Poselenov, M.M. Chirkova

INFORMATION SUPPORT FOR THE SHIP WITH AUTOPILOT

Volga state university of water transport

The paper discusses the issues of the possibility of creating automatic mobile objects using the example of the analysis of the safety of vessel traffic during passage of narrowness in conditions of a changing external environment. There are proposed ways to improve the performance of the management process by increasing the information component in the ship's movement control algorithm and improving it.

Key words: ship dynamics, information support of the management process, navigation security.

УДК [001.18 + 001.92 + 159.947.24] + 378

[1]В.В. Ягупов, [2]И.Н. Козубцов, [3]Л.М. Козубцова

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ФОРМЫ НАУЧНО-МЕТОДИЧНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

[1] Национальный университет обороны Украины, г. Киев, Украина
[2] Научный центр связи и информатизации Военного института телекоммуникаций и информатизации, г. Киев, Украина
[3] Военный институт телекоммуникаций и информатизации, г. Киев, Украина

Цель работы: Раскрыть условия обеспечения дистанционной формы научно-методического сопровождения соискателей ученой степени.
Выводы: Экспериментальные результаты в экспериментальной группе показывают, что при условии соблюдения научно-методического сопровождения соискателей и методологического алгоритма возможно обеспечить развитие методологической культуры у соискателей ученой степени на должном уровне. Результат подтверждает гипотезу о возможности организации мобильности у соискателей ученой степени.
Новизна: Научная новизна работы заключается в моделировании условий по обеспечению возможности мобильности соискателей ученой степени в ракурсе соблюдения неразрывного педагогического процесса по развитию методологической культуры. Это достигается путем применения дистанционного обучения, как формы научно-методического сопровождения. Это позволит в полной мере реализовать академическую мобильность адъюнктов не только внутри страны, но и за ее пределами. В результате обеспечения возможности мобильности соискателей ученой степени растет вероятность того, что они приобретут неоценимый опыт в трансляции методологической культуры в научных школах зарубежных стран.

Ключевые слова: условия, обеспечение, дистанционная форма, научно-методическое сопровождение, аспирант, адъюнкт, методология, методологическая культура, научный руководитель.

Актуальность исследования

С внедрением в систему образования Болонского процесса в странах СНГ у соискателей ученой степени доктора философии появляется право на академическую мобильность. Правом воспользоваться на академическую мобильности имеют соискатели ученой степени доктора философии. Академическая мобильность предполагается применять для обучение по программам академической мобильности; языковой стажировки; научной стажировки.

Однако механизм реализации права аспирантов, адъюнктов и докторантов на академическую мобильность путем их направления на стажировку (получения дополнительных научных консультаций или руководства относительно научной деятельности и усвоения учебных дисциплин в рамках образовательно-научной программы аспиранта (адъюнкта)) в других отечественных и зарубежных высших учебных заведений или научных центров», не определено. На реализацию адъюнктами права мобильности ограничивает феномен военной системы образования. Исходя из этого, является актуальным исследование условий, при которых возможно обеспечить дистанционную форму научно-методического сопровождения адъюнктов.

Анализ исследований

Поиск ответы на сложившиеся вопросы начато с анализа публикаций исследований в открытых источниках. Для этого нами проанализированы открытые источники по ключевым словам «мобильность аспирантов и адъюнктов». Результат поиска показал, что данное направление не исследовано, а значит, это свидетельствует о перспективности научного задания, которое сформулировано впервые.

Цель статьи

Раскрыть условия обеспечения дистанционной формы научно-методического сопровождения соискателей ученой степени.

Методика, экспериментальная часть исследования

Вместе с множеством проблемных вопросов, которые нужно решить при обеспечении мобильности аспирантов, (адъюнктов), соискателей ученой степени, необходимо создать типовую согласованную образовательно-научную программу их подготовки. Практика показывает существование разрозненных образовательно-научных программ не только у ВУЗах одного направление подготовки в рамках страны, а и тем более между странами СНГ. Поэтому в научной школе «Развитие методологической культуры аспирантов и адъюнктов» под руководством В.В. Ягупова было основано направление решения проблемы мобильности аспирантов, (адъюнктов), соискателей ученой степени [1]. Это решение заключается в применении единой системы структурно-логического подхода к построению образовательно-научной программы подготовки аспирантов, (адъюнктов), соискателей ученой степени с применением методов дистанционного научно-педагогического (методического) общения.

Таблица 1 Методология организации научных исследований: перечень фаз, стадий, этапов исследования и соответствие им рекомендации

Фазы	Стадии	Этапы	Форма научно-педагогического сопровождения
Фаза подготовки	**Подготовительная**	**Подготовительный**	**А + НМСНР**
Фаза проектирования	**Концептуальна стадия**	**Выявления противоречия**	**А + НМСНР**
		Формирования проблемы	**А + НМСНР**
		Определения целей исследования	**А + НМСНР**
		Определения объекта, предмета исследования	**А + НМСНР**
		Определения заданий исследования	**А + НМСНР**
		Выбор критериев достоверности исследования	**А + НМСНР**
	Стадия (моделирования) построения гипотезы	**Построения гипотезы**	**А + НМСНР**
		Уточнения (конкретизация) гипотезы	**А + НМСНР**
	Стадия конструирования исследования	**Декомпозиция (определения заданий исследования)**	**А + НМСНР**
		Агрегация	**А + НМСНР**
		Исследования условий (ресурсных возможностей)	**А + НМСНР**
		Построения программы исследования	**А + НМСНР**
	Стадия технологической подготовки	**Написания рабочего автореферата-концепции исследования**	**А + НМСНР**
Технологическая фаза	**Стадия проведения исследования**	**Теоретический этап**	**М + ДНМСНР**
		Анализ и систематизация литературы	**М + ДНМСНР**
		Обработка понятийного аппарата	**М + ДНМСНР**
		Построения логической структуры теоретической части исследования	**М + ДНМСНР**
		Эмпирический этап	**М + ДНМСНР**
	Стадия оформления результатов	**Оформления результатов диссертации, автореферата диссертации, материалу научных мероприятий, материала статей, материала НИР**	**М + ДНМСНР**
		Апробация результатов на научных мероприятиях	**М + ДНМСНР**
		Публикация научных статей	**М + ДНМСНР**
		Внедрения результатов в НИР	**М + ДНМСНР**
		Внедрения результатов в практику	**М + ДНМСНР**
Рефлексивная фаза		**Анализ результатов**	**А + НМСНР**

В таблице 1 представлено соотношения возможности реализации фаз, стадий, этапов диссертационного исследования во время академической мобильности и формой научно-педагогического сопровождения соискателя. В таблице введены следующие сокращения: (А + НМСНР) – этап обучения адъюнкта по месту поступления в адъюнктуру при непосредственном (очном) научно-методическом сопровождении научным руководителем; (М + ДНМСНР) – этап мобильности в обучении адъюнкта при дистанционном (заочном) научно-методическом сопровождении научным руководителем.

В основу унифицированной типовой образовательно-научной программы подготовки данной категории предлагается положить методику организации диссертационного исследования [2], которая может обеспечивать мобильность как между ВУЗами внутри страны, так и за ее пределами. Пример такой программы апробирован в работе [3].

Реализация академической мобильности возможна при выполнении ключевого условия, а именно, под четким методическим руководством научного руководителя аспиранты, (адъюнкты), соискатели ученой степени обязаны выполнить перечень работ раскрывающих фазу проектирования диссертационного исследования [4].

Технически форма дистанционного научно-методического сопровождения организуется путем использования программного обеспечения, представлена в работе [5]. Практика подтвердила, что для обеспечения дистанционного научно-методического сопровождения хорошо зарекомендовало себя следующее программные обеспечения: передача голоса с помощью Skype; дистанционное управление рабочим столом компьютера соискателя с помощью TeamViewer. При соблюдении указанных условий построения образовательно-научной программы подготовки адъюнктов достаточно с последнего месте обучения получить выписку из отдела адъюнктуры о пройденном курсе обучения с указанием перечня конкретных изученных тем. В целом, адъюнкт, за время физического перемещения пропускает то количество материала, что он вполне способен наверстать за счет самостоятельной работы.

Следует отметить, что для всех аспирантов общей является методология [2], а для адъюнктов еще и феноменальная часть методологии, которая связана с защитой информации, содержащей государственную тайну [6]. В связи с этим возникает сложность организации права мобильности именно тех адъюнктов, в которых тема диссертационного исследования связана с государственной тайной.

Интерпретация результатов

Педагогический эксперимент с применением дистанционной формы научного сопровождения соискателей осуществляли научные руководители В.В. Ягупов и Л.Ф. Мараховский по описанной методике [7]. Проверялась возможность влияния на коммуникативный компонент профессионально-важных качеств соискателей. Результаты диагностирования уровней развитости коммуникативного компонента из состава профессионально важных качеств адъюнктов на этапе констатирующего эксперимента (КЭ) представлены на рис. 1.

В процессе опроса респондентов выяснили, что значительное количество адъюнктов с базовым уровнем коммуникативных знаний как в контрольной, так и в экспериментальной группах мало знакома с культурой научного и педагогического общения, создание благоприятного психологического климата и отношений между преподавателями и обучаемыми, что сказывается на восприятии и понимании друг друга. Респонденты с достаточным и высоким уровнями изъявили желание расширить знания, которые помогут преодолевать психологические барьеры между ними и аудиторией, избегать конфликтов и недоразумений между субъектами учебной деятельности, совершенствовать коммуникативные способности и тому подобное. Соискатели третьего года обучения обращали внимание на необходимость приобретения коммуникации на научных мероприятиях.

Результаты диагностирования уровней развитости коммуникативного компонента (КК) из состава профессионально важных качеств (ПВК) респондентов на этапе формирующего эксперимента (ФЭ) представлены на рис. 2.

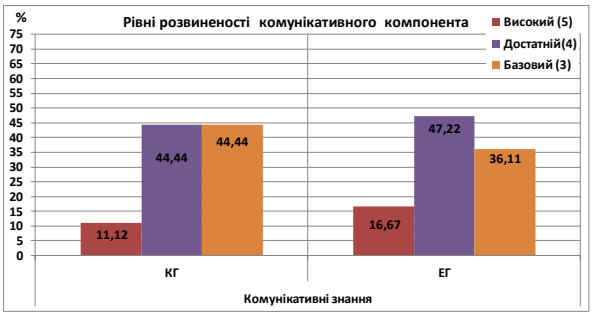


Рис. 1. Уровень развитости КК из состава ПВК респондентов (на этапе КЭ)

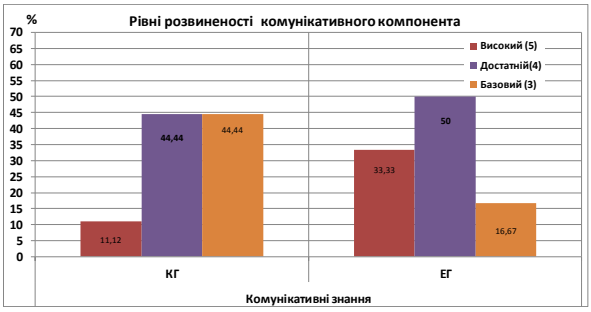


Рис. 2. Уровень развитости КК из состава ПВК респондентов (на этапе ФЭ)

Сравнительные результаты диагностики уровней развитости профессионально важных качеств адъюнктов в КГ и ЭГ на КЭ и ФЭ эксперимента приведены на диаграммах (рис. 3, 4). Анализ свидетельствует, что в ЭГ на формовочном этапе доля респондентов с высоким уровнем больше на 10,69%, чем в контрольной группе, с достаточным уровнем – больше на 1,67%, а с базовым – меньше на 12,36%. Таким образом, КГ и ЭГ на КЭ этапе эксперимента статистически значимо не отличались (χ^2=1,450) на уровне $\rho \leq 0,05$, а после формирующего этапа различия почти статистически значимые (χ^2=3,977) на уровне $\rho \leq 0,05$. Малый прирост параметров развития профессионально важных качеств респондентов объясняется введением в структуру методологической культуры типа информационного метаболизма личности. В целом теория и практика показывает, что они постепенно меняются со временем, однако за относительно короткий период научного эксперимента заметить такую тенденцию практически невозможно.

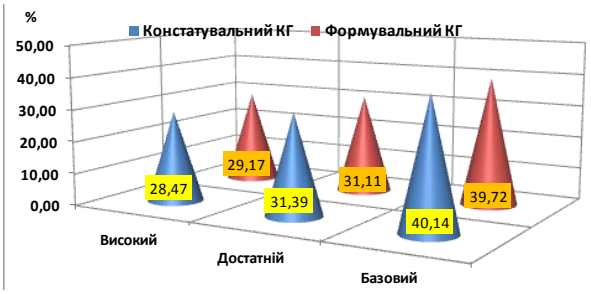


Рис. 3. Динамика развитости ПВК респондентов КГ

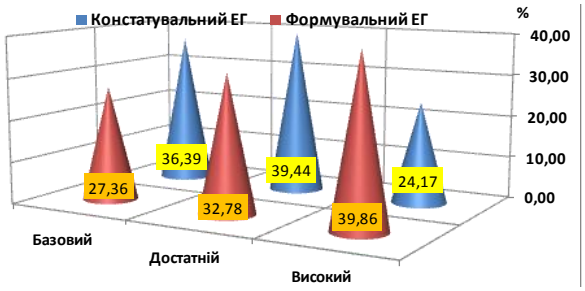


Рис. 4. Динамика развитости ПВК респондентов в ЕГ

На основе экспериментальных данных построим диаграммы, иллюстрирующие динамику развитости когнитивной составляющей (КС) в структуре методологической культуры адъюнктов в КГ (рис. 5) и ЕГ (рис. 6) группах. Анализ диаграмм показывает, что прирост показателей в сторону высокого и достаточного уровней и соответственно уменьшение показателя базового уровня более выраженный в ЭГ. Доля респондентов по КС развитию методологической культуры на этапе формирующего эксперимента с высоким уровнем в ЭГ на 18,44% больше по КГ, с достаточным больше на 3,03%, а с базовым – на 21,46% меньше. Такие различия статистически значимы (χ^2=16,076) на уровне $\rho \leq 0,05$.

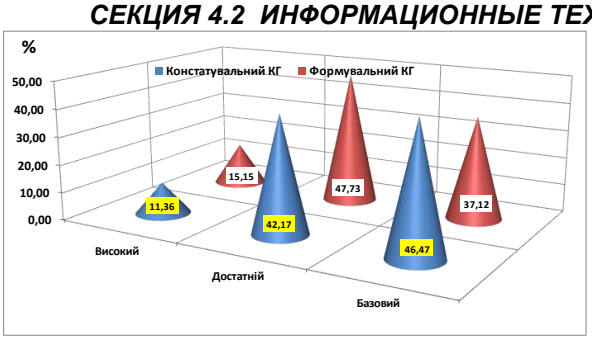


Рис. 5. Динамика развитости КС в КГ

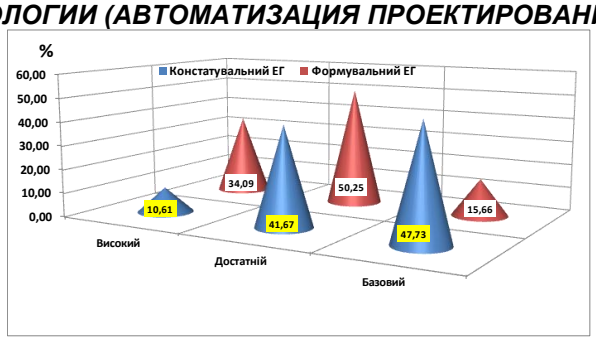


Рис. 6. Динамика развитости КС в ЕГ

Анализ полученных данных показал, что в ЭГ после формирующего этапа эксперимента доля респондентов с высоким уровнем развитости операционно-деятельностной составляющей (ОДС) методологической культуры выросла на 8,12%, в сравнении с КГ, с достаточным уровнем выросла на 8,67%; а доля респондентов с базовым уровнем – уменьшилось на 17,1%.

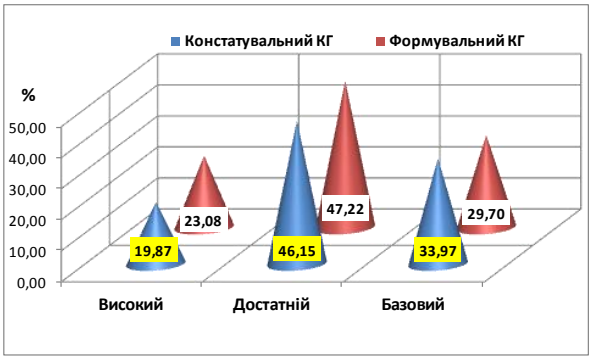


Рис. 7. Динамика развитости ОДС в КГ

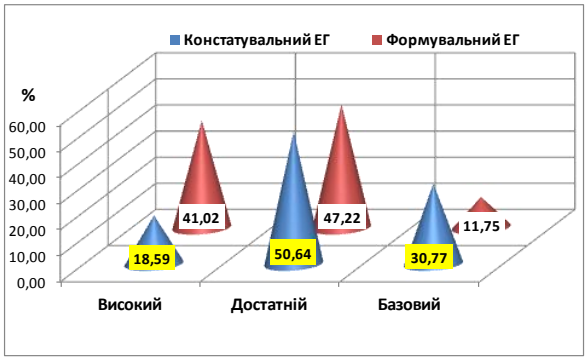


Рис. 8. Динамика развитости ОДС в ЕГ

Для большей наглядности проследим сравнительные результаты диагностики уровней развитости субъектно-рефлексивной составляющей (СРС) адъюнктов в КГ и ЭГ на этапах КГ и ФЭ эксперимента на диаграммах (рис. 9, рис. 10).

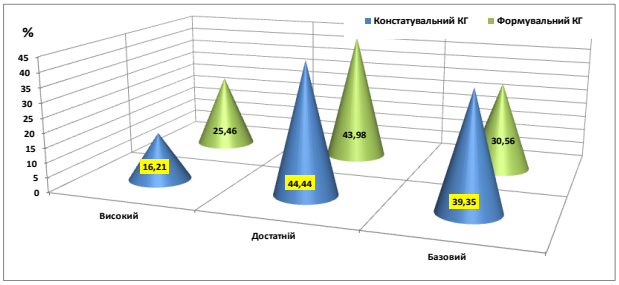


Рис. 9. Динамика развитости СРС в КГ

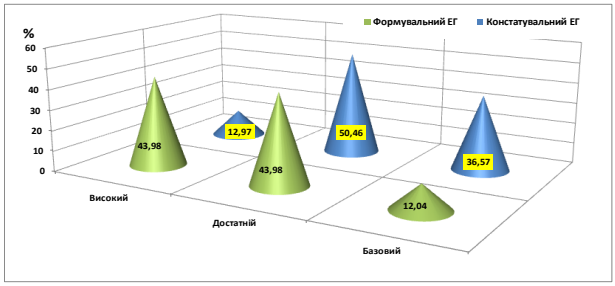


Рис. 10. Динамика развитости СРС в ЕГ

По сравнению с результатами КГ: доля респондентов с высоким уровнем рефлексивных умений возросло в ЭГ на 18,52%; с достаточным – на 0%, а с базовым – на 18,52% меньше за счет положительной тенденции в развитии. КГ и ЭГ на этапе ФЭ статистически значимо не отличались (χ^2=1,450) на уровне $\rho \leq 0{,}843$, а после формирующего этапа различия почти статистически значимые (χ^2=12,991) на уровне $\rho \leq 0{,}05$.

Выводы

Анализ диаграмм показывает, что прирост показателей в сторону высокого и достаточного уровней, а также соответственно уменьшение показателя базового уровня более выраженный в ЭГ. Можно утверждать, что проблема мобильности аспирантов и адъюнктов в пределах страны достаточно проблематично организовывать, а за ее пределами – тем более. Мобильность адъюнктов, кроме того, ограничивается еще условиями необходимости жесткого соблюдения государственной тайны, поскольку тематика исследований их носит закрытие характер.

Наиболее оптимальным и благоприятным периодом организации мобильности является технологическая фаза теоретического и практического этапа исследования. Во время мобильности соискатели как правило могут приобретать передовой опыт организации диссертационного исследования в в ведущих научных школах партнеров.

В целом, экспериментальные результаты показывают, что при условии соблюдения предложенного научно-методического сопровождения соискателей [4] и методологического алгоритма, рассматриваемого в данной статье, обеспечилось развитие методологической культуры у соискателей ученой степени на должном уровне в экспериментальной группе, а, следовательно, и подтвердилась гипотеза о возможности организации мобильности. Исходя из этого эксперимента можно утверждать, что предложенный алгоритм обеспечивает реализации мобильности адъюнктов, остается не разработанным механизм разрешительных документов (форм рапортов) на получение решения, относительно дистанционного научно-методического сопровождения.

Научная новизна полученного результата

Научная новизна работы заключается в моделировании условий по обеспечению возможности мобильности соискателей ученой степени в ракурсе соблюдения неразрывной педагогического процесса по развитию методологической культуры путем привлечения дистанционного обучения, как формы научно-методического сопровождения. Это позволит в полной мере реализовать академическую мобильность адъюнктов не только внутри страны, но и за ее пределами. В результате обеспечения возможности мобильности соискателей ученой степени растет вероятность того, что они приобретут неоценимый опыт в трансляции методологической культуры в научных школах зарубежных стран.

Библиографический список

1. Ягупов, В.В. Дистанційне навчання як тимчасова форма науково-методичного супроводу аспірантів (ад'юнктів) у забезпеченні мобільності / В.В. Ягупов, Л.М. Козубцова, І.М. Козубцов // Теорія і практика дистанційного навчання у професійній освіті: збірник матеріалів І Всеукраїнської веб-конференції (м. Київ, 28 лютого 2017 року) / Інст-т проф.-тех. освіти НАПН України. – К.: ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2017. – С. 79 – 83.

2. Козубцов, І.М. Методологія організації роботи аспірантами над дисертаційним дослідженнями / І.М. Козубцов // Професійна освіта: проблеми і перспективи / ІПТО НАПН України. – 2013. – Випуск 5. – С. 16 – 22.

3. Козубцов, И.Н. Учебная программа факультатива «Развитие методологической культуры адъюнктов» / И.Н. Козубцов // «Международный журнал экспериментального образования». – 2016. – №4 (Часть 1). – С. 62 – 67.

4. Козубцов, І.М. Модель співпраці наукового керівника та аспіранта в процесі науково-педагогічного супроводу / І.М. Козубцов // Науково-практичний журнал. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Національний університет оборони України. – 2015. – №3(24). – С. 133 – 140.

5. Цитрицька, Л.М. Умови забезпечення дистанційної форми науково-методичного супроводу магістрів ВВНЗ / Л.М. Цитрицька, Л.М. Козубцова [Электронный ресурс] // Междисциплинарные исследования в науке и образовании. – 2017. – № 6Sm.). – Режим доступа URL: mino.esrae.ru/188-1591.

6. Козубцов, І.М. Феномен методологічної основи діяльності аспірантів у системі вищої військової освіти: аналітико-порівняльне обґрунтування / І.М. Козубцов, Л.М. Козубцова // Науково-практичний журнал. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Національний університет оборони України. – 2015. – №1(22). – С. 119 – 122.

7. Ягупов, В.В. Результати експерименту щодо розвитку методологічної культури ад'юнктів (аспірантів) / В.В. Ягупов, Л.Ф. Мараховський, І.М. Козубцов [Електронний ресурс] // «Теорія і методика професійної освіти». – 2016. – Випуск № 11. (3). – Режим доступу URL: http://tmpo.ivet-ua.science/images/Vol.11/YagupovAndKo11.pdf.

[1]V.V. Yagupov, [2]I.N. Kozubtsov, [3]L.M. Kozubtsova

PROGNOSIS THE AVAILABILITY OF ADJUNCTS TO THE PROFESSION IN TERMS OF THEIR METHODOLOGICAL CULTURE

[1] National defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2] Scientific center of communication and Informatization
Military Institute of telecommunications and Informatization, Kiev, Ukraine
[3] Military Institute of telecommunications and Informatization, Kiev, Ukraine

Purpose of work. To open conditions of providing the remote form of scientific and methodical maintenance of applicants of scientific degree.

Conclusions: Experimental results in the experimental group show that subject to the scientific and methodological support of applicants and methodological algorithm it is possible to ensure the development of methodological culture of applicants of academic degree at the appropriate level. The result confirms the hypothesis about the possibility of mobility of applicants of academic degree.

Novelty: the Scientific novelty of the work is to simulate the conditions to ensure the mobility of applicants for the academic degree in terms of compliance with the inseparable pedagogical process for the development of methodological culture. This is achieved by using distance learning as a form of scientific and methodological support. This will make it possible to fully realize the academic mobility of adjuncts not only within the country but also abroad. As a result of the mobility of applicants, the probability that they will gain invaluable experience in the translation of methodological culture in scientific schools of foreign countries increases.

Keywords: condition, security, remote form, scientific-methodical support, graduate student, adjunct, methodology, methodological culture, scientific Director.

УДК 004.62

Д.А. Щербаков, М.В. Ширяев

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОТВЕТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ КАНДИДАТОВ В ОТВЕТЫ В ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ ТИПА ВОПРОС-ОТВЕТ, ОСНОВАННОЙ НА ДВУМЕРНОЙ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В рамках данной публикации дается краткое определение двумерной онтологической структуры данных, на основе которой был разработан алгоритм синтеза ответа для вопросно-ответных систем. Устойчивость алгоритма синтеза определяется как метрикой сопоставления целевых сущностей (основанной на представленной структуре) в базе знаний и поисковом запросе, так и анализом смежного окружения в семантической сети найденных сущностей. Полнота покрытия анализируемых пользовательских запросов определяется спектром под-алгоритмов поиска на основе сопоставительных прилагательных. Как следствие, само множество этих под-алгоритмов определяет одно их направлений параметризации алгоритма синтеза и поиска ответов в вопросно-ответных системах.

Ключевые слова: поисковые системы, онтология, алгоритмы поиска, метрика.

Введение

Задачи вопросно-ответных систем отличаются от задач классических поисковых систем. Если цель последних, предоставлять сниппеты (англ. snippet - отрывок, фрагмент) где было обнаружено совпадение по ключевым словам поискового запроса, то вопросно-ответные системы нацелены на решение самой задачи пользователя системы, устраняя промежуточные действия анализа данных (попытки извлечения ответа из сниппета). Как следствие, такой критерий накладывает ограничение на структуру данных в поисковой системе. Классической поисковой системе является достаточной структура инвертированного индекса. Вопросно-ответной поисковой системе необходима расширенная структура, которая должна содержать как множество структурированной мета-информации каждой индексируемой сущности, так и данные о отношениях смежных индексируемых сущностях.

Истоками такой структуры данных была онтология, которая применяется в экспертных системах. Однако полнота экспертных систем напрямую зависела от затраченных ресурсов на ручную разметку и наполнение такой базы знаний. Данные факторы критично сказываются на масштабируемости и надежности поисковой системы (с точки зрения покрытия анализируемой предметной области и включения наиболее последних данных во внутреннюю базу знаний).

В публикациях [1, 2] была введена расширенная структура онтологических данных. Такая структура является достаточно гибкой для ее применения при автоматическом моделированиииерархической онтологии. Такойформат данных можно именовать как «двумерную онтологическую структуру». Пример индексированных данных, имеющую такую структуру изображен на рис.1.

Одно из измерений в данном рисунке является аналогом семантической сети, в котором демонстрируется отношение между индексируемыми сущностями. Второе измерение отражает внутреннюю структуру каждого узла представленного графа. Такая структура имеет вид онтологии, которая определяет иерархию каждого конкретного узла. Эта иерархия моделируется автоматически, на основе алгоритма представленного в работе [3,4,5].

Соответственно, такая структура данных способна хранить уникальную для каждого контекста информацию о ее параметризации и спецификации с учетом обучающей выборки. В рамках решения данной задачи необходимо спроектировать алгоритм синтеза ответа, на основе данных в представленной структуре. Синтез ответа предполагает моделирование ответа на вопрос, который подразумевает операции сопоставления имеющихся данных. Примером таких ответов являются данные, которые отсутствуют в обучающей выборке в явном виде, но могут быть получены дедуктивными методами анализа.

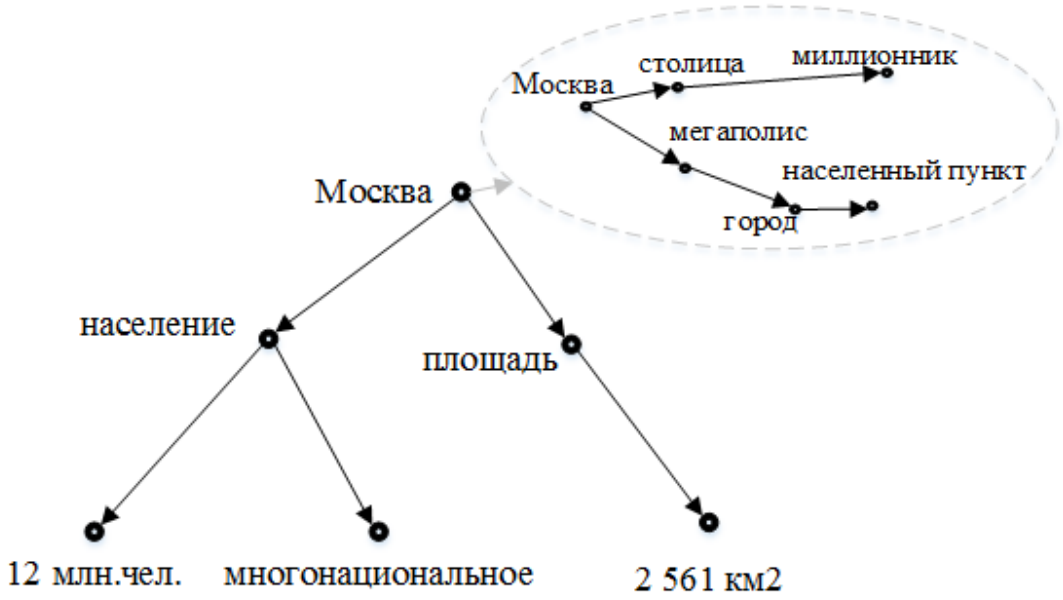


Рис. 1 – Двумерная онтологическая структура на примере индексированного контекста о сущности города Москва

Алгоритм синтеза

Одним из требований к алгоритму синтеза ответовявляется наличие инструмента классификации пользовательских запросов по их типу. Пользовательские запросы необходимо классифицировать как на основе «вопросных местоимений» (кто, сколько, какой, почему), так и на основе сопоставительных прилагательных (больше, меньше и т.д.). Если для первого типа запросов необходимы преимущественно алгоритмы прямого поиска целей (ключевых слов) запроса в представленной структуре, то второй тип запросов требует инструмента сопоставления сущностей (целями которых являются так же ключевые слова в запросе). Для каждого сопоставительного запроса необходимопременить метрику сопоставления целей запроса (определить меру сходства) и в случае высокой схожести этих целей осуществлять анализ смежного контекста (в семантическом графе этих целей). Таким образом, алгоритму синтеза ответов необходимо:

- кластеризовать вопрос (для сопоставления с определенным типом);
- найти в имеющейся структуре предметы запроса;
- осуществить процедуру сопоставлениянайденных сущностей (их онтологическую структуру), на основе заданной метрики.

Псевдокод поиска ответов с применением метрики представлено в таблице 1.

Таблица 1

Псевдокод алгоритма поиска ответов

Номер строки	Код
1	ветов(запрос, порог)
2	предмет_запроса:= извлечьПредмет(запрос)
3	узлы := поискУзлов(предмет_запроса)
4	ЕСЛИ (размер(узлы) > 1) И (метрическоеПодобие(узлы) < E)
5	критерий := извлечьКритерийСопоставления(запрос)
6	ответ := поискЗначенийДляСопоставления(узлы,критерий, порог)
7	ВЕРНУТЬ ответ
8	ИНАЧЕ
9	ВЕРНУТЬ [ ] # пустое множество

Рассмотрим пример запроса: Население какого города является бо́льшим, Москвы или Санкт-Петербурга? В данном запросе:

- предметом являются: Москва и Санкт-Петербург;
- сопоставительным прилагательным является: бо́льшим;
- критерий сопоставления является: население.

Данные элементы необходимо извлечь для корректной работы алгоритма, представленного в таблице 1. Поиск узлов осуществляется на основе любого алгоритма обхода графа. После успешного поиска осуществляется алгоритм сопоставления найденных сущностей попарно (при помощи метрики, разработанной в [6]). Те пары найденных узлов, метрическое расстояние между которыми находится в пределах допустимой погрешности E (строка 4 таблицы 1), являются кандидатами для дальнейшего анализа.

Алгоритм сопоставления сущностей подразумевает наличие критерия сопоставления. В данном примере критерием является сущность «население», а правило сопоставление – «бо́льшим». Из этого следует, что при схожих онтологических структурах (которые оценивались на основе минимального метрического расстояния) заданный критерий «население» должен находится на сопоставимой глубине в семантическом контексте (с допустимым отклонением, которое передается на вход алгоритма «порог» строка 1 таблицы 1) у всех анализируемых предметов запроса. Это значит, что если у центрального узла (цели) Москва есть сущность «население» на расстоянии N от нее, то при наличии такой же сущности у узла Санкт-Петербург она должна находится на таком же расстоянии $N \pm \Delta$, гдеΔявляется минимальной погрешностью. Узел смежный с узлом «население», имеющий количественное значение, является значением этого «населения», которое необходимо сопоставить на предмет оператора больше или меньше с оставшейся целевой сущности. Результат сопоставления будет являться кандидатом в ответы.

Такой подход к поиску ответов является алгоритмом «синтеза ответа».

Формализация алгоритма

Определим структуру базы знаний. Конечным множеством индексированных данных является семантический 2-мерный граф G. Элементами данного графа являются несвязные компоненты (каждым компонентом является индексируемый контекст семантически не связанный с другими смежными и не смежными контекстами), количество которых $|G| = N$. При этом $|G_i| = M_i$является размером i-го компонент. Каждый компонент является аналогом семантической сети, каждый узел которого так же является своим подмножеством (имеющий онтологическую структуру). Глубина такого подмножества не должна быть бесконечно глубокая. Глубина определяет информативность (параметризированность) текущего узла. Малая глубина является признаком слабой информативности рассматриваемой онтологии сущности;высокая – показателем избыточной параметризации, что в дальнейшем может влиять как на производительности системы, так и на увеличении вероятности появления ошибочных результатов проведенного анализа. Соответственно, глубина узлов должна быть максимально лаконичная и не избыточная.

Далее, проведем анализ пользовательского запроса, который представим в виде вектора V<T, C, K>. Элементами данного вектора являются: множествопредметов запросов T размерностью $|T| \geq 2$. Данное требование по размерности определено тем, что операции сопоставления сущностей возможны только как минимум над парой смежных сущностей. Элементом C является условие сравнения (больше, меньше и т.д.). В зависимости от типа условия алгоритм синтеза применяет различные операции сопоставления. Элементом K является критерий сравнения. Как правило, критерием является 1 или более общих сущностей между целями T, по которым осуществляется критерий сопоставления.

На основе элементаT вектора запроса V осуществляем поиск опорных сущностей в графе G. В случае успешного поиска необходимо попарно произвести операцию сопоставления онтологий всех найденных сущностей при помощи метрики [6]. Т.к. онтология узла имеет вид ориентированного дерева, то асимптотическая сложность сопоставления этих деревьев требует не

более: $d \bullet \log(h) + c$операций, где dи cконстанты, накладывающие линейную сложность на расчеты.hявляется глубиной дерева.

Операция поиска критерия K в компоненте G_i, осуществляется в пределах целей K, при этом глубина удаленности от K от T не должна быть значительной. Чем меньше глубина, тем больше релевантность ответа на пользовательский запрос.

Выводы

Алгоритмы вопросно-ответных поисковых систем являются одним из самых перспективных направлений развития в области анализа и извлечения знаний из неструктурированных текстовых данных. Данная публикация является продолжением развития исследований [1,2,3,4,5] направленияанализа данных в вопросно-ответных систем. Заимствовав точность поиска и синтеза ответов из экспертных систем (основанных на онтологиях), данное исследование расширяет онтологическую структуру данных и определяет алгоритм синтеза ответов в таких системах.

Приведенный алгоритм учитывает как анализ пользовательского запроса, так и процедурусамого поиска в представленной 2-мерной онтологической структуре данных.

Задача представленного алгоритма не относится к классическому поиску, а покрывает более сложную цель– синтезкандидатов, при явном отсутствии информации в обучающей выборке, но достаточном количестве и качестве (субъективном) данных для дедуктивного вывода ответов. Данный алгоритм является чувствительным (учитывает иерархичность каждой сущности) к анализируемому контексту индексированных сущностей.

Отсутствие ацикличности в структуре узлов семантического графа положительно сказывается как на производительность системы (вычисление метрического расстояния между парой смежных сущностей) по времени, так и на точность поиска.

Так же, представленная информация является достаточной для последующего расширения множества под-алгоритмов поиска, с целью большего увеличения покрытия «сравнительными прилагательными» процесса поиска.

Библиографический список

1. Щербаков Д.А., Ширяев М.В. «Определение рекуррентноиˆ структуры связных данных в контекстно-зависимых поисковых системах типа вопрос-ответ» // Системы управления и информационные технологии №4.1(62), 2016
2. Щербаков Д.А. «Онтологические связные данные в поисковых системах типа вопрос-ответ» // Инновационная наука, No11 (часть 2 из 3), 2015. - С. 140-143
3. Щербаков Д.А., Ширяев М.В. «Методы вероятностного определения связеиˆ между именованными сущностями в текстовых данных» // Системы управления и информационные технологии, No3.1(61), 2015. – С. 186-190
4. Щербаков Д.А., Ширяев М.В. «Моделирование краткоиˆ онтологии и ее применение в поисковоиˆ системе типа вопрос-ответ» // Материалы XXI международной научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015 Россия, Н.Новгород, 2015,- С.86-91
5. Щербаков Д.А., Ширяев М.В. «Автоматическое именование кластеров текстовых данных на основе иерархическоиˆ категоризации» // Материалы XXI международной научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ- 2015 Россия, Н.Новгород, 2015, - С. 91-94
6. KonradRieck. «ApproximateTreeKernels» // TammoKrueger, UlfBrefeld, Klaus-RobertMuller / JournalofMachineLearningResearch 11 (2010) 555-580

D.A.Scherbakov , M.V.Shiryaev

THE ANSWERS SYNTHESIS ALGORITHMUSING THE FOLLOWING DYNAMIC COMPARISONOF THE TARGET ANSWERS IN A QUESTION-ANSWER SYSTEM BASED ON THE 2-DIMENSIONAL ONTOLOGY DATA STRUCTURE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

This paper describes the short definition of 2-dimensional ontological data structure. This data structure was used for development of the answers synthesis algorithm for a question-answer search engine. The accuracy of the answers synthesis algorithm is determined as by the metric of entities comparison in knowledge database as by the adjacent environment analysis in a semantic network of the target entities. The recall of the coverage of user queries (for the forward analysis) is defined by the range of the search sub-algorithms which are based on the contrastive adjectives. As a result, such algorithms set determines the one of the parameterization way of synthesis algorithm and the answer retrieval in a question-answer system.

Keywords: search engine, ontology, search algorithms, metric

УДК 519.173

М.А. Степаненко, М.Е. Авдошина

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАЗРЕЗОВ ГРАФОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Исследование и анализ различных алгоритмовпостроения разрезов графов с последующим применением их для поиска минимального разреза.
Методология: Использование теории графов, алгоритмов Штор – Вагнера и Каргера.
Результаты: Оценка быстродействия выполнения и точности поиска кратчайшего пути рассматриваемых алгоритмов на основе граф – моделей с различными характеристиками связности. Программная реализация изученных алгоритмов.
Выводы: В ходе работы установлено существенное превосходство по быстродействию алгоритма Штор – Вагнера относительно алгоритма Каргера.
Ключевые слова: граф, минимальный разрез графа, теория графов, связность, алгоритм Штор – Вагнера, алгоритм Каргера.

Теория графов является областью дискретной математики, особенностью которой является геометрический подход к исследованию сложных объектов и связей между ними. Вершины графа — это взаимосвязывающие части объекта, а ребра – связи между ними. С помощью графов можно представить множество схем связей, например,товаропроводящую связь, локально вычислительные и транспортные сети.

Одной из важнейших инженерно–оптимизационных задач является поиск минимального разреза в связном графе, основной целью которой является поиск “узких мест” в различных сетях. Эта задача имеет прикладное применение при расчетах надежности компьютерных и телефонных сетей, расчетах кратчайшего пути железнодорожных и автомобильных дорог, определения коммуникаций и разделения различных социальных групп, и даже при сегментации изображений.

В работе предлагается рассмотреть два алгоритма поиска минимального разреза связного графа и сравнить их по критериям быстродействия и точности поиска кратчайшего пути.

Алгоритм Каргера, выполним для неориентированных связных графов, с количеством вершин не превышающим 10^3, это связанно с большой трудоемкостью данного алгоритма. Эти условия являются обязательными, для выполнения алгоритма. В основе алгоритма лежит процедура стягивания ребра, во время которой происходит объединение пары вершин в одну, и, соответственно, происходит уменьшение общего количества вершин на единицу. Алгоритм предполагает случайную выборку ребер для стягивания, которое выполняется до тех пор, пока не останутся две вершины. Разрез этих вершин и будет соответствовать разрезу исходного графа. К недостаткам данного алгоритма отнесем то, что ребра для стягивания выбираются случайным образом, что не гарантирует высокой вероятности нахождения минимального разреза графа. Экспериментально показано, что вероятность нахождения минимального разреза графа после однократного выполнения алгоритма, составляет 50%, отсюда следует и малое время его выполнения (1).

$$O(T) = O(n^2)\,, \tag{1}$$

где n – количество ребер исходного графа.

В случае достижения 100% вероятности нахождения минимального разреза графа, время выполнения алгоритма составит:

$$O(T) = O(n^4 \log n) \tag{2}$$

Это отрицательно скажется на быстродействии выполнения алгоритма.

Среднее время работы алгоритма Каргера, для поиска минимального разреза графа, с высокой вероятностью(около 80%) составит:

$$O(T) = O(n^2 \log n) \tag{3}$$

Рассмотрим Алгоритм Штор–Вагнера. Он применим для неориентированных взвешенных связных графов. Для выполнения алгоритма следует выполнить следующие шаги:

1. Для исходного графа *G*с *n*вершинами и *m* ребрами формируется некоторое множество вершин *A*, в котором первоначально содержится одна произвольная вершина исходного графа.

2. Следующим шагом выполняется поиск вершины *y*, наиболее связанной с вершиной, вошедшей в множество *A*.

$$\sum_{i\in A} W_{iy} = \max_{j\notin A} \sum_{i\in A} w_{ij} \quad , \tag{4}$$

где *w* – вес ребер.

После чего найденная вершина*y* добавляется, в множество *A*. Далее пересчитываются веса оставшихся вершин в исходном графе:

$$W = \sum_{i\in A} \sum_{j\notin A} W_{ij} \tag{5}$$

После чего переходим к шагу 2 и вновь начинается поиск некоторой вершины *y*. Процесс завершится только тогда, когда все вершины перейдут в множество *A*, то есть через (*n-1)*итерацию. Далее объединяются пары вершин, добавленные в множество *A*последними, при этом удаляются инцидентные им ребра, их вес записывается в новое множество. Данный процесс происходит до тех пор, пока не останется одна вершина. После этого следует сравним записанные веса и найти минимальный среди них. Среднее время работы алгоритма Штор–Вагнера вычисляется по формуле (6).

$$O(Tm) = O(nm + n^2 \log n) \tag{6}$$

Рассмотрев описанные алгоритмы, можно сделать следующие выводы. Алгоритм Каргера имеет ограничение по количеству вершин рассматриваемого графа, в то время как алгоритм Штор–Вагнера применим к графам с любым количеством вершин, но при этом граф должен быть обязательно взвешенным. Алгоритм Каргера в отношении вероятности нахождения минимального разреза является вариативным к затратам по времени на реализацию, в то время как алгоритм Штор–Вагнера позволяет найти минимальный разрез графа со 100% вероятностью по формуле (6).

В работе был проведен анализ быстродействия выполнения алгоритмов Штор – Вагнера и Каргера при использовании различных структур графов. Анализ рассматриваемых графов был выполнен на основе различных значений коэффициента связности K_c. Коэффициент связности графа – это отношение количества ребер*m* к максимально возможному числу реберE_{max} в исследуемом графе*G* размерности *n*.

$$K_c = \frac{g}{E_{max}} \tag{7}$$

$$E_{max} = \frac{n(n-1)}{2} \tag{8}$$

В табл. 1 приведены экспериментально полученные результаты по быстродействию работы рассмотренных алгоритмов.

Вычисления проводились на графах одинаковой размерности, но с разным количеством ребер. Это было сделано, для того, чтобы получить различные коэффициенты связности и на его основе провести анализ быстродействия выполнения алгоритмов Штор – Вагнера и Каргера.

В соответствии с графиком на рисунке 1 можно увидеть, что алгоритм Штор – Вагнера при различной степени связности ($0{,}008016 \le K_c \le 0{,}12024$) показывает достаточно равномерный результат по значению быстродействия выполнения поиска минимального разреза графа.

В соответствии с графиком на рисунке 2 видно, что скорость выполнения алгоритма Каргера существенно зависит от коэффициента связности K_c. Время выполнения поиска минимального разреза графа при помощи алгоритма Каргера значительно увеличится при увеличении коэффициента связности и на рассмотренном интервале имеет линейный характер.

Таблица 1

Быстродействие работы алгоритмов

Кол-во Вершин	Кол-во ребер	Коэффициент связности K_c	Штор - Вагнер (мс)	Каргер (мс)
500	1000	0,008016	1089	20685
500	2000	0,016032	1103	35843
500	3000	0,024048	1190	50209
500	4000	0,032064	1225	65051
500	5000	0,04008	1240	79650
500	6000	0,048096	1257	90682
500	7000	0,05611	1264	108832
500	8000	0,06412	1270	119326
500	9000	0,072144	1280	138160
500	10000	0,08016	1289	155646
500	11000	0,088176	1293	164838
500	12000	0,096192	1297	187708
500	13000	0,1042084	1300	203204
500	14000	0,112224	1312	219143
500	15000	0,12024	1314	225892

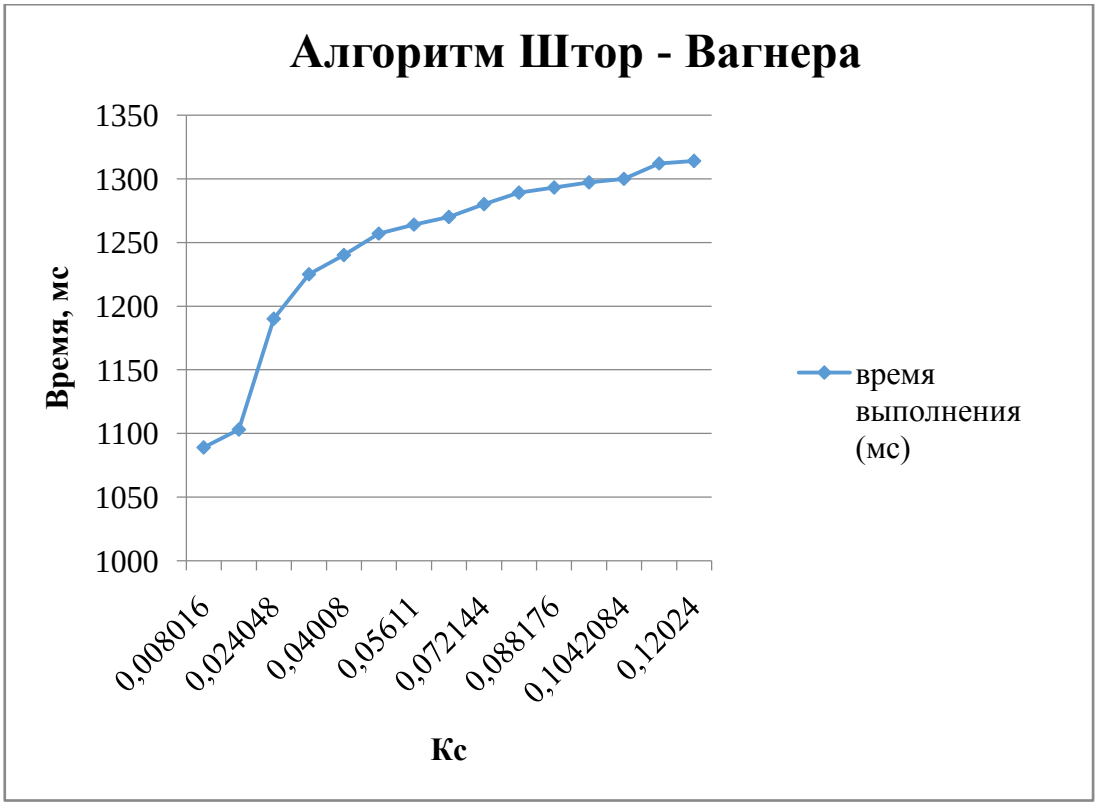


Рис. 1. График зависимости быстродействия от K_c для алгоритма Штор – Вагнера

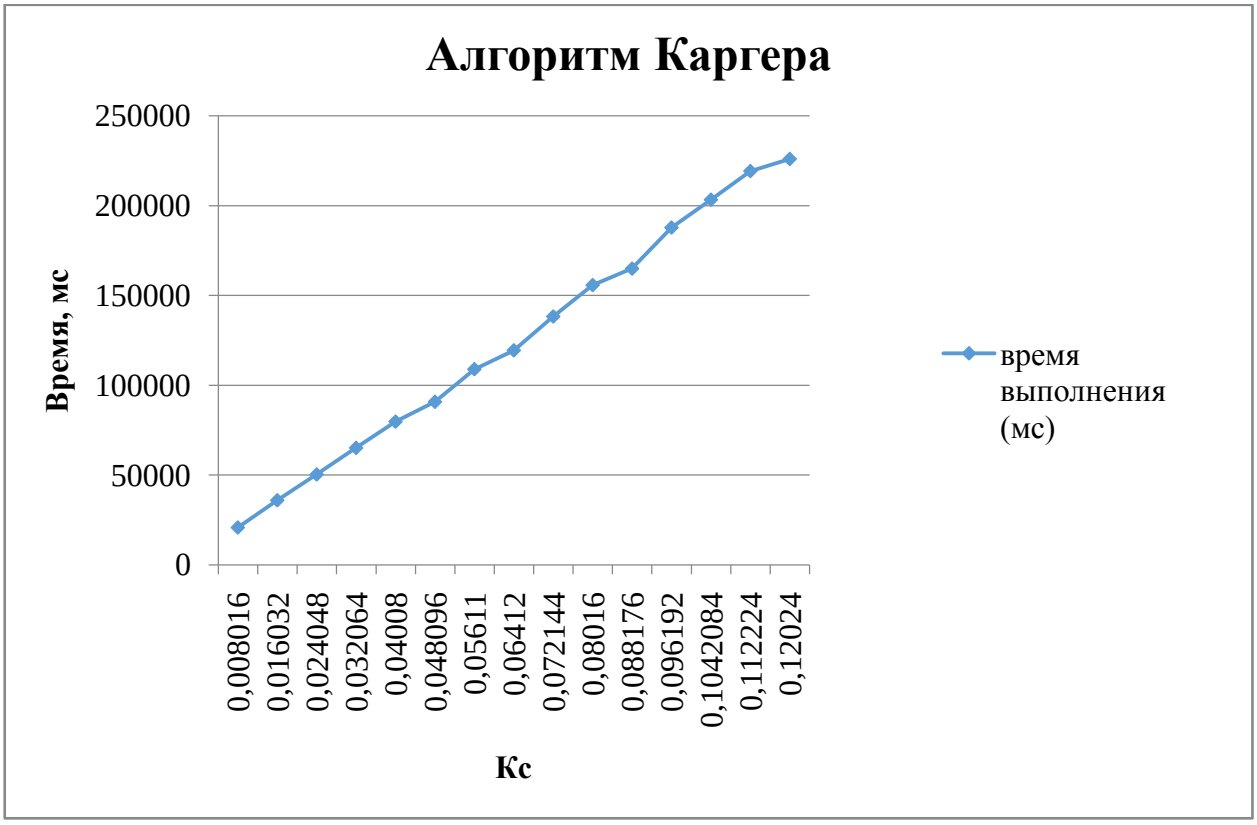


Рис. 2. График зависимости быстродействия от $К_с$ для алгоритма Каргера

Выводы

Проведя анализ алгоритмов Штор – Вагнера и Каргера для поиска минимального разреза графов можно сделать следующие выводы. Алгоритм Штор – Вагнера имеет значительное преимущество перед алгоритмом Каргера в скорости выполнения вычислений вне зависимости от коэффициента связности, в то время как алгоритм Каргера существенно зависит от коэффициента $К_с$. Также существует и другое значительное преимущество алгоритма Штор – Вагнера, это точность нахождения минимального разреза графа при выполнении однократной итерации алгоритма, в то время как алгоритм Каргера является вариативным. Для того, чтобы получить 100% результат нахождения минимального разреза графа при помощи алгоритма Каргера следует выполнить его *n*раз, (*n*количество вершин в исследуемом графе). Отсюда следует длительное время его выполнения.

Библиографический список

1. Элементы теории графов: учебное пособие / Л.Н. Домнин – Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007.
2. Графы, сети и алгоритмы. / Свами М., Тхуласираман К. – М.: Мир, 1984, - 454 с.
3. Дискретная математика: Учебник для вузов 3-е издание. /Нивиков Ф. Стандарт третьего поколения. – СПБ.:Питер,2017. – 496с.:ил. – (Серия «Учебник для вузов»)
4. Основные алгоритмы решения задачи о максимальном потоке /А.М. Караваев. - Петрозаводск.: ПетрГУ, 2008.
5. Mechthild Stoer, Frank Wagner. A Simple Min-Cut Algorithm [1997]

M.A. Stepanenko, M.E. Avdoshina

INVESTIGATION OF MODELS AND METHODS OF CONSTRUCTION OF CROSS SECTIONS

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

Objective: Research and analysis of various algorithms for constructing graph sections with subsequent application of them to search for a minimal section.

Methodology: Using the theory of graphs, the Stor-Wagner and Karger algorithms.

Results: Evaluation of the execution speed and accuracy of the shortest path search of the algorithms under consideration on the basis of graph models with different connectivity characteristics. Software implementation of the algorithms studied.

Conclusion: In the course of the work, a significant superiority in the speed of the Shtor-Wagner algorithm with respect to the Karger algorithm was established.

Keywords: graph, minimal graph cut, graph theory, connectivity, Shtor - Wagner algorithm, Karger algorithm.

УДК 004.738.52

М. Д. Андреев, Н.Е. Пособилов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ ЗАГРУЗКИ WEB-СТРАНИЦ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной работе проведено исследование факторов, влияющих на скорость загрузки web-страниц, в том числе, приведены материалы исследований мировых компаний, приведены зависимости конверсии интернет-магазинов от времени загрузки web-страницы сайта. Описан процесс загрузки web-страниц, выделены компоненты серверной и клиентской части, влияющие на скорость загрузки web-страниц.

Ключевые слова: web-страница, ускорение загрузки сайта, конверсия интернет-магазинов.

Всем известно, что медленный сайт – это недостаток. Из-за долгой загрузки web-страниц возникают серьезные проблемы при решении повседневных задач. Особенно остро эта проблема сказывается на величине конверсии интернет-магазинов. Компания Amazon проводила эксперимент, в котором выяснила, что каждые 0.1 с задержки приводят к снижению продаж на 1%. Влияние скорости еще более выражено на мобильных устройствах, где ограниченная мощность процессора и нестабильное Интернет-соединение являются обычными факторами. Опираясь на исследования компании Kinsta, 74% людей с мобильными устройствами уйдут со страницы, если она не загрузится в течении 5-ти секунд. Этот факт становится более весомым, если учитывать то, что на сегодняшний день более половины интернет-аудитории используют мобильные устройства для доступа к сайтам.

Компания SOASTA проанализировала данные одного из ведущих интернет-магазинов. Во внимание принимался трафик с мобильных устройств, полученный в течении 1 месяца. Общий объем составил около 4.5 миллиона сессий. Сессии были распределены по скорости, и в каждой такой когорте был определен средний процент конверсии и процент отказов. По результатам исследования выяснилось, что страницы, которые загружались всего на 1 секунду быстрее, получали на 27% конверсии больше (рис.1).

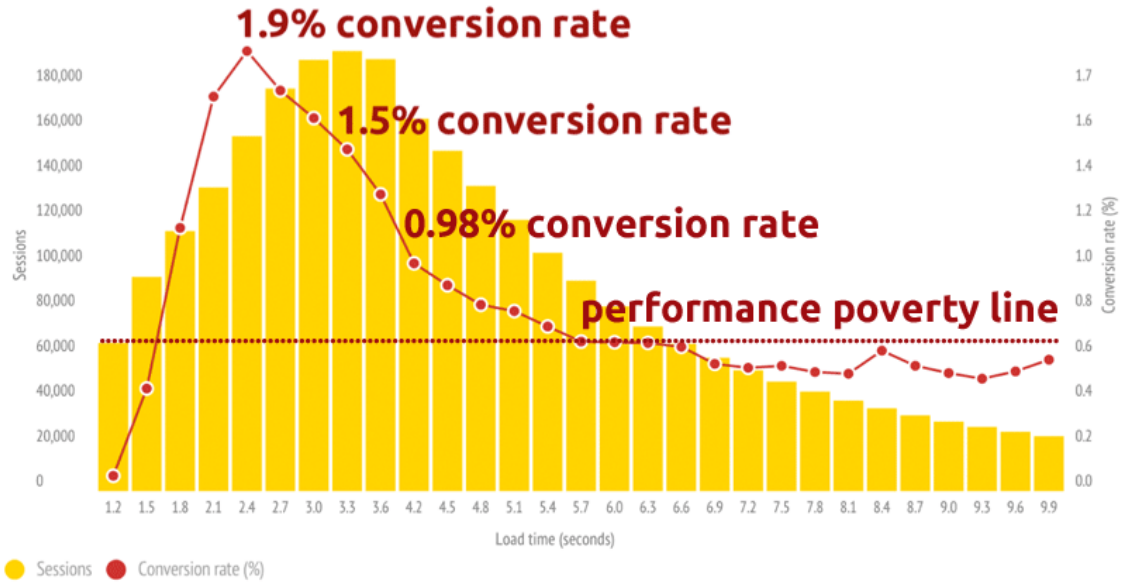


Рис. 1. Зависимость конверсии от скорости загрузки web-страницы

Еще одна причина важности вопроса скорости сайта – техническая. Медленные сайты потребляют повышенный объем ресурсов хостинга, что приводит к дополнительным расходам.

Проблемы со стороны серверной части снижают возможность беспроблемно переживать максимальные нагрузки на сайт.

Скорость загрузки web-страниц касается двух частей: клиентской и серверной. Они равноценны в получении конечного результата, но каждая обладает своими особенностями.

Чтобы определить из чего именно формируется итоговое время загрузки web-страницы, необходимо разбить весь процесс на части и исследовать каждый фактор, влияющий на скорость загрузки web-страниц.

Полный процесс загрузки web-страницы (при первом её посещении) выглядит следующим образом:

1. DNS-запрос по имени сайта.
2. Подключение к серверу по IP (TCP-подключение).
3. Установление защищённого соединения при использовании HTTPS (TLS-подключение).
4. Запрос HTML-страницы по URL и ожидание сервера(HTTP-запрос).
5. Загрузка HTML.
6. Разбор HTML-документа на стороне браузера, построение очереди запросов по ресурсам документа.
7. Загрузка и парсинг CSS-стилей.
8. Загрузка и выполнение JS-кода.
9. Начало рендеринга страницы, выполнение JS-кода.
10. Загрузка веб-шрифтов
11. Загрузка изображений и других элементов.
12. Окончание рендеринга страницы, выполнение отложенного JS-кода.

Упрощенная модель процесса загрузки web-страницы показана на рис. 2.

Стоит учитывать, что в данном процессе некоторые позиции могут меняться местами, выполняться одновременно, либо и вовсе отсутствовать.

Серверная часть включает в себя первые четыре пункта, оставшиеся, соответственно, это клиентская сторона.

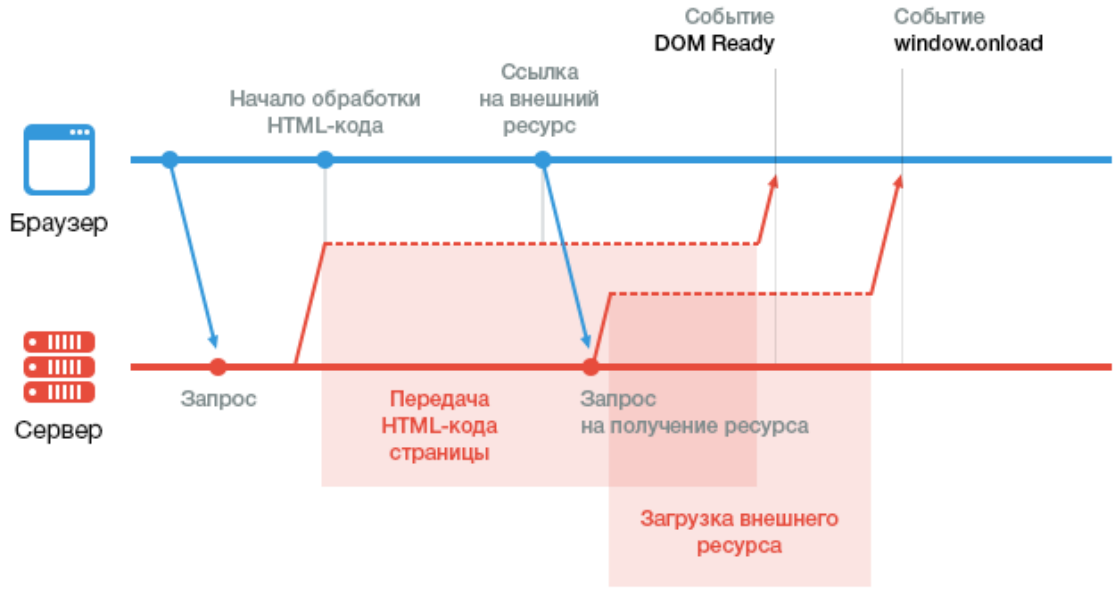


Рис. 2. Упрощенная модель процесса загрузки web-страницы

Рассмотрим факторы, влияющие на скорость загрузки web-страниц со стороны серверной части.

1. Серверные ресурсы (Хостинг). В большинстве случаев является основной причиной медленной загрузки небольших сайтов. Она связана с ограничением или недостатком ресурсов хостинга (CPU и скорость дисковой системы). Эта проблема решается снятием ограничений на

производительность хостинга, либо переходом на другой более приятный хостинг. Чаще всего этот вопрос является сугубо финансовым – чем дороже хостинг, тем выше его производительность.

2. Сервер базы данных. Большая часть времени загрузки тратится на запросы к базе данных. Сложные запросы и неправильно структурированная БД могут значительно замедлить скорость загрузки web-страницы. Проблема решается модернизацией СУБД и оптимизацией запросов.

3. Влияние CMS и программного кода. CMS (Contentmanagementsystem, Система управления содержимым) – информационная система, используемая для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления контентом.

Нагрузка на сервер зависит от кода, который входит в используемуюCMS, однако разработчики популярных на сегодня систем стараются их поддерживать и модернизировать для максимальной скорости. Чаще всего, проблемы возникают, когда система используется не по назначению. Например, система для интернет-магазина используется для создания блога, или система для маленьких сайтов используется для создания портала.Общий рейтинг популярности CMS показан на рис. 3.

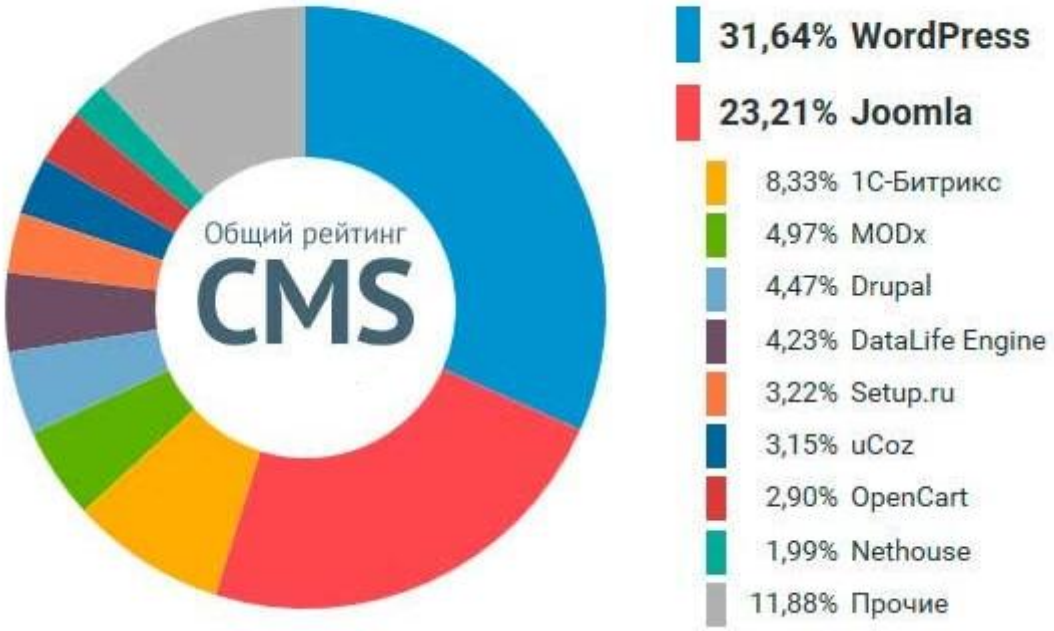


Рис. 3. Общий рейтинг популярностиCMS

4. Кэширование. Является одним из основных средств для увеличения серверной скорости. Это некий промежуточный буфер, в котором хранятся данные. Благодаря кэшированию страница сайта не воссоздается заново для каждого пользователя. Это позволяет сэкономить огромное количество времени на загрузку и ресурсы сервера. Правильно настроив кэширование на сервере, можно получить эффективное средство ускорения скорости загрузки страницы.

5. СокращениеHTTP-запросов. Простой и главное абсолютно не затратный способ увеличения скорости загрузки web-страницы, это сокращение числа http-запросов. Сокращение достигается путем объединения CSS или JS файлов (если это возможно), созданием CSS-спрайтов.

Клиентская часть включает в себя все что происходит в браузере пользователя. Это усложняет контроль, поскольку используется множество различных устройств и браузеров, и возникает множество разных направлений оптимизации. Рассмотрим основные и действенные факторы, влияющие на скорость загрузки страницы.

1. Критический путь рендеринга (criticalrenderingpath)– набор ресурсов для начала отрисовки страницы в браузере. Как правило, в список входят HTML-документ, файлы CSS-стилей, веб-шрифты и JS-код. Задача оптимизаторов максимально сократить этот путь как по времени, так и по трафику. Один из способов – расположение JS-кода в конце HTML-документа.

2. Загрузка изображений. В современных сайтах, изображения составляют большинство веса. Не являясь особо критичным ресурсом для страницы, напимер,CSS-стили и JS-код, они могут составлять важную часть контента: отображение товара в интернет-магазине. Для сокращения времени загрузки страницы необходимо оптимизировать изображения, преобразовав их в правильный формат и использовав различные инструменты сжатия. К примеру, формат PNG поддерживает прозрачность изображения, JPEG используется для фото и сложных изображений, SVG для векторной графики.

3. Загрузка веб-шрифтов.Сегодня веб-шрифты стали обязательным стандартом в дизайне. К сожалению, они отрицательно влияют на время загрузки страницы. Стоит учесть, что веб-шрифты необходимо получить до начала отрисовки текста в браузере. Ухудшает ситуацию тот факт, что указатели на шрифты содержатся в CSS-файле, либо разработчик пользуется публичными сервисами веб-шрифтов. Это вызывает дополнительные задержки. Для сокращения времени загрузки страницы, рекомендуют использовать современные форматы шрифтов (WOFF, WOFF2) и включать только те наборы символов, которые используются на сайте.

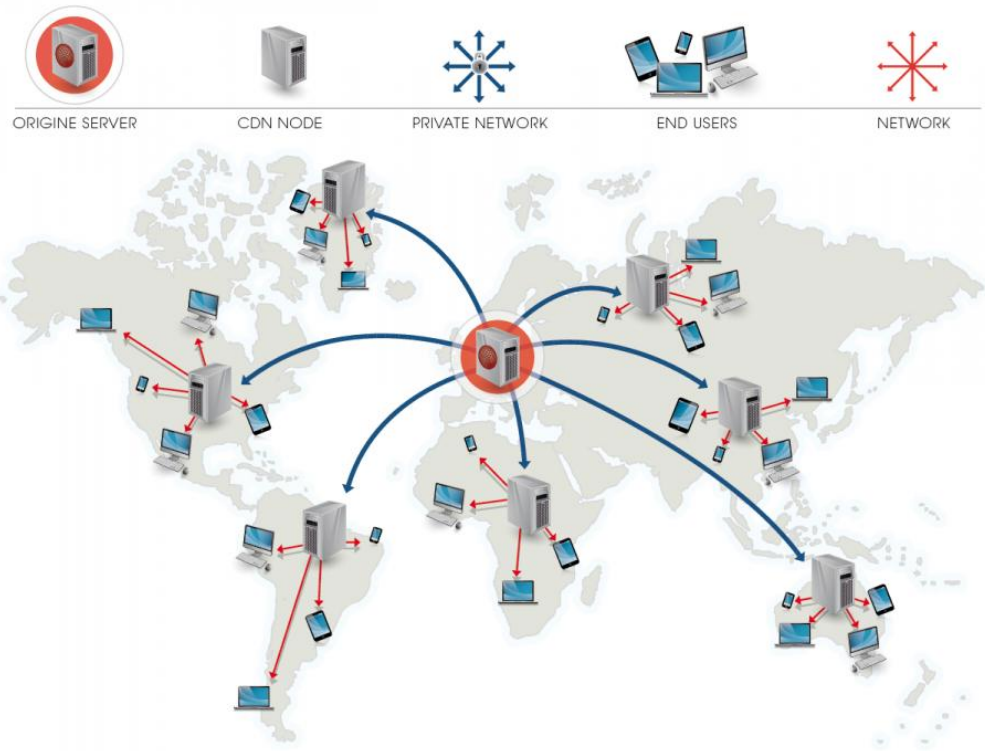


Рис. 4. Сети распределения/доставки контента (CDN)

4. Кэширующие заголовки. Наиболее простой и эффективный фактор, способный значительно сократить время загрузки веб-страницы. Он заключается в кэшировании браузером редкоизменяемых ресурсов: медиафайлов, CSS и JS-файлов, шрифтов. Также бывают ситуации, когда HTML-документ кэшируется целиком.

5. Сжатие данных. Сжатие любых текстовых данных при передаче от сервера браузеру позволяет в некоторой мере сократить время загрузки страницы. Преимущественно используется gzip-сжатия. Для достижения наилучшего эффекта степень сжатия должна быть близкой к максимальной. Также будет иметь место статическое сжатие, то есть предварительно сжать файлы и положить на диск, тогда веб-сервер будет искать сжатую версию и сразу её отдавать клиенту.

6. ИспользованиеCDN (ContentDeliveryNetwork,Сеть Доставки Контента)– это множество веб-серверов, разнесенных географически, для достижения максимальной скорости отдачи контента клиенту(рис. 4). Использование CDN позволяет пользователю подключиться к наиболее ближнему (по времени доступа) серверу сети и получить быстрый процесс установления TCP-соединения. Стоит отметить, что CDN имеет свои недостатки. Это сложная система, в которой возможны сбои и неполадки.

Выводы

В данной работе исследованы основные факторы, влияющие на скорость загрузки web-страниц. Приведены исследования мировых компаний, отображающие зависимости процента конверсии интернет-магазина от скорости загрузки страниц сайта. Рассмотрены факторы серверной и клиентской части, влияющие на скорость загрузки веб-страниц, приведены способы их оптимизации.

Библиографический список

1. GavaldaM. Abeginner’sguidetowebsitespeedoptimization – [Электронныйресурс] / Электроннаястатья – USA, 2018 – Режим доступа:https://kinsta.com/learn/page-speed, свободный
2. EvertsT.Mobilewebperformance: 23 statsyoushouldknowaboutmobilewebperformance – [Электронныйресурс] / Электроннаястатья – USA, 2015 – Режимдоступа:https://www.soasta.com/blog/23-stats-mobile-web-performance-monitoring, свободный
3. Супрун А. Прелоадер сайта своими руками – [Электронный ресурс] / Электронная статья – Россия, 2013 – Режим доступа: http://popel-studio.com/blog/article/preloader-saita-svoimi-rukami.html, свободный
4. TetzlaffJ. Speedupyourmobilewebsite – [Электронныйресурс] / Электронная статья – USA, 2013 –Режим доступа: https://jontetzlaff.com/blog/2013/03/17/speed-up-your-mobile-website, свободный
5. Мациевский Н. 11 способов ускорить загрузку страницы, чтобы сохранить посетителей сайта – [Электронный ресурс] / Электронная статья – Россия, 2016 – Режим доступа: http://www.cossa.ru/152/131556, свободный

M. D. Andreev, N. **E. Posobilov**

INVESTIGATION OF FACTORS INFLUENCING THE DOWNLOAD SPEED OF WEB PAGES

Nizhny Novgorod State Technical Universityn.a. R.E. Alekseev

In this paper, we studied the factors that affect the speed of loading web pages. The relevance of this problem was described, andwas researched of the world companies describing the dependence of the conversion of online stores on the time of loading of the web page of the site is given. The process of loading web pages is described, the components of the server and client parts that affect the speed of loading web pages are highlighted.

Key words: web-page, acceleration of site load, conversion of online stores.

УДК 004.89

О.П. Тимофеева, Д.Н. Бессонова

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ "УМНЫХ СВЕТОФОРОВ", ОСНОВАННОЙ НА НЕЙРОСЕТЕВОМ ПОДХОДЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается оценка эффективности применения «умных светофоров» для организации «зеленого коридора» на нескольких перекрестках. Для этого производится разработка двух моделей участка дорожной сети города Нижнего Новгорода (пять перекрестков по улице Белинского) с помощью программного инструмента имитационного моделирования AnyLogic. В первую модель внедряется разработанная нейронная сеть для управления светофорами, во второй применяется стандартный подход к светофорному регулированию. Собранная статистика анализируется и на основании ее делается вывод об эффективности системы.

Ключевые слова: среда имитационного моделирования AnyLogic, интеллектуальная система «умных светофоров», нейронная сеть, автомобильный трафик, «зеленый коридор», «зеленая волна».

Введение

Катастрофическая нехватка времени – глобальная проблема современного общества. В мегаполисах из-за быстрого темпа роста численности населения эта проблема стоит наиболее остро. Важной составляющей проблемы является трата времени на перемещение по городу. Так ежедневные переезды от одного места к другому, например, от работы до дома, или университета могут занимать несколько часов. В утренний и вечерний пик на дорогах образуются километровые пробки, в которых люди проводят значительное время, существенно ухудшая состояние своего здоровья. Проблема пробок сейчас решается методом «обходных путей» - строятся новые станции метро, новые дорожные развязки, дублеры и т.п. Но все это требует больших денежных вложений и времени на реализацию. В связи с этим была придумана система «умных светофоров», целью которой является оптимизация дорожной ситуации, реализованная на нейросетевом подходе к светофорному регулированию на основе данных о загруженности дороги.

В работе рассматривается анализ эффективности применения «умных светофоров» для организации «зеленого коридора» на перекрестках на примере участка дорожной сети города Нижнего Новгорода. Данный анализ осуществлен путем сравнения статистики, собранной с двух одинаковых дорожных моделей, с одинаковой транспортной нагрузкой, но с разными подходами к светофорному регулированию.

Постановка задачи

Для проверки работоспособности «зеленого коридора» в час пик, реализованного нейросетью, требуется выполнить комплекс задач:

- выбрать географическую область для исследования, где вопрос автомобильных пробок особенно актуален, и создать две модели выбранного участка дороги;
- для первой модели: разработать нейронную сеть, которая будет управлять светофорами на перекрестках, переключая сигналы, основываясь на данных о загруженности;
- для второй модели: внедрить стандартные светофоры, переключающиеся через заданные промежутки времени;
- произвести моделирование с одинаковой транспортной нагрузкой на обе модели;
- произвести сбор статистики с обеих моделей;
- осуществить анализ статистики и сделать выводы об эффективности применения системы «умных светофоров».

Создание модели и разработка нейронной сети

Для исследования была выбрана наиболее загруженная в час пик географическая область - участок дорожной сети города Нижнего Новгорода, состоящий из пяти идущих подряд перекрестков:

1) улица Белинского – улица Ашхабадская;
2) улица Белинского – улица Ошарская;
3) улица Белинского – улица Ванеева;
4) улица Белинского – улица Ижорская;
5) улица Белинского – улица Полтавская.

С помощью среды имитационного моделирования AnyLogic 7.3 [1] были реализованы две модели выбранного участка сети [2].

Для первой модели требовалось реализовать нейронную сеть для интеллектуального регулирования светофоров. Для этого к разработанным ранее типам перекрестков[3] были добавлены два новых:

1) пересечение улиц Полтавской и Белинского (рис.1) - Т-образный перекресток, состоящий из пересечения шестиполосной и четырехполосной дорог;
2) пересечение улиц Ашхабадской и Белинского (рис.2) - крестообразный перекресток, состоящий из пересечения шестиполосной и двухполосной дорог.

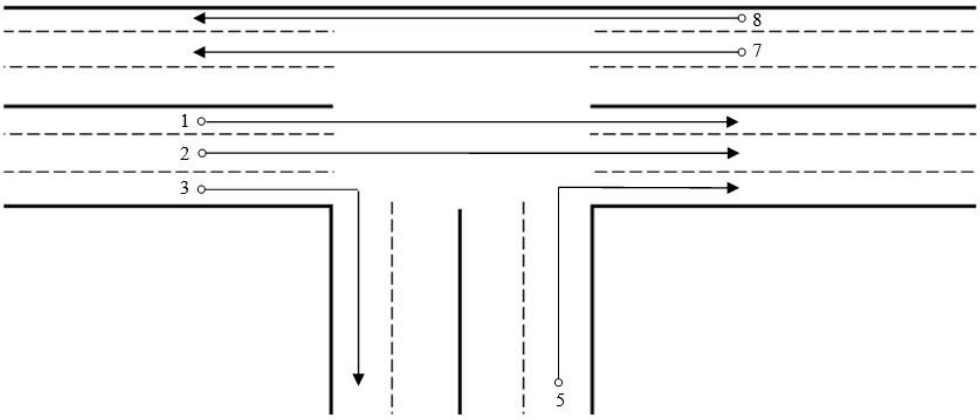


Рис. 1. – Первое безаварийное состояние перекрестка ул. Полтавская - ул. Белинского

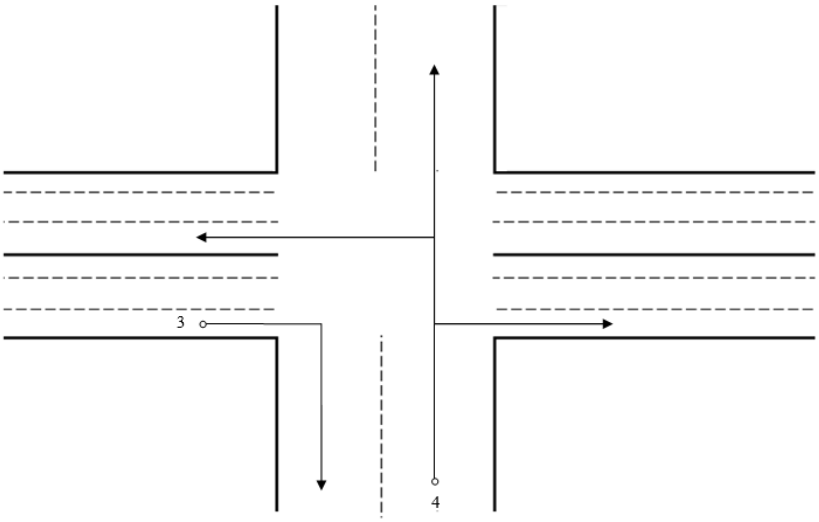


Рис. 2. – Первое безаварийное состояние перекрестка ул. Ашхабадская - ул. Белинского

Таблицы безаварийных состояний для двух новых перекрестков представлены ниже (табл.1, табл.2).

Таблица 1.

Безаварийные состояния для перекрестка ул. Полтавская - ул. Белинского

Светофоры / Состояния	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	0	1	0	1	1
2	0	0	1	0	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	0	1	1

Таблица 2.

Безаварийные состояния для перекрестка ул. Ашхабадская - ул. Белинского

Светофоры / Состояния	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1	0
4	1	0	0	0	1	0	0	0

Кроме того в нейронную сеть были внесены доработки, касающиеся обеспечения проезда небольшого количества машин, которые стоят на перекрестке более пяти минут (как правило с направлений второстепенных дорог).

Во вторую модель были внедрены стандартные светофоры, время переключения каждого их которых равно 60 секундам. Так же для того, чтобы светофоры не переключались в одно и то же время была реализована волнообразная рассинхронность («зеленая волна»), время которой составляет 30 секунд.

В результате работы для двух моделей был реализован участок дорожной сети, схема которого представлена на рис. 3.

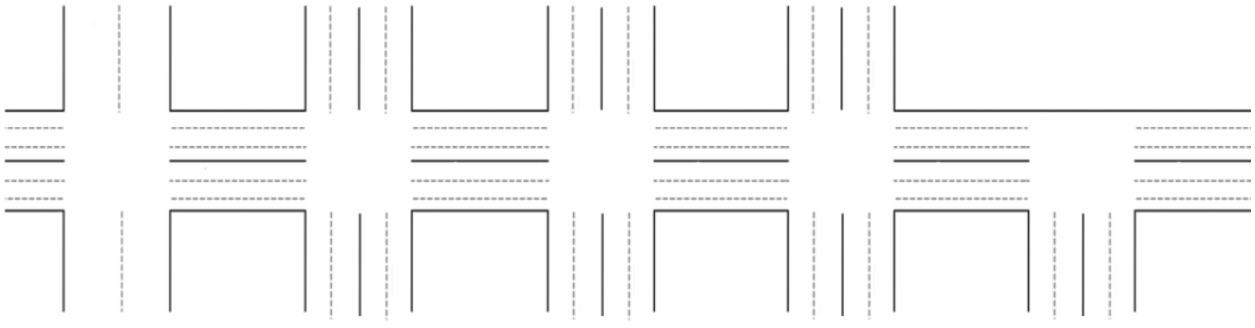


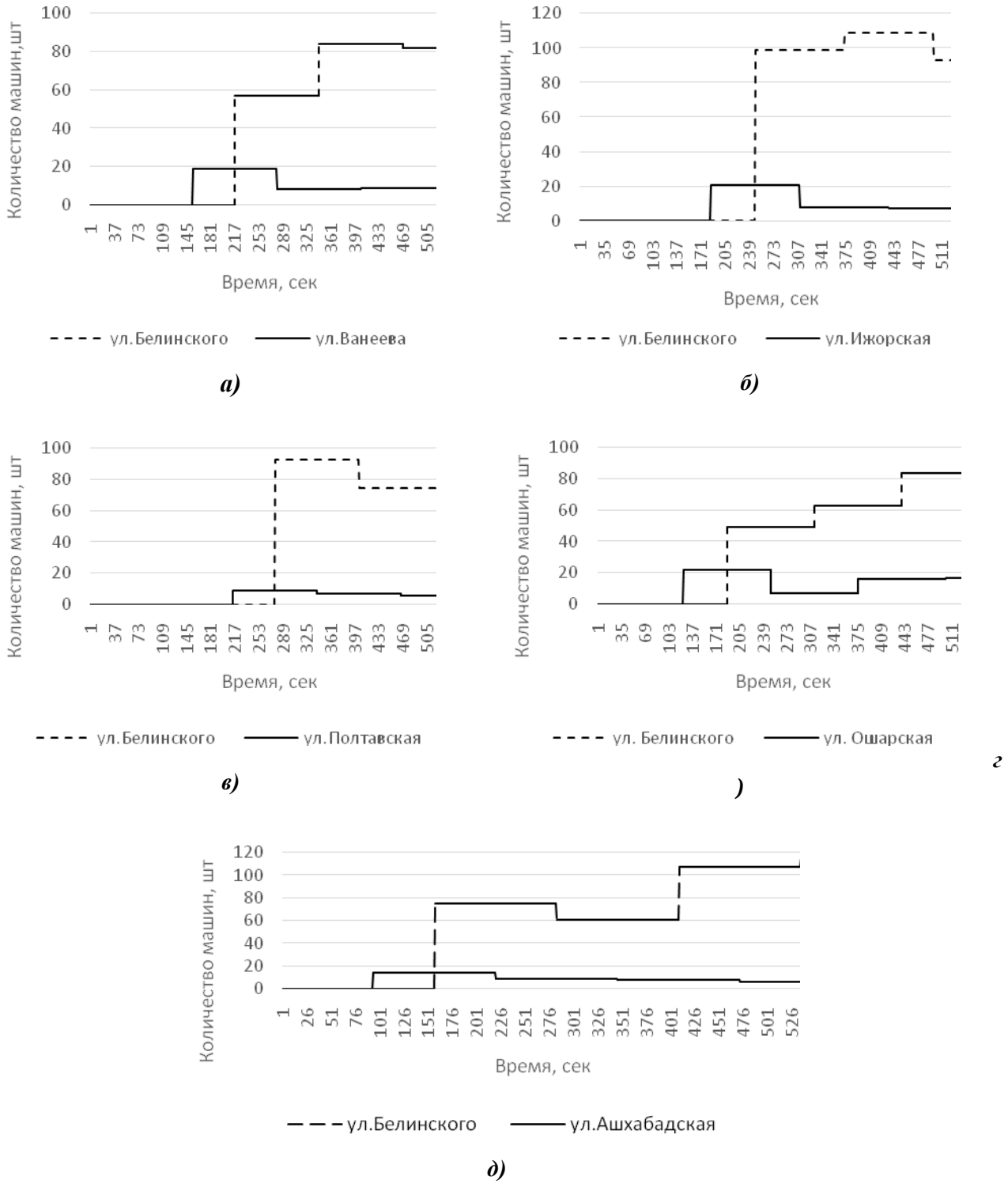
Рис. 3. – Схема модели участка дорожной сети

Сбор статистики с обеих моделей и ее анализ

Проведение эксперимента производилось следующим образом.

На обе модели машины запускались с одинаковой интенсивностью: по 5 машин в минуту на полосы дорог, пересекающих улицу Белинского (второстепенных), и по 15 машин в минуту на полосы дорог крайних перекрестков моделируемого участка улицы Белинского (главная дорога).

На рис. 4 приведены графики, отражающие статистику среднего количества автомобилей, стоящих на красный свет на рассматриваемых перекрестках ***при стандартном светофорном регулировании***.



а) *б)* *в)* *г)* *д)*

Рисунок 4. – График загруженности дорог при обычной регулировке.
***а* – ул. Белинского – ул. Ванеева; *б* – ул. Белинского – ул. Ижорская; *в* – ул. Белинского – ул. Полтавская; *г* – ул. Белинского – ул. Ошарская; *д* – ул. Белинского – ул. Ашхабадская.**

Из графиков (рис.4) видно, что к 9 минуте эксперимента количество машин, стоящих в пробках, достигло критической отметки в 100 машин. Таким образом, достаточно 9 минут, чтобы образовалась большая пробка. Очевидно, что ни о каком «зеленом коридоре» при обычной системе регулирования ни может быть и речи. Пробка нарастает стремительно, скапливающиеся машины не успевают уехать полностью, даже когда загорается зеленый сигнал светофора.

Далее эксперимент был повторен на перекрестках с нейросетевым регулированием. Графики, отражающие статистику, приведены на рис. 5.

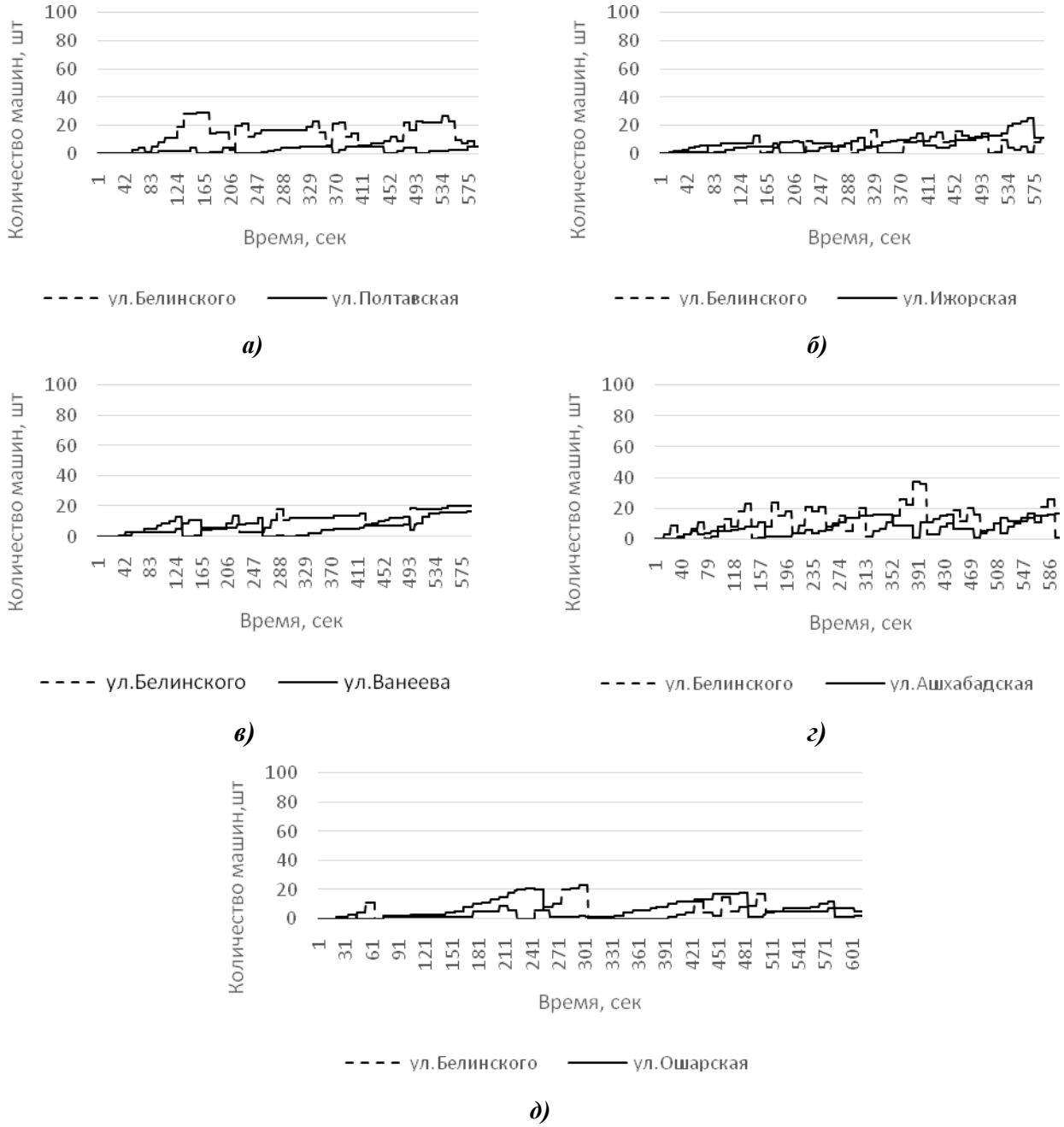


Рисунок 5. – График загруженности дорог при обычной регулировке.
***а* – ул. Белинского – ул. Полтавская; *б* – ул. Белинского – ул. Ижорская; *в* –ул. Белинского – ул. Ванеева; *г* – ул. Белинского – ул.Ашхабадская; *д* – ул. Белинского – ул. Ошарская.**

Из графиков (рис.5) видно, что в течение всего эксперимента количество машин на одном из перекрестков превосходило 30 машин всего один раз, что доказывает факт того, что при использовании системы «умных светофоров» машины не стоят в пробках.

Также можно заметить зависимость между переключениями светофоров: примерно в одни и те же моменты времени на разных графиках происходит синхронное увеличение или уменьшение количество автомобилей, стоящих на перекрестках. Это говорит о том, что при большой транспортной нагрузке на сеть светофоры работают синхронно, создавая «зеленый коридор» для высоконагруженных полос.

Выводы

Анализ статистики показал, что обычное регулирование не справляется с быстрорастущим транспортным потоком, что приводит к колоссальным пробкам в час пик. Совершенно иначе ведет себя нейросетевое регулирование, которое создает «зеленый коридор» для наиболее нагруженной дороги на всех пяти перекрестках, в результате чего пробка не образуется. Все вышеизложенное лишний раз доказывает высокую эффективность применения системы «умных светофоров» в регулировании транспортного потока.

Библиографический список

1. IlyaGrigoryev «AnyLogic 7 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling» [англ], Kindle Edition, December 8, 2014– 256 с.

2. Тимофеева О.П., Ермаков О.П. Туманова Д.Н. Модель системы «умных светофоров» на базе AnyLogic// материалы конференции «Будущее технической науки» - Н. Новгород, 2016. – С.115-116.

3. Тимофеева О.П., Малышева Е.М., Соколова Ю.В. Проектирование интеллектуальной системы управления светофорами на основе нейронной сети// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. [Электронный ресурс] – Режим доступа - www.science-education.ru/120-16496.

4. Тимофеева О.П., Ермаков О.П. Туманова Д.Н. Моделирование светофорного регулирования, основанного на нейронной сети, в среде AnyLogic// материалы конференции «Информационные системы и технологии» - Н. Новгород, 2017. – С.622-627.

O.P. Timofeeva, D.N. Bessonova

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF "SMART LIGHTOPHORES" BASED ON A NEUROET NETWORK APPROACH

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

In work assessment of efficiency of use of "smart traffic lights" for the organization of "green corridor" at several crossroads is considered. For this purpose development of two models of one section of a road system of the city of Nizhny Novgorod (five crossroads down the street of Belinsky) by means of the program instrument of imitating modeling AnyLogic is made. The developed neural network for control of traffic lights is integrated into the first model, in the second standard approach to traffic light regulation is applied. The collected statistics is analyzed and the conclusion about system effectiveness is drawn on the basis of it.

Keywords: AnyLogic simulation software, "smart traffic lights" system, neural network, car traffic, "green corridor", "green time".

УДК 004.9

М.А. Степаненко,Т.И. Балашова, В.И. Голованов, С.Н. Капранов, И.А. Грязнов

ЗАДАЧА РАЗДЕЛЕНИЯ ТОВАРОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ НА ДВЕ ПО КРИТЕРИЮ ЗАДАННОЙ ПРОПОРЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Данное направление исследований относится к детальному способу оптимизации системы товаропроводящей сети (ТПС). Статья посвящена решению задачи разделения ТПС на две по критерию заданной пропорции.

Ключевые слова: товаропроводящие сети, логистика, графы, цепочки поставок, разделение товаропроводящей сети.

SCM (Supply Chain Management – система управления цепочками поставок) представляет собой процесс организации, планирования, исполнения и контроля потоков сырья, материалов, незавершенного производства, готовой продукции, а также обеспечения эффективного и быстрого сервиса за счет получения оперативной информации о перемещениях товара. С помощью SCM решаются задачи планирования и управления процессами снабжения производства, складирования и доставки товаров до конечного потребителя.

Актуальность. В связи с нарастанием конкуренции, глобализацией и индивидуализацией рынков сбыта, ростом и образованием новых все расширяющихся сетей по созданию стоимости, логистика продолжает развиваться, превращаясь в стратегический ресурс, требующий от персонала компаний высокого уровня разнообразных и глубоких знаний. Для эффективного применения передовых концепций, методов и технологий логистики и SCM требуется обученный персонал, а также соответствующим образом выстроенная база логистических знаний компании. Высокие требования к уровню профессиональных знаний в области логистики и SCM, умению координировать работу смежных служб, интегрировать логистическую деятельность в пределах всей цепи поставок обусловливают необходимость формирования многоступенчатой корпоративной структуры подготовки и переподготовки логистов. Современные технологии управления поставками должны учитывать все нюансы товарооборота.

В данной работе рассматривается задача разделения ТПС на две по критерию заданной пропорции (узлы производства и потребления делятся в той же пропорции).

Товаропроводящая сеть представляет собой ориентированный граф G=(V,E), где V – множество вершин графа, представляющее собой потребителей продукции или поставщиков сырья, точки накопления, точки транзита, точки хранения и распределения продукции.

E – множество ребер, связывающих между собой вершины графа (соответствуют автомобильным, морским, воздушным, железнодорожным путям в структуре ТПС).

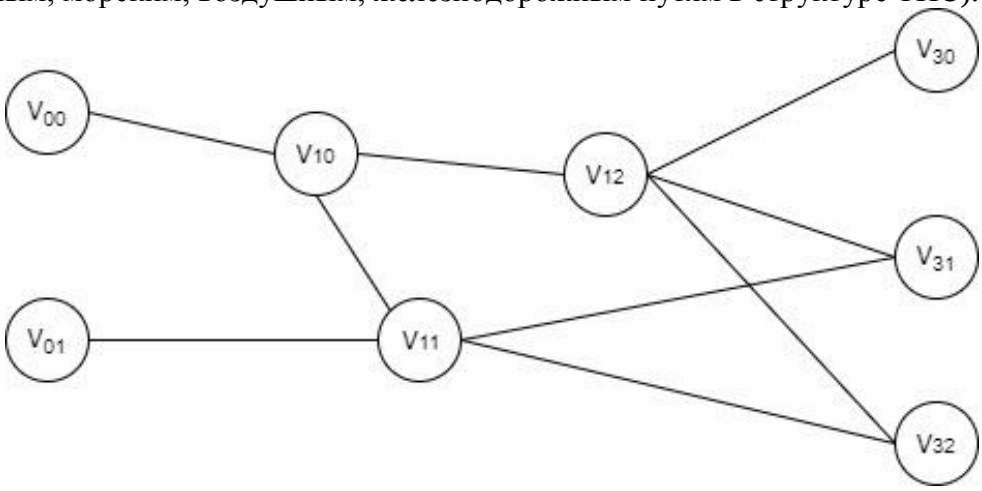


Рис.1 - ТПС с двумя точками производства, тремя складамии тремя пунктамипотребления

Для решения задачи разделения ТПС необходимо определить целевую функцию, ограничения, входные и выходные параметры. В качестве целевой функции использовалась функция оптимизации по критерию минимальной стоимости перевозки.

Исходными данными для задачи являются ориентированный граф G = (V, E)смножеством вершинV и множеством ребер E, стоимость перевозки Sединицы объёма товара , справочник контрактов C, объём поставляемой продукции по i-му контракту, взятый из справочника контрактов $C_{i,v}$, пропорция разделения ТПС $\frac{G_1}{G_2}$.

В качестве решения задачи получаем две ТПС.

Математическая постановка задачи:

$$S_{G_i} = C_{i,v} * S \quad (1)$$

$$S_{G_1} + S_{G_2} \to min \quad (2)$$

Ограничением для данной задачи является обеспечение в каждой ТПС точками производства, складов и потребления.

Для решения данной задачи используется метод перебора, с помощью которого находим все возможные варианты разделения ТПС и вычисляем стоимость всех путей для двух ТПС. Из полученных вариантов стоимости всех путей для двух ТПС выбираем минимальный.

В результате будут получены 2 ТПС, узлы производства и потребления, которых будут разделены в заданной пропорции, оптимальные по критерию минимальных затрат на транспортировку товара от узла производства до узла потребления.

Рассмотрим пример решения задачи.

В качестве исходного графа рассмотрим граф, представленный на рис. 1. Стоимость перевозки единицы объёма товара из пункта Vi в пункт Vj приведена в табл. 1. Справочник контрактов, содержащий объём товара, который нужно доставить из пункта Vi в пункт Vj, приведен в табл. 2. Зададим пропорцию разделения ТПС, как $\frac{G_1}{G_2} = \frac{2}{3}$ (узлы производства и потребления должны быть разделены в заданной пропорции).

Табл 1. Стоимость перевозки единицы объёма

	V_{00}	V_{01}	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{30}	V_{31}	V_{32}
V_{00}	-	-	**3**	-	-	-	-	-
V_{01}	-	-	-	**4**	-	-	-	-
V_{10}	**3**	-	-	**2**	**3**	-	-	-
V_{11}	-	**4**	**2**	-	-	-	**6**	**5**
V_{12}	-	-	**3**	-	-	**8**	**5**	**8**
V_{30}	-	-	-	-	**8**	-	-	-
V_{31}	-	-	-	**6**	**5**	-	-	-
V_{32}	-	-	-	**5**	**8**	-	-	-

Табл 2. Справочник контрактов

	V_i	V_j	$C_{i,v}$
C_1	V_{00}	V_{30}	**3**
C_2	V_{00}	V_{31}	**5**
C_3	V_{00}	V_{32}	**2**
C_4	V_{01}	V_{30}	**4**
C_5	V_{01}	V_{31}	**2**
C_6	V_{01}	V_{32}	**6**

Задача 1. Первый вариант разделения ТПС.

$G_1 \in V_{00}, V_{30}, V_{31}$

$G_2 \in V_{01}, V_{32}$

$\frac{G_1}{G_2} = \frac{2}{3}$

Найдем все возможные пути для G_1 и G_2

$$G_1: V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{30}$$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{31}$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{11} \to V_{31}$

$$G_2: V_{01} \to V_{11} \to V_{32}$$

$V_{01} \to V_{11} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{32}$

ГрафуG_1 будут принадлежать контракты C_1 и C_2, а графу G_2 будет принадлежать контракт C_6. Контракты C_3, C_4, C_5 будут расторгнуты.

Посчитаем стоимость каждого возможного пути, просуммируем стоимость всех путей для каждого графа G_1 и G_2.

$$G_1: V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{30} = 14 * 3 = 42$$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{31} = 9 * 5 = 45$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{11} \to V_{31} = 11 * 5 = 55$

$G_2: V_{01} \to V_{11} \to V_{32} = 9 * 6 = 54$

$V_{01} \to V_{11} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{32} = 17 * 6 = 102$

$S_{G_1} = 42 + 45 + 55 = 142$

$S_{G_2} = 54 + 102 = 156$

Суммируем стоимость графов G_1 и G_2

$S_{G_1} + S_{G_2} = 142 + 156 = 298$

Для Задачи 1 получаем стоимость перевозки 298 ед. и 2 ТПС представленные в виде графов G_1 и G_2 на рис. 2 и 3.

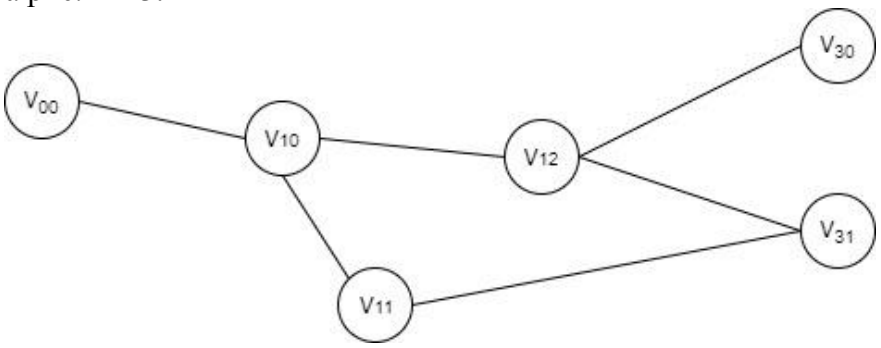


Рис 2. Полученный граф G_1

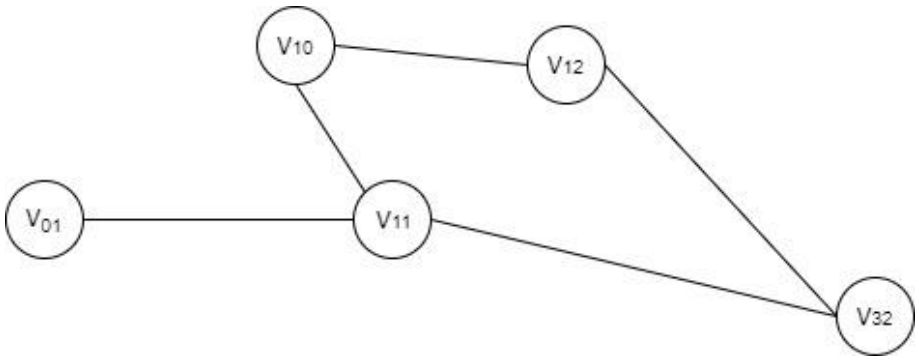


Рис 3. Полученный граф G_2

Задача 2.Второй вариант разделения ТПС.

$G_1 \in V_{00}, V_{30}, V_{32}$

$G_2 \in V_{01}, V_{31}$

$\frac{G_1}{G_2} = \frac{2}{3}$

Найдем все возможные пути для G_1 и G_2

$$G_1: V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{30}$$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{32}$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{11} \to V_{32}$

$$G_2: V_{01} \to V_{11} \to V_{31}$$

$V_{01} \to V_{11} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{31}$

Графу G_1 будут принадлежать контракты C_1 и C_3, а графу G_2 будет принадлежать контракт C_5. Контракты C_2, C_4, C_6 будут расторгнуты.

Посчитаем стоимость каждого возможного пути, суммируем стоимость всех путей для каждого графа G_1 и G_2.

$$G_1: V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{30} = 14 * 3 = 42$$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{32} = 14 * 2 = 28$

$V_{00} \to V_{10} \to V_{11} \to V_{32} = 10 * 2 = 20$

$G_2: V_{01} \to V_{11} \to V_{31} = 10 * 2 = 20$

$V_{01} \to V_{11} \to V_{10} \to V_{12} \to V_{31} = 14 * 2 = 28$

$S_{G_1} = 42 + 28 + 20 = 90$

$S_{G_2} = 20 + 28 = 48$

Суммируем стоимость графов G_1 и G_2

$S_{G_1} + S_{G_2} = 90 + 48 = 138$

Для Задачи 2 получаем стоимость перевозки 138 ед. и 2 ТПС представленные в виде графов G_1 и G_2 на рис. 4 и 5.

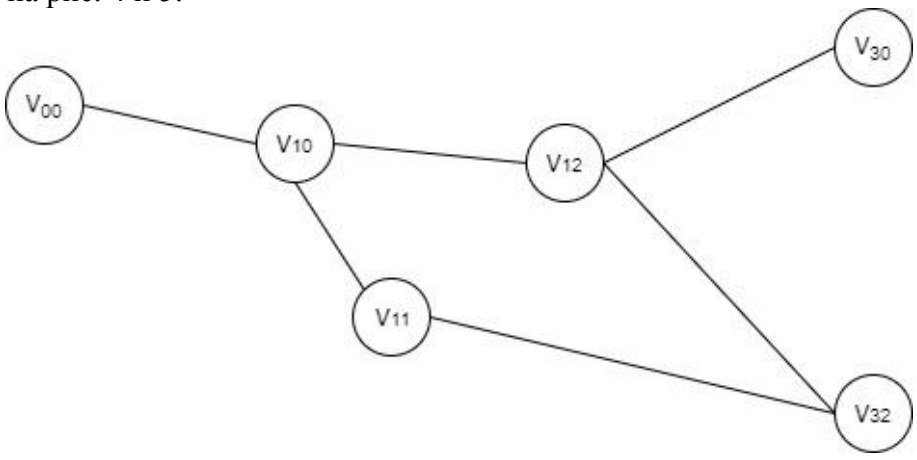


Рис 4. Полученный граф G_1

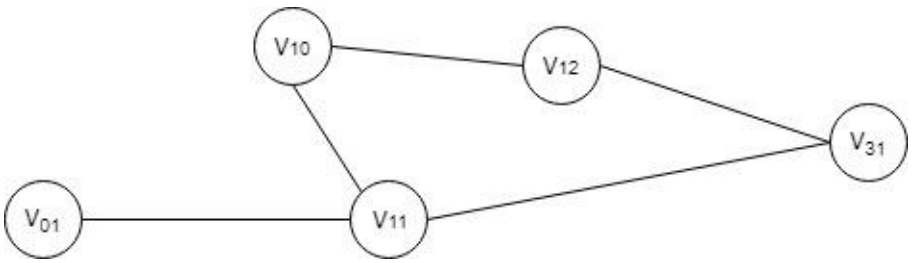


Рис 5. Полученный граф G_2

В итоге, мы получили два варианта разделения ТПС. Второй вариант предпочтительнее, поскольку требует меньших затрат, связанных с транспортировкойтовара от узла производства до узла потребления.

Для более эффективного решения представленной задачи в дальнейшем планируется рассмотреть следующие аспекты:

- возможность решения задачи разделения ТПС на 3 или более,
- возможность разделения ТПС по географическому расположению точек производства, складов и потребления,
- возможность решения задачи с помощью эволюционных алгоритмов.

Библиографический список

1. Бродецкий Г.Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности – М.: Academia, 2010. – 336 стр.
2. ЧебаковаЕ.О.,ПогуляеваИ.В.Логистика: учебное пособие для решения практических ситуаций по дисциплине «Логистика» – Омск: СибАДИ, 2009. – 96 с.
3. Тюхтина А.А. Модели управления запасами: Учебнометодическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. – 84 с.
4. Зайцев Е., Коромыслов А., Методология синтеза системы управления транспортно-логистическими системами / Логистика сегодня. – 2005.–140 с.

M.A. Stepanenko, T.I. Balashova,V.I. Golovanov,S. N. Kapranov, I. A. Griaznov

DIVIDING DISTRIBUTION NETWORK SYSTEMINTO TWO BY THE CRITERION OF PROPORTION

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

This line of research relates to a detailed method for optimizing the distribution network system. The article is devoted to solving the problem of dividing distribution network system into two by the criterion of proportion

Keywords: supply chain management, logistics, graphs, partition of supply chain networks.

УДК 004.021

О.П. Тимофеева, Е.С. Кадиленко, П.А. Домнина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОНВОЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Решение задачи конвоя путем определения приближенного пути для транспортных средств, движущихся за главным транспортным средством.
Методология / подход: Применение метода главных компонент.
Результаты: В результате тестирования получена предполагаемая траектория движения для транспортных средств, близкая к реальной.
Применение:Обеспечение совместного движения группы роботизированных транспортных средств друг за другом в тяжелых навигационных условиях.

Ключевые слова: задача конвоя, метод главных компонент, групповое взаимодействие, траектория движения, гиперплоскость, проекция, головное транспортное средство, аппроксимирующая прямая, центр облака.

Одним из важнейших направлений в развитии и освоении территории Российской Федерации является богатая природными ресурсами Арктическая зона, доступ к которой осложнен суровыми климатическими условиями. Для решения этой задачи экспедиции должны быть снабжены транспортными средствами для перевозки людей и грузов, оснащенными бортовой системой с функцией автопилотирования. Это позволит оперативно решать задачи мониторинга окружающей среды, а также проводить поисковые и исследовательские операции в экстремальных природно-климатических условиях, включая низкие температуры воздуха, наличие ледяного покрова и сильную скорость ветра. В данной работе описывается решение задачи конвоя - задачи определения траектории движения колонны, состоящей из транспортных средств.

Задача конвоя заключается в обеспечении совместного движения группы роботизированных транспортных средств друг за другом [1]. Группа включает в себя головное транспортное средство, управляемое водителем. Остальные транспортные средства, соблюдая безопасную дистанцию, повторяют траекторию движения головного транспортного средства. В задаче конвоя транспортные средства следуют друг за другом, получая координаты расположения движущегося впереди транспортного средства с помощью GPS-системы. В связи с этим ведомая машина получает координаты своей цели с некоторой погрешностью. Таким образом, необходимо построить траекторию движения ведомого транспортного средства по координатам, заданным с некоторой погрешностью E, стараясь максимально приблизить ее к реальной траектории головного транспортного средства.

Рассмотрим частный случай задачи конвоя, когда колонна состоит из двух транспортных средств. Главное транспортное средство задает некоторую траекторию движения. Следующему за ним транспортному средству необходимо повторить заданную траекторию. Задача осложняется тем, что координаты главного транспортного средства передаются с погрешностью и могут находиться в любой точке некоторой области, диаметр которой равен R. На рисунке 1 область изображена в виде окружности, заполненной множеством точек. С увеличением диаметра R предполагаемая траектория главного транспортного средства будет значительно отличаться от реальной траектории движения.

Так как GPS-система постоянно отправляет координаты головного транспортного средства с погрешностью, в процессе движения данных становится больше, часть из них перестает нести в себе важную информацию о перемещении, и информация становится излишней. Поэтому необходимо уменьшить размерность данных и представить облако точек в виде ломаной линии, по которой можно будет определить направление движения для ведомого транспортного средства и координаты целей, через которые оно должно проходить. Для этого предлагается использовать метод главных компонент.

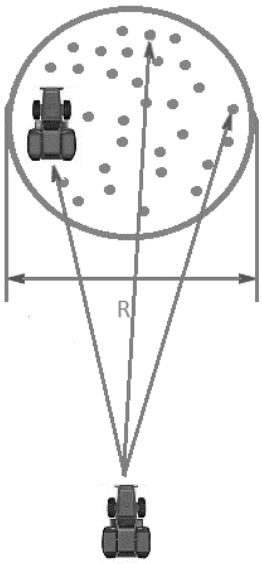


Рис. 1. Выбор траектории движения транспортного средства

Метод главных компонент – это способ, позволяющий уменьшить размерность данных и сводящий потерю информации к минимуму [2]. Метод применяется к прямоугольной матрице данных X размером $i \times j$. Строками в этой матрице являются образцы (индивиды), столбцами – переменные (признаки). Каждому образцу таблицы соответствует точка на плоскости с некоторыми координатами. Для получения первой главной компоненты проводится прямая через эти точки вдоль максимального изменения данных, затем все точки проецируются на полученную прямую. Прямая выбирается таким образом, что сумма квадратов отклонений (проекций) минимальна среди всех других прочих. Эти отклонения могут быть шумом, т.е. случайным набором величин, а могут нести в себе некоторую информацию. В таком случае снова ищется ось максимального изменения данных.

В случае обработки многомерных данных процесс выделения главных компонент происходит следующим образом:

1. Происходит поиск центра облака данных, в который переносится новое начало координат – это нулевая главная компонента.
2. Определяется направление максимального изменения данных – первая главная компонента.
3. Если данные описаны не полностью, выбирается новое направление (вторая главная компонента) для описания оставшегося изменения в данных и т.д.

Таким образом, происходит переход от большего количества данных к представлению их в меньшей размерности. Также есть возможность варьирования количества главных компонент.

Для задачи конвоя метод главных компонент используется как способ проекции данных на гиперплоскость [3]. Задача формулируется следующим образом. Дана выборка, которую нужно спроецировать на прямую. Чем меньше расстояние от компоненты выборки до прямой, тем меньше будет ошибка проецирования и тем больше информации будет сохранено. Идеальным случаем является ситуация, когда прямая проходит через все объекты выборки. Для рассматриваемой задачи в связи с большим количеством данных достижение идеального случая невозможно.

В общем случае, когда происходит обработка данных с несколькими признаками, выборка проецируется на гиперплоскость. Существует два способа задания гиперплоскости: с помощью вектора нормали и с помощью направляющих векторов. Пусть в исходном пространстве размерности D строится гиперплоскость размерности D-1, тогда если выбрать на этой плоскости D линейно независимых векторов, то они будут однозначно задавать эту гиперплоскость. Если составить из направляющих векторов матрицу W так, что каждый столбец этой матрицы – один

направляющий вектор, то проекция точки x_i на данную гиперплоскость вычисляется по формуле $W * x_i$. Для уменьшения ошибки проецирования на гиперплоскость нужно минимизировать следующее выражение:

$$\min_W \sum_{i=1}^{l} \|x_i - Wx_i\|^2$$

В результате применения метода главных компонент был разработан алгоритм решения задачи конвоя. Входными данными алгоритма являются следующие:

1. *Way* – путь, пройденный главным транспортным средством, представляющий собой облако точек.
2. *N*– количество точек, рассматриваемых в течение одной итерации алгоритма.
3. *E*– точность решения.

Для первых *N* точек пути определяется средняя точка, из которой начнет строиться траектория движения транспортного средства. Затем для текущего множества строится аппроксимирующая прямая. Далее выполняется итерационная часть:

1. В качестве текущего множества рассматриваются *N* точек из предыдущей итерации и следующие *N* точек.
2. Для выбранного множества точек вычисляются параметры аппроксимирующей прямой.
    a. Если отклонение прямой меньше заданной точности *E*, то строим продолжение данной прямой.
    b. Если отклонение прямой больше *E*, то определяется точка пересечения текущей и предыдущей прямой. Полученная точка добавляется к траектории движения.

Результат работы алгоритма представлен на рисунке 2.

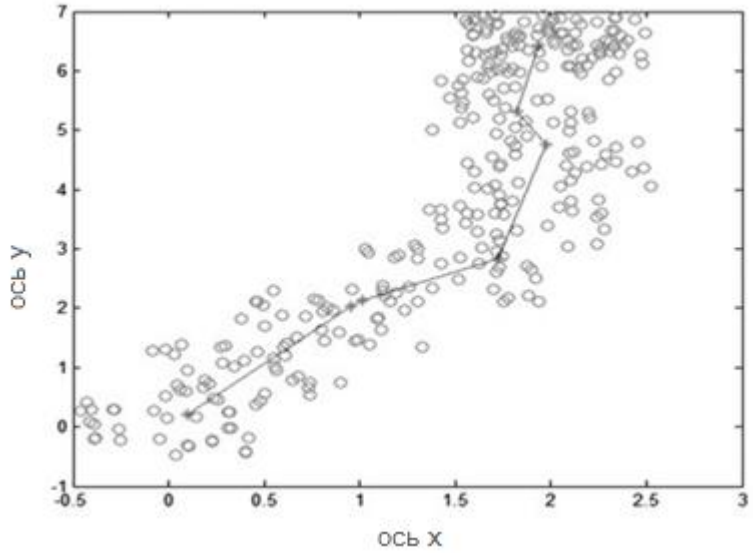


Рис. 2. Результат работы алгоритма

При генерации плавной траектории движения главного транспортного средства, с помощью данного алгоритма получается траектория, близкая к реальной (рис. 3).

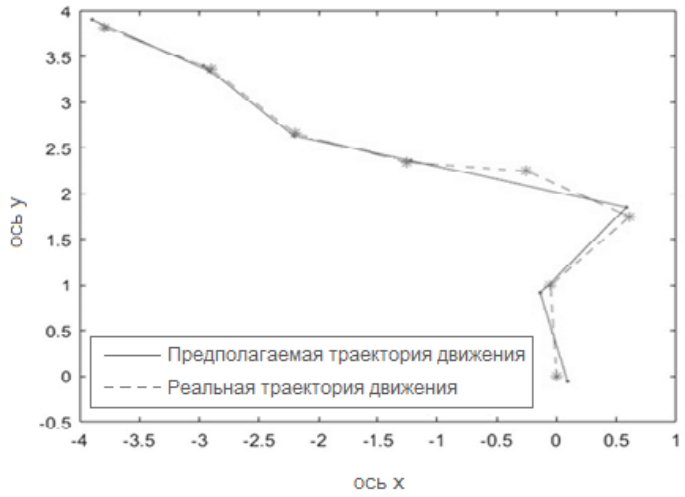


Рис. 3. Сравнение реальной и предполагаемой траектории движения транспортного средства

Было произведено сравнение реальной и предполагаемой траектории движения ведомого транспортного средства. Так как траектория движения транспортного средства, полученная в результате выполнения алгоритма, содержит меньшее количество точек, по сравнению с реальной траекторией, каждый путь был разделен на равные малые по величине отрезки. Затем было посчитано расстояние между каждой компонентой траекторий. На рисунках 4, 5 представлена погрешность вычисления полученных результатов по оси *x* и оси *y* соответственно.

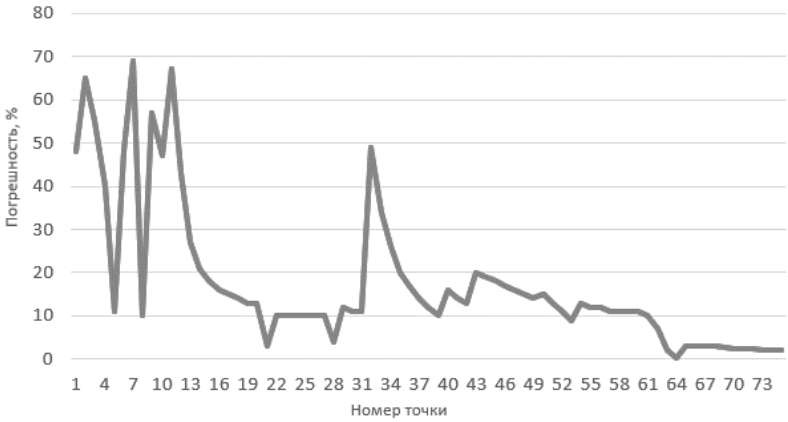


Рис. 4.Относительная погрешность вычисления по оси *x*

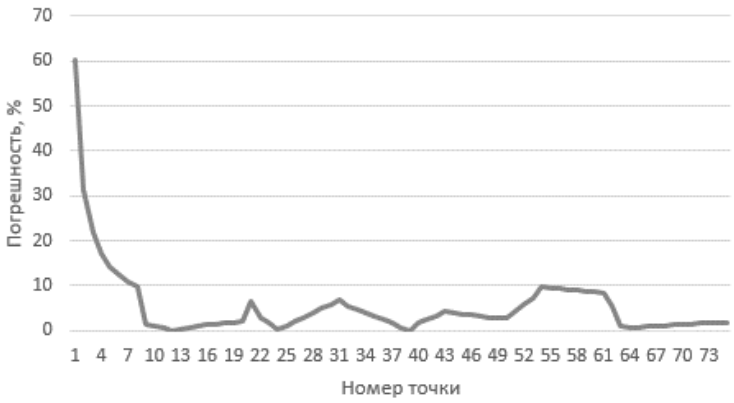


Рис. 5.Относительная погрешность вычисления по оси *y*

По графикам (рис.4, рис.5) видно, что в начале пути отклонение было достаточно большим, но постепенно разница между реальной и предполагаемой траекториями движения уменьшалась. Среднее значение погрешности по оси *x* составляет 17,5%, по оси *y* - 5,5%.

Таким образом в результате работы создан алгоритм для решения задачи конвоя с применением метода главных компонент. Разработанный алгоритм обладает достаточной точностью и позволяет получать траекторию движения, похожую по форме на траекторию движения головного транспортного средства, поэтому в случае возникновения препятствий, которые будет огибать головное транспортное средство, ведомая машина так же сможет объезжать их. В дальнейшем планируется перейти от частного случая задачи конвоя к общему, то есть провести тестирование данного алгоритма для группы, состоящей более чем из двух транспортных средств.

Библиографический список

1. Капустян С. Г., Усачев Л. Ж. Модель коллективного взаимодействия в задаче группового управления роботами в условиях противодействия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cyberleninka.ru/article/n/model-kollektivnogo-vzaimodeystviya-v-zadache-gruppovogo-upravleniya-robotami-v-usloviyah-protivodeystviya
2. Метод главных компонент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_главных_компонент
3. Анализ главных компонент (PrincipalComponentAnalysis, PCA) [Электронный ресурс] // Github: сайт. – URL: https://github.com/lanit-tercom-school/analyzeme/wiki/Анализ-главных-компонент-(Principal-Component-Analysis,-PCA)

O.P. Timofeeva, E.S. Kadilenko, P.A. Domnina

APPLICATION OF THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS IN THE SOLUTION OF THE CONVOY TASK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Solving the task of the convoy by defining an approximate route for vehicles moving behind the main vehicle.
Approach / methodology: Application of the principal component analysis
Findings: The estimated traffic trajectory for vehicles close to real as a result of testing
Implications: Ensuring the joint movement of a group of robotic vehicles one after another under severe navigation conditions.

Key words: the convoy task, the principal component analysis, group interaction, trajectory, hyperplane, projection, head vehicle, approximating the straight line, the center of the cloud.

УДК 004.021

С.Н. Капранов, А.И. Кочнев, А.Д. Сачков

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РАССТАНОВКИ ПАРКОВОЧНЫХ ЗОН В РАЙОНАХ ГОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДФРАКТАЛЬНЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация: в данной работе рассматриваются методы решения размещения парковочных зон с помощью предфрактальных графов. Проводится оптимизация размещения новых парковочных мест с помощью эвристических методов на основе предфрактально-графовой модели.

Ключевые слова: предфрактальный граф, методы размещения парковок, алгоритм сорняковой оптимизации, парковки

За последние десятилетия количество автомобилей в российских городах существенно увеличилось, при этом транспортные системы, которые обслуживают транспортные потоки не успевают расширяться с той же скоростью, что приводит не только к проблемам с заторами на дорогах и пробкам, но и к проблемам с паркингом автомобилей. Текущее количество парковок не удовлетворяет общему спросу на паркирование, особенно критична ситуация в центрах крупных городов, где преобладает большое количество узких однополосных дорог и офисных центров, куда стекается большое количество автомобилистов. Наиболее часто автомобилисты оставляют свои автомобили на крайне-правой полосе или на тротуаре рядом с дорогой, что приводит к затруднению движения всех остальных участников дорожно-транспортного движения. В связи с этим возникает необходимость создания методов решения, которые позволили бы произвести анализ существующих парковочных решений и на основе полученных данных сделать выводы о дальнейшей модернизации и проектировании новых парковочных зон для разгрузки движения в центрах городов.

В качестве объекта исследования будем рассматривать участок инфраструктуры города. В качестве математичекой модели будем использовать предфрактальный граф. представленного в виде предфрактального графа. С математической точки зрения предфрактальный граф – это объект, представляющий собой множество вершин V_L и множество рёбер E_L, в котором на каждом этапе замещения L, элементы множества V_L заменяются связной затравкой $H = (W, Q)$[1].Для полноты описания модели сделаем разделение вершин на три типа. V_1 – это вершины, представляющие собой перекрестки, V_2 – вершины, представляющие собой здания, V_3 – свободные зоны, E – множество пар вершин, называемых ребрами.

$$G_L \coloneqq ((V_1, V_2, V_3)_L, E_L) \quad (1)$$

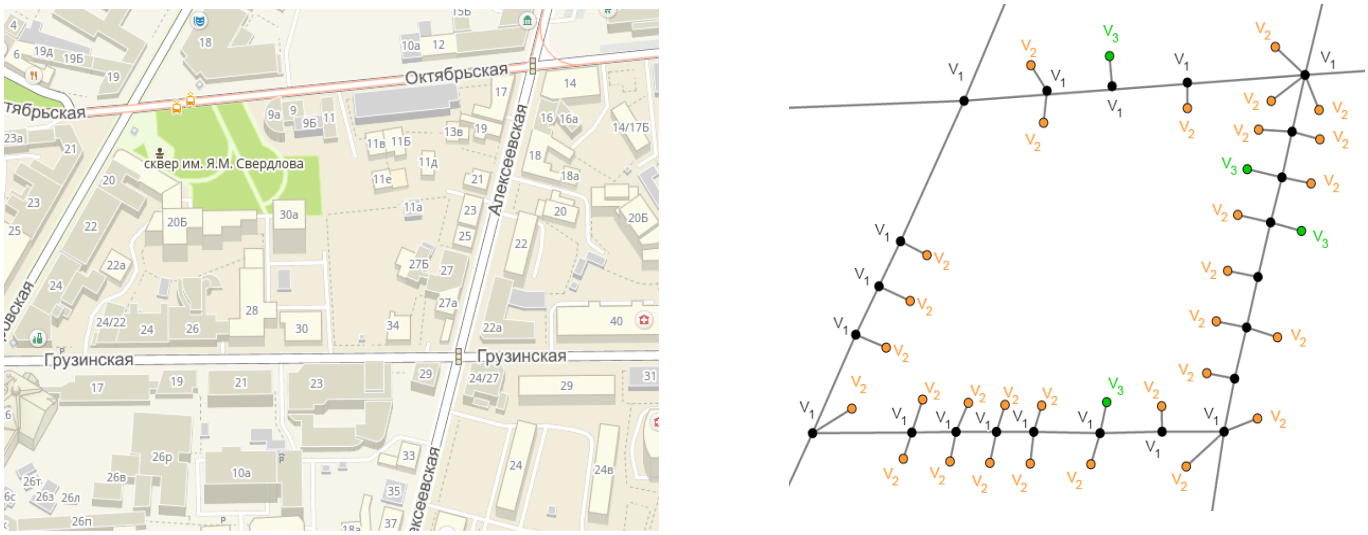
Вершины V_2 и V_3имеют ряд физических характеристик, без которых невозможны дальнейшие расчёты. У зданий (V_2), как у объектов, к которым стекаются определённое количество автомобилей есть среднее значение посещаемости в течении одного дня W_i. Это значение рассчитывается следующей формулой:

$$W_i = \frac{\sum_{i=0}^{24} S_i}{24} \quad , \quad (2)$$

где S_i–количество автомобилей приезжающих к зданию в течении одного часа. Для того, чтобы оценить привлекательность и рентабельность расположения парковочных мест предлагаетсяиспользовать следующую формулу:

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} \frac{W_j}{l_j}}{N} \quad , \quad (3)$$

где W_j – среднее значение посещаемости j-го здания в течении одного дня; l_j – расстояние от j-го здания до i-й парковки; N – количество зданий, которые может охватить данная парковка.



а) б)

Рис. 1. Представление участка города в виде предфрактального графа: а) участок города; б) представление города в виде графа

Свободные зоны (вершины V_3) имеют следующие характеристики:максимальная вместимость C_i, площадь A_i и конечная стоимость постройкиP_i.

Задачей моделирования данной модели является максимизации коэффициента привлекательности (3) и рентабельности новых парковочных зон, а также минимизация их затрат на строительство. Так как задача имеет конечное число допустимых решений, то задача является задачей дискретной оптимизации.

Математическая постановка будет выглядеть следующим образом:

$$max\ F(X,V) = F(X^*) = X^*, 0 < V < V_{max} \quad , \tag{4}$$

где X – множество вершин V_3; V–допустимое значение бюджета; X^*- оптимальное расположение парковок при заданном V.

Для решения подобного типа задачиможно использовать полный перебор и расчёт значений целевой функции всех вершин V_3, но данный способ не удобен при случае, когда мы рассматриваем большое множество значений вершин V_3 (например, целый район), так как увеличивается скорость и не точность нахождения решений. В следствие чего для реализации и моделирования предфрактального графа воспользуемся эвристическими методами. Следует отметить, что не все методы можно применить для решения поставленной задачи [2]. Учитывая заданные параметры можно выделить следующие эвристические методы: генетический алгоритм, муравьиный алгоритм и алгоритм сорняковый оптимизации.

Сорняковый алгоритм оптимизации вдохновлен таким общераспространенным явлением, как колонизация сельскохозяйственных угодий сорняками. Суть алгоритма заключается в следующем:

1) Распределение начальной популяции на области поиска. В начальную популяцию включаются парковочные места, созданные на свободных зонах.
2) Поиск предполагаемых новых парковочных зон в допустимом радиусе начальной популяции.
3) Повторение шага 2 до достижения максимума парковочных мест.

4) Расчёт значения fitness-функции для каждого элемента начальной популяции и предполагаемых мест.
5) Отбор наиболее приспособленных элементов.
6) Постройка новых парковочных зон, если их значение fitness-функции лучше, чем у элементов последней популяции.
7) Повтор шагов 2-6, пока не будет достигнут критерий окончания процесса.

Генетический алгоритм используется для решения задач моделирования сложных адаптируемых систем и оптимизации с использованием механизмов подобных естественному отбору. Основной принцип работы алгоритма в следующем:

1) Генерация начальной популяции из nхромосом, где популяция представляет собой парковки, построенные на свободных зонах.
2) Вычисление для каждой парковки её уровень пригодности.
3) Парковки с наихудшими значениями пригодности заносятся с битовую строку, то есть, они хранятся в виде множества варьируемых значений.
4) Проведение мутации на битовой строке. Получение новых потомков.Под мутацией будем подразумевать случайную замену старых значений множества (битовую строку) на новые свободные зоны.
5) Повтор шагов 2-4 пока не будет достигнут критерий окончания процесса.

Муравьиный алгоритм используется для решения как статических, так и для динамических комбинаторных задач оптимизационных задач. Идея заключается в моделировании поведения муравьёв, то есть способность находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи, адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. Реализация муравьиного алгоритма в следующем:

1) Создаём муравьёв, то есть создаём АТС, которые будут двигаться по дорожно-транспортной системе из точки А в точку В, которые при приближение к точке назначения начинают искать парковочную зону [3].
2) Генерируем начальную популяцию парковок на свободных зонах.
3) Рассчитываем значениеfitness-функции для каждой парковки, то есть показываем, как привлекательна данная парковка для АТС (муравья).
4) Повтор шагов 1-3, пока не будет достигнут критерий окончания процесса.

Таблица 1

Сравнительная таблица рассматриваемых эвристических методов

Метод	Достоинства	Недостатки
Генетический алгоритм	Хорошо работает при решении сложных проблем оптимизации	Сложность настройки параметров, медленная скорость работы
Сорняковый алгоритм	Относительно быстрая сходимость	Сложность настройки параметров
Муравьиный алгоритм	Меньше подвержен не оптимальным начальным решениям	Сходимость гарантируется, но время сходимости не определено

Из всех рассмотренных эвристических алгоритмов для моделирования предфрактального графа был выбран сорняковый алгоритм, так как он имеет наибыстрейшую сходимость, простоту реализации и приемлемые результаты работы.

В качестве примера возьмём участок дороги, предложенный на рис. 1б. Зададим ограничение на бюджет V = 100 000р., стоимость строительства P = 30 000 р. и максимальное кол-

во зданий для охвата $N = 5$. Расчёты проведём двумя способами: полным перебором и методом сорняковой оптимизации.

Как для полного перебора, так и для сорняковой оптимизации сделаем случайную генерацию значений W_i для элементов множества V_2. Расстояние от каждого дома до определённой парковки l_iявляется статичным и неизменяемым. Следует отметить, что при полном переборе происходит перебор всех возможных вариантов расположения парковок на свободных зонах, апри сорняковом алгоритме происходит случайное распределение парковочных зон с дальнейшим отбором в зависимости от значений fitness-функции.

Результаты расчётов следующие:

Полный перебор:

$F_1 = 2{,}019;\ F_2 = 6{,}733;\ F_3 = 6{,}662;\ F_4 = 8{,}133;$

Максимальная скорость сходимости: 400 итерации.

Сорняковая оптимизация:

$F_1 = 1{,}987;\ F_2 = 6{,}923;\ F_3 = 6{,}216;\ F_4 = 8{,}033;$

Максимальная скорость сходимости: 500 итераций.

В данном примере полный перебор является лучшим способом для решениязадачи. Но в случае, когда свободных зон и допустимый бюджетV значительно выше, то скорость поиска решения полным перебором не является допустимым.В таких задачах удобно использовать эвристические методы, хоть они и не всегда дают точного решения.

При моделировании размещения парковочных зон, как правило, не удается найти универсальное и единое решение, которое бы удовлетворяло всем параметрам и не выходило за пределы заданных ограничений. В данных ситуациях стоит идти на компромисс, и выбирать парковочные зоны, которые имели бы наибольшую рентабельность.С помощью выбранного эвристического метода – сорнякового алгоритма реализуется предфрактальная модель на выбранном участке городской инфраструктуры.

Библиографический список

1. Кочкаров А.А. Структурная динамика: Свойства и количественные характеристики предфрактальных графов: монография / А. А. Кочкаров. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 120с.

2. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. Журнал "Новые технологии", 2012, №7 – 30с.

3. Karel Dieussaert, Koen Aerts. SUSTAPARK: An agent-based Model for Simulating Parking Search. 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science, 2009. – 11 с.

S.N. Kapranov, A.I. Kochnev, A.D.Sachkov

THE APPLICATION OF HEURISTIC OPTIMIZATION METHODS FOR THE ARRANGEMENT OF PARKING AREAS IN THE CITY AREAS USING PREFRACTAL GRAPH MODELS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

This article we consider methods for solving the placement of parking zones with the aid of prefractal graphs. The optimization of the placement of new parking spaces is carried out using heuristic methods based on the prefractal-graph model.

Keywords: prefractal graph, methods for locating parking lots, algorithm for weed optimization, parking.

УДК 004.021

С.Н.Капранов, И.Е.Павлов, А.Д. Сачков

ПРИМЕНЕНИЕ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДФРАКТАЛЬНЫХ ГРАФОВ И МНОГОАГЕНТНЫХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной работе рассматриваются метод оптимизации дорожно-транспортных потоков. Этот метод основан на использовании свойств предфрактальных графов и многоагентных сетей. Рассматривается алгоритм поиска кратчайших путей потоками транспортных средств на дорожно-транспортных развязках, представленных в виде предфрактального графа.

Ключевые слова: предфрактальный граф, метод оптимизации потоков, алгоритм поиска кратчайших путей, эвристические алгоритмы, многоагентные сети

С каждым годом происходит увеличение участников дорожно-транспортного движения и соответственно количество личного и общественного транспорта. В большинстве городов нашей страны существующие дорожно-транспортные развязки устарели и их пропускная способность не рассчитана на то количество транспортного потока, который нарастает с каждым годом. Перепроектирование и физическое изменение существующих дорожных развязок в большинстве случаев не является возможным. По этим и другим причинам возникают затруднения в движении, возникают частичные отказы дорожной системы, вызванные заторами и полные отказы, которые полностью останавливают движение транспортных средств, что приводит к пробке. В связи с этим возникает необходимость создания модели, позволяющей провести анализ и оптимизацию движения транспортных средств надорожно-транспортных развязках.

В качестве объекта исследования будем рассматривать участок дорожно-транспортнойсистемы города Нижнего Новгорода. Формально данный объект можно представить в виде самоподобного графа большой размерности, называемого фрактальным (предфрактальным). (Рис.1) Фрактальный граф – это объект, который включает в себя характеристики и достоинства фракталов и графов.[2] Дорожно-транспортная сеть описывается в виде предфрактального графа $H(V, E)$, где V – множество вершин, E – множество дуг сети. Каждая дуга соответствует реальному участку дороги, а каждая вершина, представляет узел, разделяющий участки. Затравкой будем называть какой-либо связанный n-вершинный граф H = (V, E), с непомеченными (ненумерованными) вершинами v ∈ W.

Выделим два подмножества: $S \subseteq V$ – пункты откуда выезжает автотранспорт, $D \subseteq V$ – пункты куда въезжает транспорт. Множество всех потокообразующих пар представим в виде декартово произведения:

$$W = \{w = (i,j): i \in S,\ j \in D\} \quad (1)$$

Совокупность всех путей в сети H обозначим через P. Пусть X_p — это величина потока идущего по пути $p \in P$. Поэтому для каждой пары w потоки X_p, $p \in P_w$, должны принадлежать множеству:

$$X_\omega = \{x_p \geq 0 : p \in P_\omega, \sum_{p \in P_\omega} x_P = \rho_\omega\} \quad (2)$$

В данной работе проводится анализ дорожно-транспортных потоковс учетом следующих параметров: нагрузка, интенсивность, скорость и плотность потока. Под нагрузкой и интенсивностью потока будем понимать следующее: нагрузка – это количество транспортных средств, проходящих через заданную развязку в течение определённого интервала времени; нагрузка чаще всего выражается исходя из учета суточного периода, интенсивность – это

эквивалентный часовой темп, в котором транспортные средства пересекают заданную развязку в промежутке времени менее часа [1]. В контексте потока параметр скорости следует определить, как среднюю скорость проезда на заданной развязке. Плотность потока представляет собой количество транспортных средств, занимающих заданную длину дороги.Данные характеризующие движение потоков дают понимание о том,какие места дорожно-транспортных развязок являются наиболее критичными, уязвимыми и ненадежными.

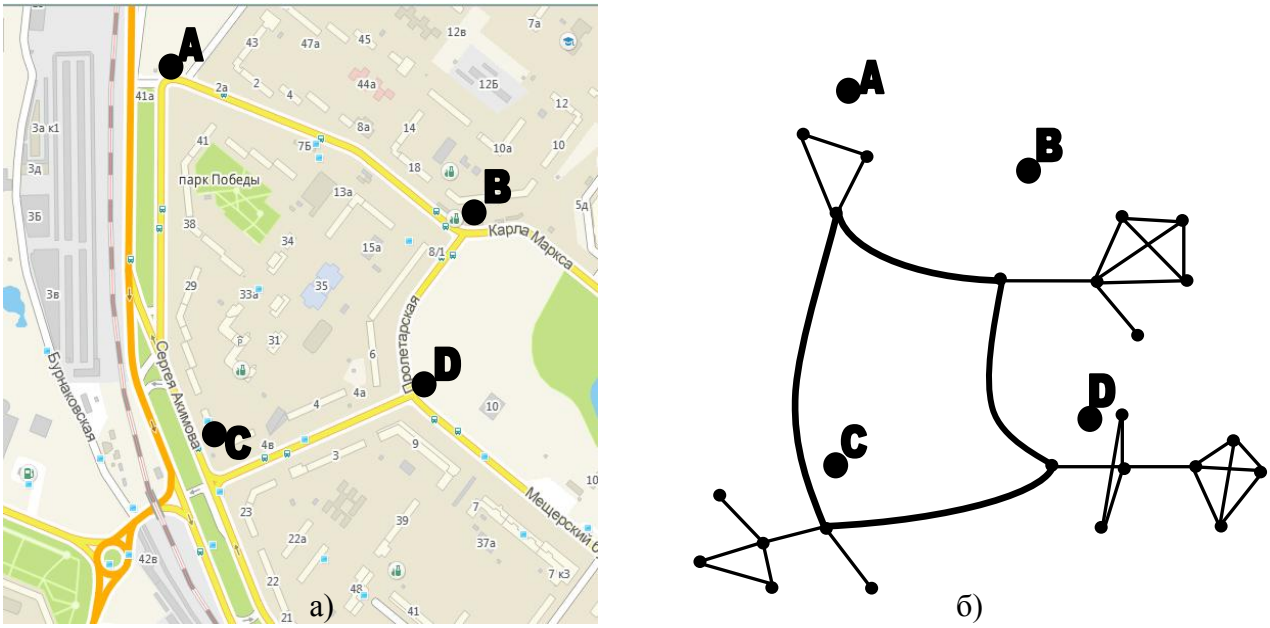


Рис 1. Представление участка дороги в виде предфрактального графа: а) участок города; б) представление участка города в виде графа.

В данной работе проводится анализ дорожно-транспортных потоковс учетом следующих параметров: нагрузка, интенсивность, скорость и плотность потока. Под нагрузкой и интенсивностью потока будем понимать следующее: нагрузка – это количество транспортных средств, проходящих через заданную развязку в течение определённого интервала времени; нагрузка чаще всего выражается исходя из учета суточного периода, интенсивность – это эквивалентный часовой темп, в котором транспортные средства пересекают заданную развязку в промежутке времени менее часа [1]. В контексте потока параметр скорости следует определить, как среднюю скорость проезда на заданной развязке. Плотность потока представляет собой количество транспортных средств, занимающих заданную длину дороги.Данные характеризующие движение потоков дают понимание о том,какие места дорожно-транспортных развязок являютсянаиболее критичными, уязвимыми и ненадежными.

Для оптимизации движения транспортных потоков будем использовать муравьиный алгоритм и многоагентные системы.[3]

Муравьиный алгоритм – моделирует многоагентную систему. У муравья (агента) нет общей картины действий, только его локальная обстановка. Суть – поиск кратчайшего (популярного) пути от А до В.

С математической точки зрения, в этом алгоритме выбором следующей вершины к посещению управляет случайная функция, которая определяет с большей вероятностью такую вершину j, в которой будет наибольшее значение функции $P_{i,j,k}$ (где i- вершина, в которой мы находимся,j – вершина, которую рассматриваем для посещения, а k – номер муравья).

$$P_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j}^{\alpha})(\omega_{i,j}^{\beta})}{\sum(\tau_{i,j}^{\alpha})(\omega_{i,j}^{\beta})} \quad , \qquad (3)$$

где $\tau_{i,j}$ – количество феромона на ребре i, j; α – параметр, контролирующий влияние количества феромонов; $\omega_{i,j}$ – привлекательность ребра i,j; β – параметр, контролирующий влияние привлекательности ребра.

Так же как и настоящий феромон, феромон в алгоритме должен «испаряться», чтобы не пропустить оптимальное решение. Для этого вводится коэффициент p в следующую итеративную формулу, применяемую после каждого обхода графа.

$$\tau_{i,j} = (1 - p)\tau_{i,j} \, , \qquad (4)$$

где $\tau_{i,j}$ – количество феромона на ребреi,j; p – скорость испарения феромона.

Многоагентные (мультиагентные) системы – это системы, состоящие из автономных интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом и пассивной среды, в которой агенты существуют и на которую они могут влиять. (Рис.2) [4].

В агенте используется муравьиный алгоритм, и с помощью данной реализации проводится обучение с подкреплением. Агент действует в среде (дорожно-транспортая система) и получает информацию об объектах, которые в ней находятся. Выделим основные характеристики интеллектуальных агентов:

1) Реактивность – своевременная реакция на изменения в среде.
2) Проактивность – проявление инициативы для достижения цели.
3) Социальные навыки – взаимодействие агентов друг с другом.

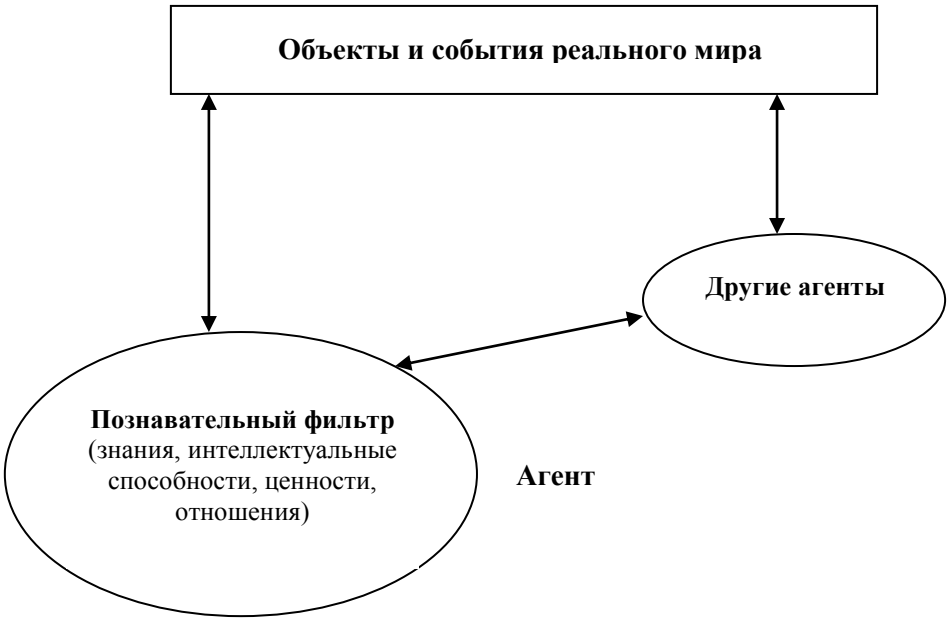


Рис 2. Интеллектуальный агент

Интеллектуальный агент – разумная особь, отслеживающая изменения в окружающей среде и действующая в ней, поведение агента всегда рационально, так как он способен к пониманию и его действия направлены на достижение поставленной цели.

В работе в качестве интеллектуальных агентов принимаютсятранспортные средства. Внешняя среда – дорожно-транспортная система, по которым двигаются транспортные средства.

На каждом шаге агент распознает текущее состояние движения общего потока $s_t \in S$ и выбирает действие $a_t \in A$. В последствие выборы агента возвращают ему поощрение $r_t = r(s_t, a_t)$и переносит его в новое состояние$r_{t+1} = \delta(s_t, a_t)$. Функции δ и r являются частью окружающей среды и не являются известными агенту. S – множество состояний агента; A–множество доступных действий агента; t – дискретный шаг по времени.

Задачей агента является нахождение оптимальной стратегии выбора следующего возможного действия, исходя из текущего состояния π: S→A. Оптимальную стратегию выбора будем рассчитывать по формуле:

$$V^{\pi}(S_t) = r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + .. = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^{i} r_{t+i} \qquad (5)$$

где, $0 \leq \gamma \leq 1$ – некоторая константа, позволяющая учитывать поощрение, полученное от внешней среды.

В данной работе разрабатываемое программное обеспечение и соответствующие вычисления, разрабатываются на основе анализа показателей действующей дорожно-транспортной обстановки, моделируется выбранный участок дорожной сети в виде предфрактального графа. На основе полученной модели применяется муравьиный алгоритм и многоагентные сети для оптимизации движения транспортных средств, с целью уменьшения нагруженности на определенные участки дорожной сети, на которых наблюдаются в определенные промежутки времени заторы.

Библиографический список

1. Лоскутов, А.Ю. Основы теории сложных систем / А.А. Лоскутков, А.С. Михайлов. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. – 620 с.
2. Кочкаров, А. А. Структурная динамика: Свойства и количественные характеристики предфрактальных графов: монография / А. А. Кочкаров. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 120с.
3. Рассел, Норвиг. Искусственный интеллект. Современный подход. 2-е изд. 2006год.
4. В.И. Городецкий. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации. Известия РАН "Теория и системы управления", 2012, № 2, с. 92–120.

S.N.Kapranov, I.E.Pavlov, A.D.Sachkov

APPLICATION OF THE ANT ALGORITHM TO OPTIMIZE ROAD AND TRANSPORT FLOWS USING PREFRACTAL GRAPHS AND MULTI-AGENT NETWORKS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

This articlepresentsa method for optimizing road and transport flows is considered. This method is based on the use of the properties of prefractal graphs and multi-agent networks. An algorithm for searching for shortest paths by traffic flows at road junctions, represented as a prefractal graph, is considered.

Keywords: prefractal graph, flow optimization method, shortest path search algorithm, heuristic algorithms, multi-agent networks

УДК 629.054

О.Н. Корелин, Д.А. Кобляков, К.А. Белов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ADAS “ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОЗРАЧНЫЕ СТОЙКИ”

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной работе рассмотрены подходы к реализации систем расширения зоны видимости для водителя автомобиля. Такие системы являются составной частьюADASсистем.

Ключевые слова:системы ADAS, расширение зоны видимости, система “прозрачные стойки”, использование одноплатных компьютеров, интерфейсы камер и дисплеев.

Работа посвящена системам помощи водителю автомобиляADAS.

Одной из задач таких систем является расширение зоны видимости водителя автомобиля. В настоящее время проблема слепых зон актуальна и не существует каких-либо стандартных решений. Ведущие автопроизводители, на серийно выпускаемых автомобилях, решают данную проблему лишь частично, устанавливая камеру заднего вида и тем самым избавляясь от задней слепой зоны. Комплексное решение проблемы, покрывающее все слепые зоны, не выходит за пределы концептов представленных на выставках и рекламных видеороликов. Возможным решением проблемы слепых зон в передней части автомобиля является система «прозрачных стоек ветрового стекла» и замена зеркал заднего вида.

Эту задачу предлагается решать с помощью дополнительных видеокамер высокого разрешения и двух дисплеев, размещённых в стойках ветрового стекла.

Промежуточным звеном между камерой и дисплеем является одноплатный компьютер (ОК). Он осуществляет приём видео-потока с видеокамеры, обработку и отображение необходимой информации на дисплее.

Данное решение позволяет получить видеоизображение с минимальными задержками для картины, наиболее приближённой к реальности(т.н. realtime режим).

Второй задачей, которая решается с использованием комбинации камера-одноплатный компьютер-дисплей является отображение различной информации поверх realtimeкартинки. Любая ADASсистема, как правило, решает следующие задачи: определение препятствия или пешеходаперед автомобилем, распознавание дорожных знаков, сход с полосы движения и т.д.Проблема в том, что на сколько бы скоростным не был процессор центрального компьютера (ЦК), определяющий ситуацию на дороге,он не в состоянии одновременно и отображать и оценивать дорожную ситуацию. Центральный компьютер связан с одноплатным компьютером, по одному из последовательных интерфейсов для передачи информации отображаемой на дисплеях. Блок схема такой системы представлена на Рис.1.

Существует большой выбор видеокамер высокого разрешения с различными интерфейсами. Проводилась оценка и сравнение различных решений. Основное требование к разрешению камер HD720 или FullHD1080 и частота кадров 30 к/сек.

Интересное решение предлагает фирма TexasInstruments (www.ti.com). На стороне камеры расположен так называемый сериалайзер (Serializer), который преобразует интерфейс камеры в последовательный интерфейсFPD-Link III. На противоположной стороне расположен десириалаёзер (Deserializer), к выводам которого, подключается LCDдисплей. Достоинством этого решения является возможность передачи видео в пределах автомобиля. К недостаткам можно отнести невозможность обработки и внесение изменений в отображаемую картинку.

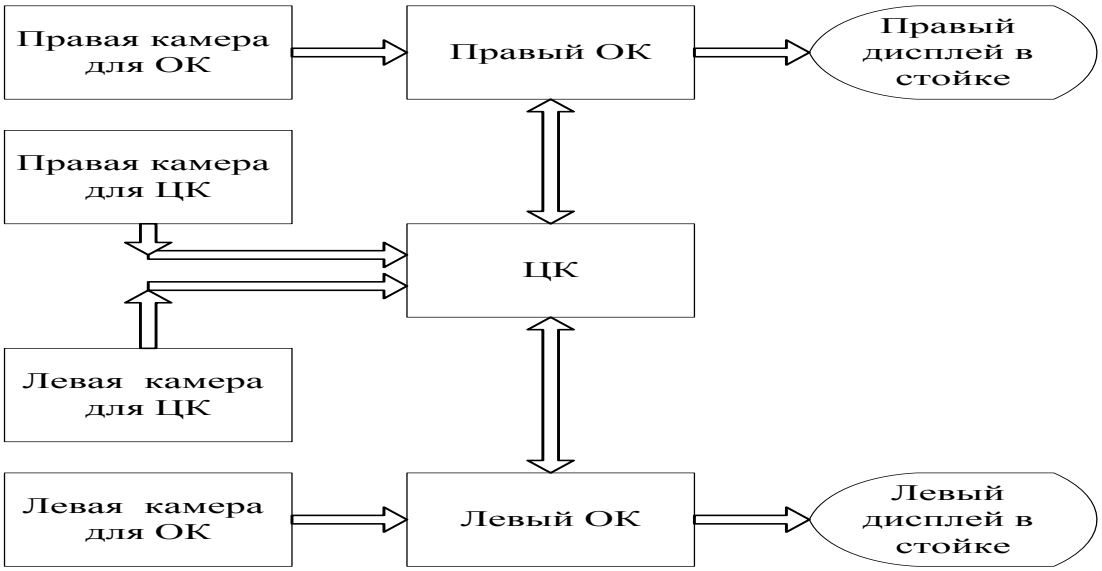


Рис.1-Блок-схема системы “Интеллектуальные прозрачные стойки”

Другое решение предполагает использование портативных камер с интерфейсом AHD (AnalogHighDefinition) или аналог HD-TVI (HighDefinitionTransportVideoInterface).По качеству картинки эти камеры не уступают IPкамерам, но значительно дешевле. Камеры такого типа получили широкое распространение в системах безопасности. Преимущество их в возможности передачи видео в виде низкочастотного сигнала по коаксиальному кабелю на расстояние до 500м. Это расширенный телевизионный формат, который позволяет передавать изображение с HD(720) и FullHD(1080) разрешением. При стандартном использовании сигнал оцифровывается либо в плате видеозахвата, установленной в слоте ПК либо в видеорегистраторе системы наблюдения, что вносит значительные задержки и затормаживает процесс отображения. В доступной продаже удалось найти четырёх-канальную плату видеозахвата, но только для HDформата. Использование таких камер с однокристальным компьютером затруднительно в виду отсутствия соответствующего интерфейса для AHDкамер.

Камеры с интерфейсом SDI-TVI(SerialDigitalInterface) обладают всеми ранее перечисленными свойствами. Этот интерфейс предполагает передачу цифрового сигнала, что по сравнению с AHDтребует более высококачественного канала передачи данных т.к. передаётся более высокая частота.

Обзор камер показал, что перспективными являются Webкамеры с интерфейсом USB 3.0. Эти камеры позволяют получать разрешение до 4Кс частотой кадров до 60 к/сек. Примером такой камеры может быть LogitechBRIO. К сожалению далеко не все одноплатные компьютеры содержат интерфейс USB 3.0.

Наибольший интерес представляют камеры с интерфейсом CSI-2 (CameraSerialInterface). По этому интерфейсу работают большинство камер портативной электроники, современных смартфонов и планшетов. Поэтому выбор по разрешению матриц камер и объективов к ним практически неограничен. Из описания стандарта на CSI-2 известно, что это однонаправленный, дифференциальный последовательный интерфейс с сигналами данных и синхронизации. Физический уровень (PHY) интерфейсаописанвстандарте “MIPIAllianceSpecificationforD-PHY”(MIPI - Mobile Industry Processor Interface). Максимальная

частота 1.33гГц. Как правило шина содержит одну линию тактовой частоты и несколько каналов данных. Данные передаются одновременно по всем каналам. Вместе с каналами данных, стандарт включает низкочастотный последовательный интерфейс управления, совместимый с I2C (Inter-IntegratedCircuit).По этому управляющему интерфейсу передаётся набор команд, определённый конкретным производителем. Набор команд управляющего пакета может быть коротким 4-байта или длинным любой длины до 2^16.

Этот интерфейс интересен так же тем, что устроен аналогично интерфейсу DSI(DisplaySerialInterface), который предназначен для вывода картинки на LCDдисплей.

Оба этих интерфейсов (CSIиDSI) присутствуют на одноплатном компьютере RaspberryPi 3 ModelB. При использовании таких камер и дисплеев в других, более ранних, версиях одноплатных компьютеров необходимо использовать т.н. мосты- преобразователи (BridgeCSI – GPIO), которые преобразуют последовательный интерфейс в параллельный.GPIO (GeneralPurposeInputOutput) это набор ножек процессора предназначенных для ввода-вывода цифровой информации. Такие преобразователи выпускает фирма Lattice (latticesemi.com). Их работа основана на использовании FPGAнизкой интеграции.

Особый интерес представляет LatticeEmbeddedVisionKit. Это практически готовое конструктивное решение для задачи “прозрачные стойки”. Он состоит из трёх плат, которые представляют собой законченные функциональные модули. Первая плата содержит две 13-ти мегапиксельные камеры SonyIMX214, которые поддерживают видео 1080pc частотой кадров 60FPS. Вместе с этим на первой плате установлен преобразователь интерфейсов. Вторая плата содержит процессорный блок для обработки изображений и видеопотока. Третья плата предназначена для вывода картинки на дисплей с HDMIинтерфейсом.

Запуск теста на VisionKitпоказал очень хорошие результаты. Оценка задержки на отображение составила около 20 млсек. Недостаток такого подхода заключается в ограниченном наборе функций по обработке видеоданных и сложности отладки FPGA.

Таким образом,возможны различные подходы для поставленной задачи. Естественно, об оптимальноститого или иного решения можно будет судить при реализации его в полном объёме, что требует значительных временных затрат.

В настоящее время предложено и реализовано следующее решение (Рис.2). Используется хорошо известный одноплатный компьютер BeagleBoneBlack. На нём установлен процессор AM3359 (ti.com). Это ARMконтроллер Cortex-A8 с тактовой частотой 1гГц. На плате ОК находится 512Мбайт памяти DDR3, что вполне хватает для запуска простых приложений под управлением операционной системы.Источником видеоданных служит WebкамераLogitechC320высокого разрешения с интерфейсом USB 2.0. Изображение выводится на LCD7-дюймовый дисплей BBViewcLVDSинтерфейсом. Этот дисплей выпускается как стандартное расширение,конструктивно совместимое с ОК BeagleBoneBlacki имеет разрешение 480*700 пикселей.

Рис.2 Пример реализации системы “Интеллектуальные прозрачные стойки” с ОК BeagleBoneBlack

На одноплатном компьютере установлена Linuxоперационная системаAngstrom. Как правило, образ операционной системы располагается на SDкарте. В нашем случае операционная система была переписана во внутреннюю ПЗУ память на ОК.

Для эксперимента использовалась программа MPlayer – т.н. свободныймедиаплеер. Стандартная консольная версия медиаплеера не имеет графического интерфейса и всё управление осуществляется с клавиатуры. В таком режиме на LCDдисплее отображается воспроизводимое видео.

Библиографический список

1. Свободная энциклопедия википедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_Serial_Interface
2.Сайт фирмы TexasInstruments[Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ti.com
3.Сайт одноплатному компьютеру BeagleBoneBlack[Электронный ресурс] – Режим доступа: http://beagleboard.org

O.N. Korelin, D.A. Koblyakov K.A. Belov

DEVELOPMENT OF THE ADAS SYSTEM "INTELLIGENT TRANSPARENT STANDS"

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

In this article, approaches to the implementation of visibility expansion systems for the driver of a car are considered. Such systems are an integral part of ADAS systems.

Key words: ADAS system, visibility expansion, transparent racks system, use of single-board computers, camera and display interfaces.

УДК 004.934

А.В. Чапурин, О.Н. Корелин

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНОВАНИЯ РЕЧИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной работе рассмотрены основные методы и технологии распознавания речи, используемые в системах распознавания речи.

Ключевые слова: система распознавания речи; обработка сигнала;мел-кепстральные коэффициенты; границы слова; нейронная сеть; фрейм; спектр.

Возможность перевода человеческой речи в текст изучается с 50-ых годов XX века и тем не менее распознавание речи (speechrecognition)остаётся актуальной задачей.В современном мире человек окружен большим количеством цифровых устройств. Удобное взаимодействие с этими устройствами одно из перспективных направлений разработок. Решением этого вопроса можно считать создание системы по распознаванию речи. На сегодняшний день существует несколько основных подходов.

Процесс распознавания

Процесс решения задачи распознавания можно поделить на следующие этапы:

- ввод в систему распознаваемого сигнала (преобразование из аналоговой формы в цифровую);
- предварительная обработка сигнала;
    1. подавление шумов;
    2. выделение границ слова;
- поиск информативных признаков;
- выполнении классификации.

Ввод звука в систему осуществляется в режиме реального времени через звуковую карту или через файлы с форматом Wave Audio File Format(WAV), Учитывая, что частотный диапазон речевого сигнала находится в пределах от 20-30Гц до 5 кГц, выбираем частоту дискретизации больше 10кГц (11,025 Гц).

Простейшим и эффективным методом анализа является спектральный. Весь полезный сигнал разбивается на фреймы по 512 отсчётов и выполняется быстрое преобразование Фурье. В результате чего по каждому фрейму получаем 256 информативных спектральных составляющих.

Подавление шумов и нахождение границ слова

Важным этапом при создании системы распознавания речи является отделение речи от шума.Точное обнаружение начальных и конечных точек слова означает, что последующая обработка данных может быть сведена к минимуму. Все методы очистки сигнала основываются на аддитивной модели (1):

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (1)$$

гдеy(t)-исследуемый сигнал,x(t)-очищенный сигнал,n(t)-шум. Аддитивность-суммирование шума с «чистым» сигналом. Алгоритмы для очистки сигнала можно поделить на следующие:

- преобразования во временной области (линейный оптимальный фильтр Винера);
- преобразования в частотной области (методы спектрального вычитания).

Для нахождения границ слова во входящем сигнале можно использовать метод, предложенный Лоренсом Рабинерем и Марвином Самбуром в феврале 1975 года. Метод основывается на подсчёте значений кратковременной энергии и числа нулевых переходов. Параметры речевого сигнала, как правило, быстро меняются с течением времени, поэтом для подсчёта разбиваем речевой сигнал неперекрывающимися кадрами длиной 10–15 мс. Считаем,

что сигнал на таком отрезке примерно стационарен (постоянен). Кратковременная энергия речевого сигнала определяется формулой(2):

$$E_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 \quad (2)$$

где N –количество отчетов в кадре, S_i– значение i-го отсчета,m-номер кадра. Число переходов через ноль (мгновенная частота) речевого сигнала определяется следующей формулой(3).

$$Z_m = \frac{1}{2}\sum_{i=2}^{N} |\mathrm{sign}(S_i) - \mathrm{sign}(S_{i-1})|, \text{ где } \mathrm{sign}(s) = \begin{cases} 1, S \geq 0 \\ -1, S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Кратковременная энергия речевого сигнала и число переходов через ноль одновременно используются для удаления пауз из входного сигнала. При записи звука первые 100–150 мс речевого сигнала являются паузой. Тем самым у нас получается 10-15 кадров ,на основании которых мы высчитываем максимальное и минимальное значение энергии(4)(E_{max} и E_{min} соответственно)и среднее значение переходов через ноль(5).

$$E_{max} = \max(E_m), \quad E_{min} = \min(E_m), \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Z_m , \quad (5)$$

где m – количество первых кадров паузы.

На основании этих измерений вычисляются 3 порога:

- ITL (Lowerenergythreshold)-нижнийпорогэнергии (6);

$$ITL = \min(I_1 + I_2), \quad (6)$$

где$I_1 = 0{,}03 * (E_{max} - E_{min}) + E_{min}$,$I_2 = 4 * E_{min}$

- ITU (Upperenergythreshold)-верхнийпорогэнергии (7);

$$ITU = 2 * ITL \quad (7)$$

- IZCT (Zero crossings rate threshold)-числонулевыхпереходов(8).

$$IZCT = \mu \quad (8)$$

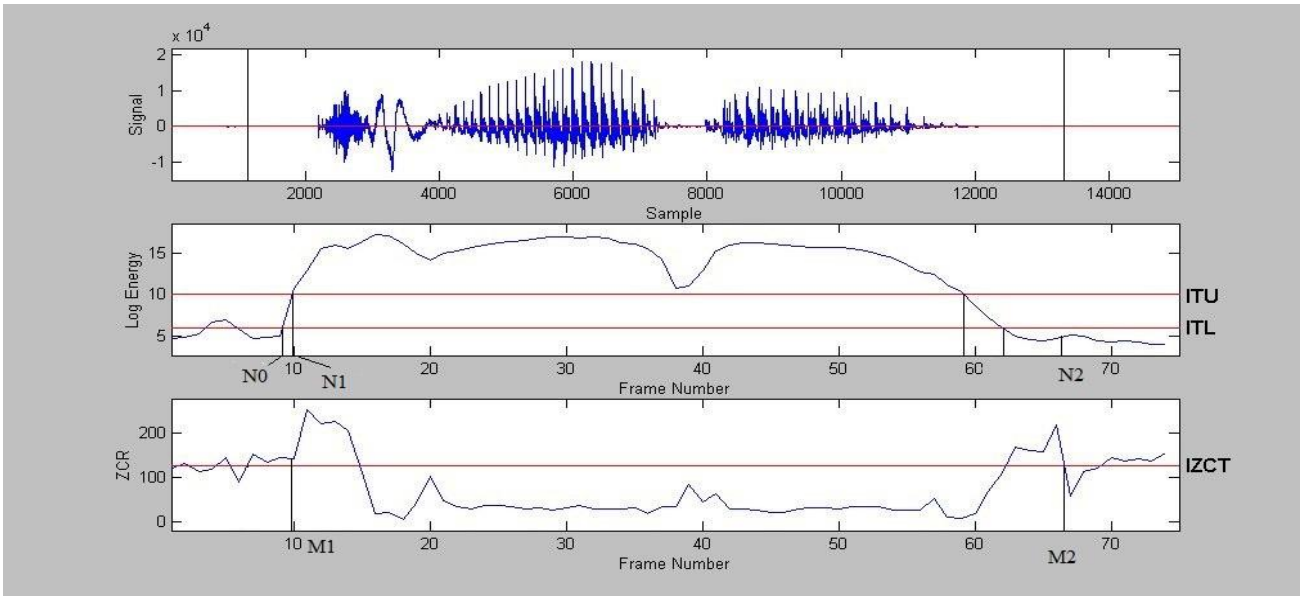


Рис 1. Нахождение границ слова

Далее определяется фрейм, на котором значениеэнергии превышает значение ITU (N1-на рис.1). Предполагаем, что начало и конец слова находятся вне этого фрейма. Для нахождения

начальной точки слова двигаемся в обратном направлении, до того момента, когда значение стало выше ITL (N0-на рис.1), а число нулевых переходов стало выше порогаIZCT (M1-на рис.1). Этот момент и считается предварительным началом слова. Аналогично рассчитывается и предполагаемый конец (N2-на рис.1).

Предполагаем, что границы слова расположены вне найденного промежутка (N0, N2). Выполняем вычисление кратковременной энергии и числа переходов через ноль всех кадров остального участка речевого сигнала. Если эти значения превышают пороги, то кадр соответствует паузе, необходимо удалить его из речевого сигнала. После определение начальной и конечной точки слова можно переходить на следующий этап распознавания.

Выделение информативных признаков

Для решения этой задачи существует множество методов, но их объединяет одна общая задача –поиск таких параметров, которые будут уникальными для каждого взятого слова. Накладывается дополнительное ограничение, что число признаков должно быть минимальным.

После выделения набора признаков можно определить, что за слово находилось в исходном сигнале. Основными методами являются скрытые Марковские модели, нейронные сети, временные динамические алгоритмы (Dynamic Time Warping).

Мел-кепстральные коэффициенты(MFCC)

Мел – единица высоты звука, основанная на восприятии этого звука нашими органами слуха. Высота звука зависит от его частоты по следующей формуле (9):

$$m = 1125 * \log_{10}\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (9)$$

где m-логарифмический масштаб нормальной шкалы частот f.

В настоящее время можно использовать множество разных математических моделей обработки сигналов. Для представления речевого сигнала и получения его амплитудного спектра в частотной области используют преобразование Фурье.

Полученный спектр нужно расположить на мел-шкале. Для этого мы используем окна, равномерно расположенные на мел-оси. На рис.2 изображен график в частотной шкале

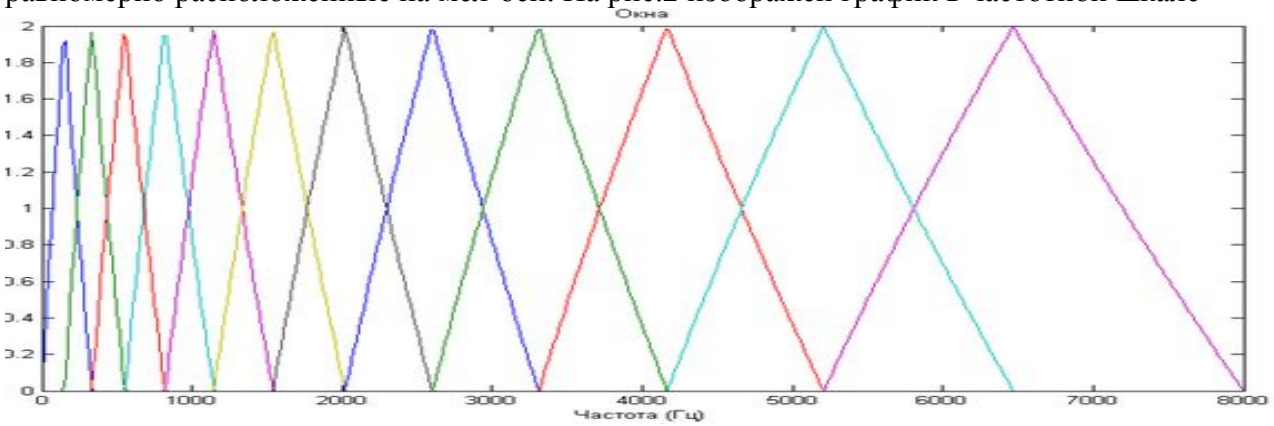


Рис.2 Банк фильтров в частотной шкале

MFCCвычисляются через дискретно-косинусное преобразование по формуле (10,11):

$$X_k = \alpha_k \sum_{n=0}^{N-1} (\log S_k) \cos\left[\frac{\pi}{N}\left(n + \frac{1}{2}\right)k\right], k = \overline{0, N-1} \quad (10)$$

$$\alpha_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, \text{при } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, \text{при } k \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

где S_k $(k = 1,2..N)$ -выходы из банка фильтров(логарифмирование квадрата каждой mel-частоты) ,N-количество образцов

Таким образом мы получаем последовательность коэффициентов следующего вида (рис.3). По полученным данным производится дальнейшая идентификация.

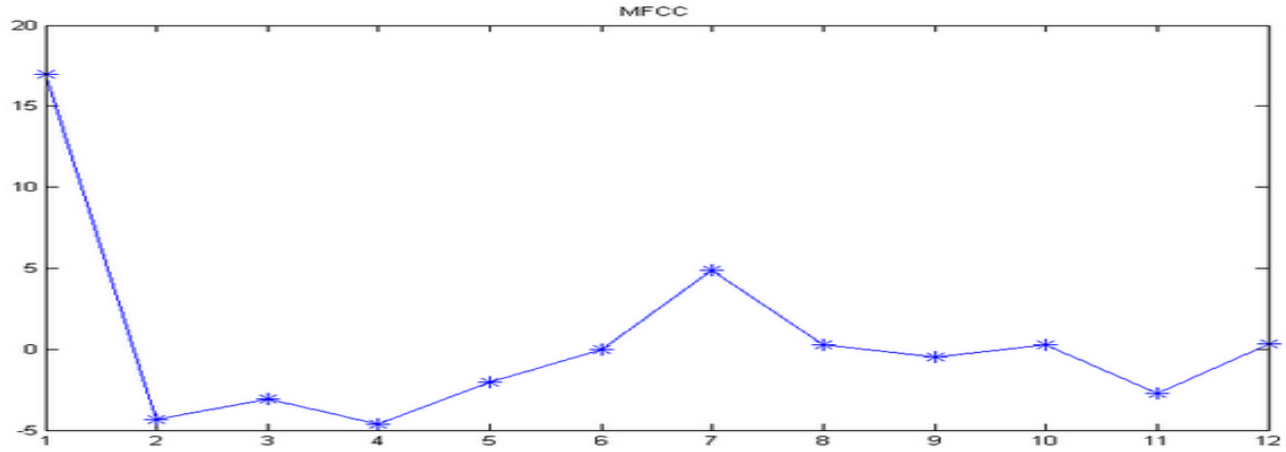


Рис.3 Мел-кепстральные коэффициенты

Выделение признаков для нейронной сети

Решение задачи классификация считается одним из важнейших применений нейросети. Универсальность нейросети позволяет выполнять эту задачу как при обучении с учителем, так и без учителя. Алгоритм обучения с учителем предполагает определение принадлежности объектов определенному классу. Если же обучение проводится без учителя,то сеть может объединить объекты по классам на основе их цифровых параметров.

Использование самообучающихся ИНС является более востребованным и перспективным. В качестве модели сети можно использовать самоорганизующуюся карту признаков Кохонена. Организуются нейронные ансамбли, которые формируются из множества входных сигналов. Общий процесс ввода и обработки звукового сигнала в нейронную сеть представлен на рис. 4.

На основании исследований можно сделать вывод, что информативность спектра в различных частях отличается. Чем ниже частотная область спектра, тем большее информации там содержится. Применение логарифмического сжатия (mel-сжатия) (рис.5) позволяет уменьшить количество входов нейронной сети, за счёт уменьшения количества элементов, которые получают информации из высокочастотной области.

После сжатия спектр подается на входы нейронной сети. Входом нейросети называется линейно упорядоченный массив элементов, которым присваиваются уровни соответствующих частот в спектре. Главной задачей входов является передача сигналов дальше в сеть.

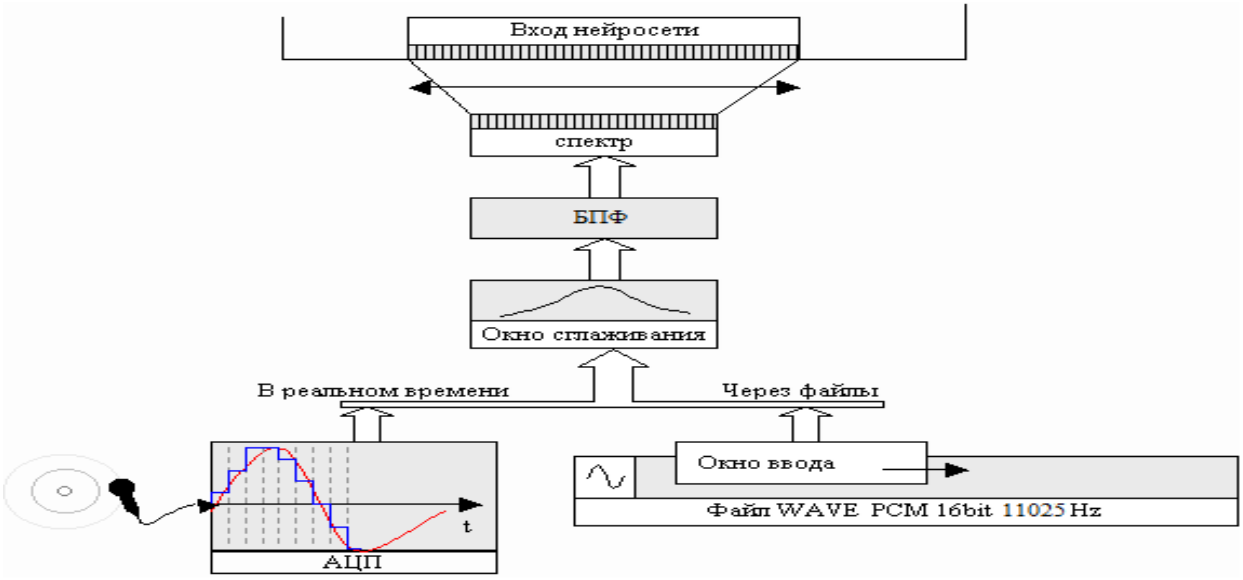


Рис 4. Процесс ввода и обработки звукового сигнала в нейроную сеть

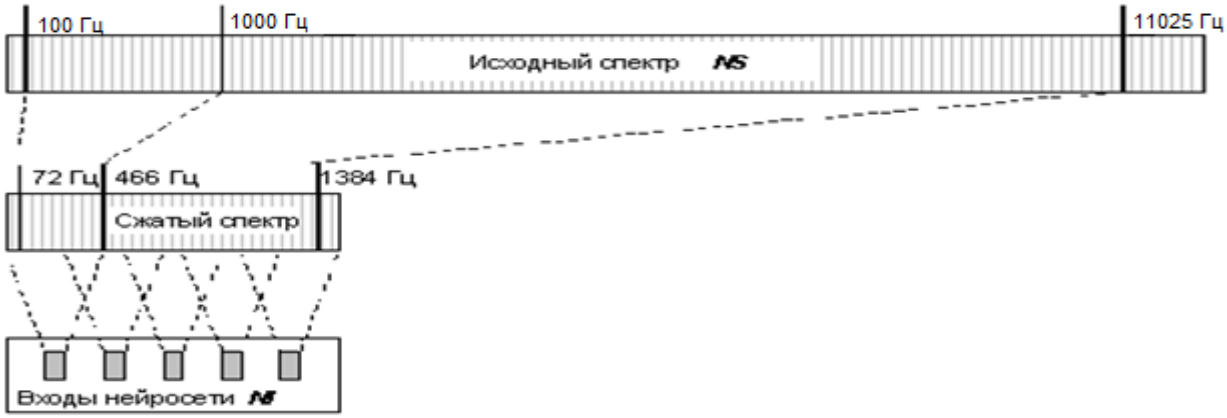


Рис.5 Логарифмическое сжатие

Выделение локальных максимумов амплитуд

В качестве примера рассмотрим осциллограмму слова «зелёный» с выделенным 6-ым фреймом(рис.6).

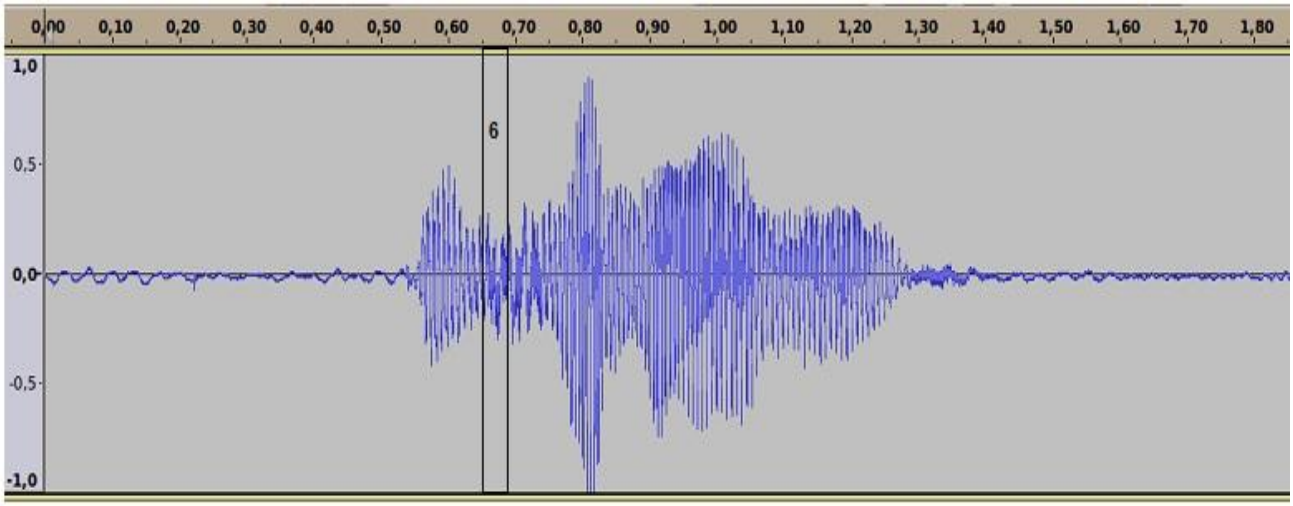


Рис.6 Осциллограмма слова «зелёный» с отмеченным 6-ым фреймом

Рассчитывается спектрограмма для этого интервала(рис.7). Кружочками отмечены форманты (локальные экстремумы). Для расчёта выбираются те форманты, которые имеют наибольшее значение в данном фрейме.

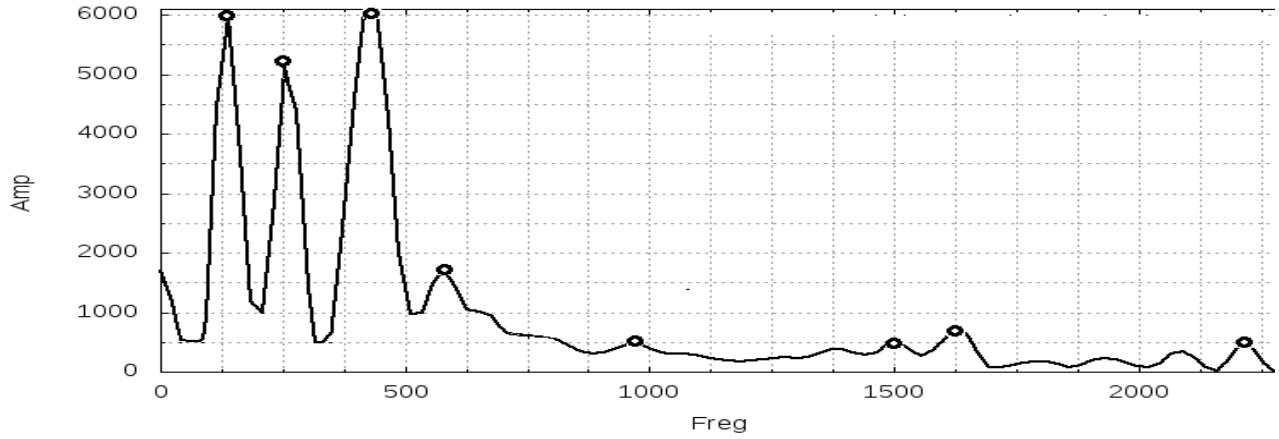
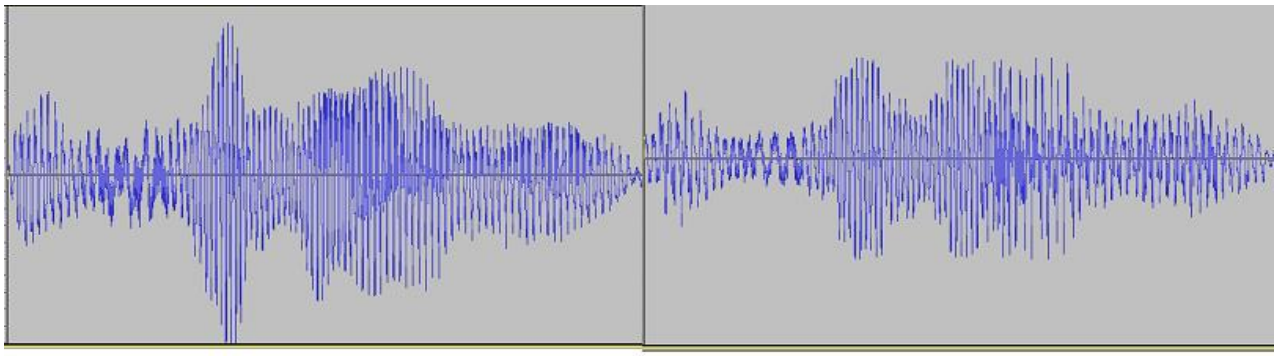


Рис. 7 Спектрограмма 6-ого фрейма

Эксперименты показали, что на каждый фрейм достаточно 8 формантов. Формант представляет собой вектор, заданной парой –амплитуда и частота. На основании этого, слово, состоящее из 30 фреймов, описывается массивом из 480 чисел. Обоснование выбора такого числа формантов можно подтвердить экспериментальным путём. Необходимо найти такое значение n, при котором после восстановления осциллограммы через синусное преобразование Фурье, будет однозначное определение преобразованного слова.На рис.8 можно заметить, что исходная и восстановленная осциллограмма имеют большое сходство.



а) ***б)***

Рис 8. Осциллограмма слова зеленый:
а- исходная; *б* - после синусоидального восстановления

Результатом работы является формирование массива из 480 чисел (240 векторов), определяющих произнесенное слово. На основании этих чисел производиться обучение нейронной сети.

Библиографический список

1. Ле, Н. В. Распознавание речи на основе искусственных нейронных сетей / Н. В. Ле, Д. П. Панченко // Технические науки в России и за рубежом: мат. Междунар. науч. конф. (г. Москва, май 2011 г.). – М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. – С. 8–11.
2. Potamianos, G., Neti, C.: Automatic Speechreading of Impaired Speech. In: J. Computer Science & Technology, pp. 582–589. Scheelsminde, Denmark (September 2001).
3. Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) и распознавание речи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://habrahabr.ru/post/140828.
4. Фролов, А.Синтез и распознавание речи.Современные решения [Электронный ресурс] / А. Фролов, Гр. Фролов. – Электрон. журн. – 2003. – Режим доступа: http:// www.frolov-lib.ru.
5. Гребнов, С. В.Аналитический обзор методов распознавания речи в системах голосового управления / С. В. Гребнов // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 83–85.

A.V. Chapurin,O.N. Korelin

PRELIMINARY SIGNAL PROCESSING FORTHE TASK OF SPEECH RECOGNITION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

This article considers the main methods and technologies of speech recognition, which are used in speech recognition systems.

Key words: speech recognition system; signal processing; mel-frequency cepstral coefficients; search endpoints, neural network; frame; spectrum.

УДК 004.9

С.Н. Капранов, В.И. Голованов, Т.И. Балашова, М.А. Степаненко, И.В. Лисин

СЛИЯНИЕ ТОВАРОПРОВОДЯЩИХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Данное направление исследований относится к комплексному подходу по оптимизации системы товаропроводящей сети в целом. Статья посвящена решению отдельной задачи слияния двух сетей.

Ключевые слова: товаропроводящие сети, логистика, графы, цепочки поставок

Supply Chain Management (SCM, англ. – система управления цепочками поставок) — это организация, планирование, контроль и реализация товарного потока, начиная с получения заказа и закупки сырья и материалов для обеспечения производства товаров, и далее через производство и распределение доведение его с оптимальными затратами ресурсов до конечного потребителя в соответствии с требованиями рынка. [3]

Актуальность данной задачи заключается в том, что управление цепями поставок становится эффективным инструментом повышения эффективности компаний. Стремительное развитие рынка, ужесточение конкуренции, требование улучшения качества сервиса клиентов, ставят перед компаниями новые задачи. Чтобы сохранить конкурентоспособность и усилить свои преимущества, современному предприятию необходимо оптимизировать все процессы создания стоимости — от поставки сырья до сервисного обслуживания конечного потребителя. Для решения этих задач руководство компаний и обращается к SCM решениям. Это часть бизнеса, связанная с оптимизацией перемещения продукта от момента его появления (включая весь подготовительный период) до момента его продажи или потребления.

Задача, решаемая в рамкахданной работы заключается в слиянии двух различных товаропроводящих сетей. В пример можно привести объединение двух компаний, реализующих продажу какого-либо товара. У каждой из них имеется своя налаженная цепь поставок, заводы, склады, пункты реализации. Необходимо слить эти сети так, чтобы обеспечить эффективную работу всей цепи поставок.

Товаропроводящая сеть (ТПС) представляет собой ориентированный граф с набором вершин V_{ij} производства, хранения и потребления, связанных между собой ребрами e.

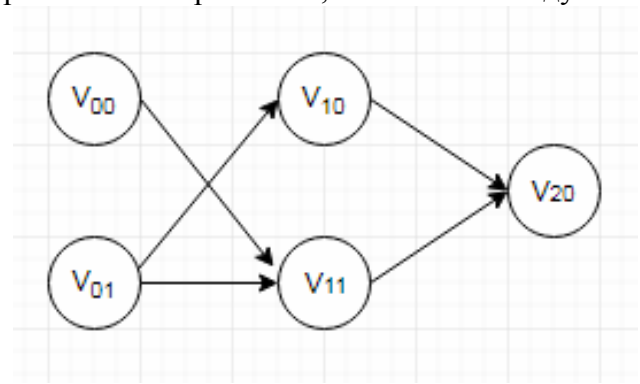


Рис.1 - ТПС с двумя точками производства, двумя складами, одним пунктом потребления

В качестве целевой функции будем использовать функцию минимизации стоимости построенных маршрутов.

$\sum_0^n F(Se) \rightarrow \min$, где e - ребро, S_{ei} - стоимость ребра (1)

Ограничениями для данной задачи являются: обеспечение связности графа, соблюдение состояния стабильной устойчивости при заданной загрузке узлов.

Для решения задачи необходимо задать входные параметры:E - множество ребер, которыми можно соединить граф; V_1, V_2- множество вершин двух графов; A - справочник видов транспорта, включает в себя типы транспорта (ж/д, авиа, морской транспорт); L - множество длин ребер; S - множество стоимостей ребер; $e_i(v_1, v_2, L_i, S_i, A)$ - характеристики ребер (соединяемые вершины, длина, стоимость, типы транспорта).

Решением (результатом слияния) будет новый объединенный граф G.

Для достижения цели используется метод простого перебора. Он заключается в том, что из всего множества данных реберE выбираются наименьшие по стоимости и перебираются все варианты построения, пока не будет достигнута целевая функция.

В дальнейшем для решения предложенной задачи планируется использовать генетический алгоритм. 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. Он является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи с использованием методов естественной эволюции, таких как наследование, мутации, отбор и кроссинговер. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Разберем примеррешения задачи. Пусть будут заданы две ТПС, задано множество путей автомобильного и железнодорожного транспорта. Каждый путь характеризуется параметрами: начальная и конечная вершина, длина пути, стоимость и тип транспорта. Вершина - номером и типом (производство, склад, потребление).

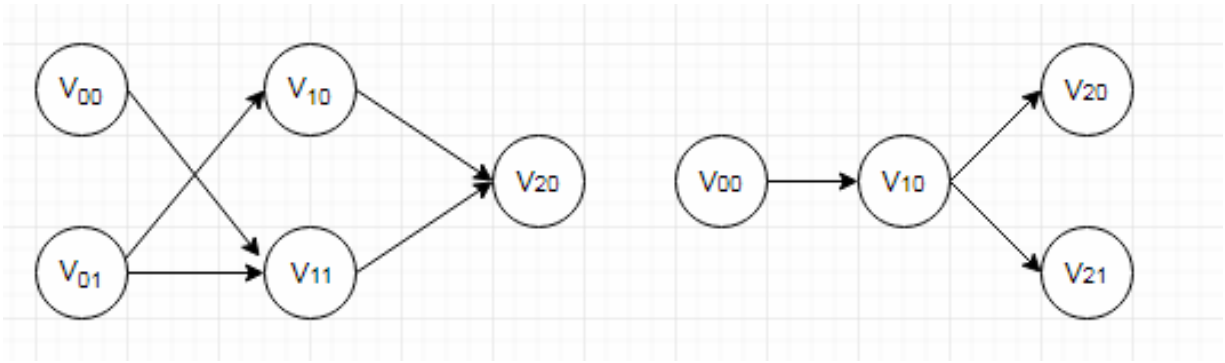


Рис.2 - Две ТПС для объединения

Зададим структуры для решения:

SCM = { V, E_1, E_2,adj_matrix }, где SCM - граф сети, имеющий параметры:

V - множество вершин; E_1 - множество ребер автотранспорта; E_2 - множество ребер ж/д транспорта; adj_matrix - матрица смежностей.

e = { v_1, v_2, L, S, A },

гдеv_1 - начальный узел; v_2 - конечный узел; L - длина пути; S - стоимость пути; A - тип транспорта

v = { Number, Type },

гдеNumber - номер вершины; Type - тип (производство, склад, потребление).

Объединим существующие вершины для нового графа:

V = { { 0, 0 }, { 0, 1}, { 0, 2 }, { 1, 0 }, { 1, 1 }, { 1, 2 }, { 2, 0 }, { 2, 1 }, { 2, 2 } }

Зададим возможные ребра:

$E_1 \cap E_2$ = { { v_{00}, v_{11}, 3, 1, 0 }, { v_{00}, v_{11}, 3, 2, 0 }, { v_{01}, v_{10}, 2, 1, 0 }, { v_{01}, v_{10}, 3, 4, 1 }, { v_{01}, v_{12}, 6, 9, 1 }, { v_{02}, v_{10}, 4, 2, 0 }, { v_{02}, v_{10}, 4, 4, 0 }, { v_{02}, v_{11}, 5, 4, 1 }, { v_{10}, v_{22}, 2, 1, 0 }, { v_{11}, v_{20}, 5, 4, 1 }, { v_{11}, v_{22}, 2, 3, 0 }, { v_{12}, v_{21}, 3, 3, 0 }, { v_{12}, v_{21}, 3, 5, 0 }, { v_{10}, v_{22}, 2, 3, 0 }, { v_{02}, v_{10}, 4, 4, 1 }, { v_{02}, v_{11}, 5, 6, 1 }, { v_{11}, v_{20}, 5, 7, 1 }, { v_{01}, v_{10}, 2, 2, 0 }, { v_{01}, v_{12}, 6, 10, 1 } }

После выполнения программы имеем результат

{v1:{Number:0 Type:0 Volume:0 ID:0} v2:{Number:1 Type:1 Volume:0 ID:4} L:9 S:1 A:1}
{v1:{Number:1 Type:0 Volume:0 ID:1} v2:{Number:0 Type:1 Volume:0 ID:3} L:1 S:1 A:0}
{v1:{Number:1 Type:0 Volume:0 ID:1} v2:{Number:2 Type:1 Volume:0 ID:5} L:9 S:9 A:1}
{v1:{Number:2 Type:0 Volume:0 ID:2} v2:{Number:0 Type:1 Volume:0 ID:3} L:6 S:2 A:0}
{v1:{Number:2 Type:0 Volume:0 ID:2} v2:{Number:1 Type:1 Volume:0 ID:4} L:0 S:4 A:1}
{v1:{Number:0 Type:1 Volume:0 ID:3} v2:{Number:2 Type:2 Volume:0 ID:8} L:0 S:1 A:0}
{v1:{Number:1 Type:1 Volume:0 ID:4} v2:{Number:0 Type:2 Volume:0 ID:6} L:9 S:4 A:1}
{v1:{Number:1 Type:1 Volume:0 ID:4} v2:{Number:2 Type:2 Volume:0 ID:8} L:5 S:3 A:0}
{v1:{Number:2 Type:1 Volume:0 ID:5} v2:{Number:1 Type:2 Volume:0 ID:7} L:3 S:3 A:0}

$\sum_0^n F(Se) = 28$- сумма стоимостей всех ребер

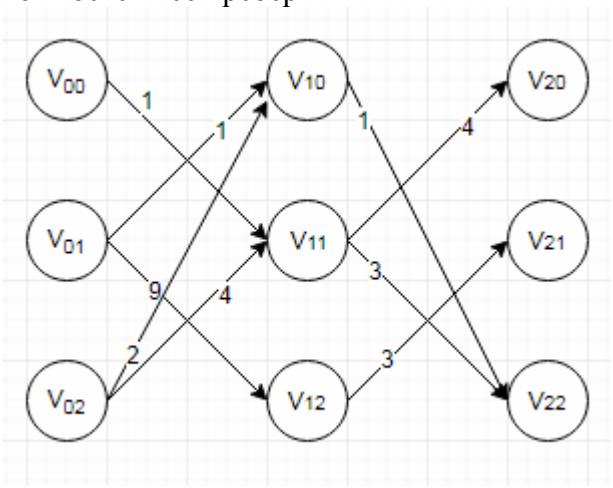


Рис.3 - Новая ТПС

В результате выполнения программы, мы получили новый граф G, с прежним набором вершин V, но новым набором ребер E. Данный граф удовлетворяет заданной целевой функции.

Данная задача может в полной мере применяться на практике. Любая компания преследует цель максимизации прибыли и минимизации расходов, нередко происходят случаи объединения компаний, и для достижения минимизации затрат, с помощью данной задачи можно оптимально перестроить транспортную сеть.В дальнейшем для решения задачи планируется ввести дополнительные параметры и ограничения, например, связанныес объемом перевозимого товара, а также рассмотреть возможность решения задачи с помощью эволюционных алгоритмов.

Библиографический список

1. Тихомирова А.Н., Сидоренко Е.В., Математические модели и методы в логистике / Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. -320с.
2. Лубенцова В.С., Математические модели и методы в логистике: учеб. пособ. / В.С. Лубенцова. Самар. гос. техн. ун-т, 2008, -157 с.: ил.
3. Зайцев Е., Коромыслов А., Методология синтеза системы управления транспортно-логистическими системами / Логистика сегодня. – 2005.
4. Уотерс Д., Логистика. Управление цепью поставок // Пер. с англ.— М.: ЮНИТИ-ДАНА,2003. - 503 с.- (Серия «Зарубежный учебник»).
5. Невейкин Э., Как работают экспертные системы оптимизации цепочек поставок на практике / Блог компании КРОК – 2012. – [Электронный ресурс] – Режим доступа - https://habrahabr.ru/company/croc/blog/162453/.(датаобращения 08.01.2018).
6.

S. N. Kapranov, V.I. Golovanov, T.I. Balashova, M.A. Stepanenko, I. V. Lisin

MERGING OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT NETWORKS

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

This line of research relates to a comprehensive approach to optimizing the distribution network system as a whole. The article is devoted to solving a separate problem of merging two networks.

Keywords: supply chain management, logistics, graphs.

УДК 004.934

А.Е. Миндров, И.Р. Каюмов

МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА В РАСПОЗНАВАНИИ РЕЧИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассмотрен метод предварительной обработки речевых сигналов, применяемый в системах распознавания речи.

Ключевые слова: распознавание речи, мел-кепстральные коэффициенты, фрейм, спектр, обработка сигналов, скрытая Марковская модель.

Прежде чем применять алгоритмы распознавания речи, существует необходимость предварительной обработки цифрового сигнала. Это связано с тем, что человеческая речь подвержена к изменению тембра, громкости и скорости произношения.

Этапы обработки сигнала:

1. Pre-emphasis – частотная корректировка сигнала
2. Разделить сигнала на фреймы в внахлест
3. Применить оконную функцию на каждый фрейм
4. Применить Фурье преобразование на каждом фрейме
5. Расчет mel-фильтров
6. Применить дискретное косинусное преобразование к банкам фильтров

Рассмотрим подробнее каждый этап.

Частотная корректировка

На первом шаге применяется частотная корректировка сигнала для усиления высоких частот. Это необходимо для следующего:

1. Высокие частоты более значимы, чем низкие частоты
2. Избежание численных проблем при преобразовании Фурье
3. Для улучшения отношения сигнал/шум

Коррекция производится по следующей формуле:

$$y(t) = x(t) - \alpha x(t-1) \quad (1)$$

Типичное значение для α это 0.95 или 0.97. Правда, применение такого рода корректировки в современных системах, мало влияет на сигнал, главным образом потому, что тоже самое может быть достигнуто с помощью средней нормализации.

А числовые проблемы при преобразовании Фурье решены в современных реализациях алгоритма.

Разделение на фреймы

После коррекции, сигнал можно разделить на фреймы. Этот этап обусловлен тем, что частоты в сигнале изменяются со временем, поэтому в большинстве случаев не имеет смысла делать Фурье преобразование по всему сигналу, так как мы теряем частотные контуры сигнала с течением времени. Чтобы избежать этого, можно смело предположить, что частоты в сигнале неподвижны в течение очень короткого периода времени. Таким образом, выполняя преобразование Фурье за этот короткий промежуток времени, можно получить хорошее приближение частотных контуров сигнала путем объединения смежных кадров.

Оптимальная длина фреймов в распознавании речи может быть от 20 до 40 миллисекунд, внахлест – 50%.

Применение оконной функции

После разделения сигнала на фреймы, необходимо применить оконную функцию Хэмминга для каждого фрейма, чтобы сгладить значения на границах фреймов.

$$\omega[n] = 0.54 - 0.46 * \cos(\frac{2\pi n}{N-1}) \quad (2)$$

где, $0 \leq n \leq N-1, N -$ ширина окна.

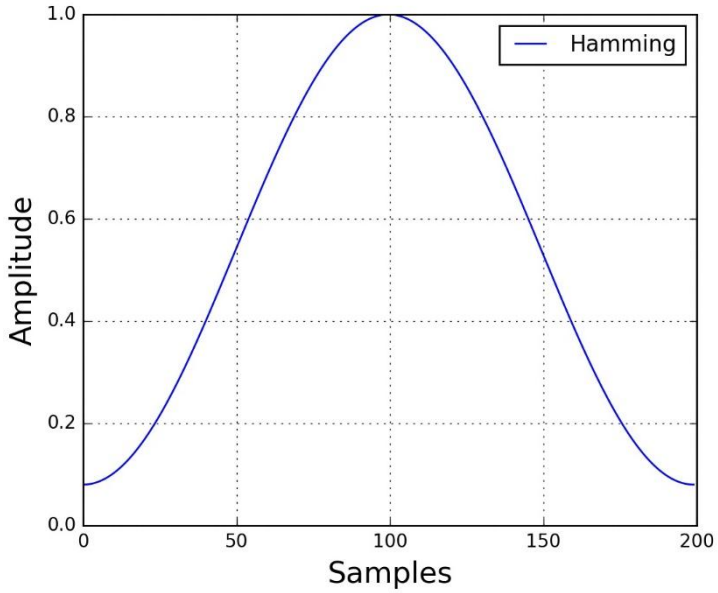


Рис 1. Оконная функция Хэмминга

Преобразование Фурье

На следующем этапе необходимо применить быстрое преобразование Фурье на каждом фрейме и вычислить мощность спектра по следующей формуле:

$$P = \frac{|FFT(x_i)|^2}{N} \quad (3)$$

Где N, обычно 256 или 512.

Расчет mel-фильтров

Следующий этап – рассчитать спектр мощности каждого фрейма. Для этого преобразуем частоты в mel-шкалу по формуле:

$$M(f) = 2595 \log_{10}(1 + \frac{f}{100}) \quad (4)$$

Для обратного преобразования применяется формула:

$$f = 700(10^{\frac{m}{2595}} - 1) \quad (5)$$

Мел-шкала связывает воспринимаемую частоту с его фактической измеренной частотой. Люди намного лучше различают небольшие изменения высоты тона на низких частотах, чем на высоких частотах. Это обосновано на устройстве ушной улитки человека, которая вибрирует в разных местах в зависимости от частоты входящих звуков. В зависимости от местоположения в улитке, которая вибрируя (махает маленькими волосками), возбуждает разные нервы, информируя мозг, что некоторые частоты присутствуют.

После, на мел-шкале применяется некоторое количество треугольных фильтров, обычно 40. Это позволяет просуммировать количество энергии на определенном диапазоне частот и получить мел-коэффициенты.

Зная количество этих коэффициентов и диапазон частот, мы можем построить гребенчатые фильтры:

$$H_m(k) = \begin{cases} 0 & k < f(m-1) \\ \frac{k - f(m-1)}{f(m) - f(m01)} & f(m-1) \le k < f(m) \\ 1 & k = f(m) \\ \frac{f(m+1) - k}{f(m+1) - f(m)} & f(m) < k \le f(m+1) \\ 0 & k > f(m-1) \end{cases} \quad (6)$$

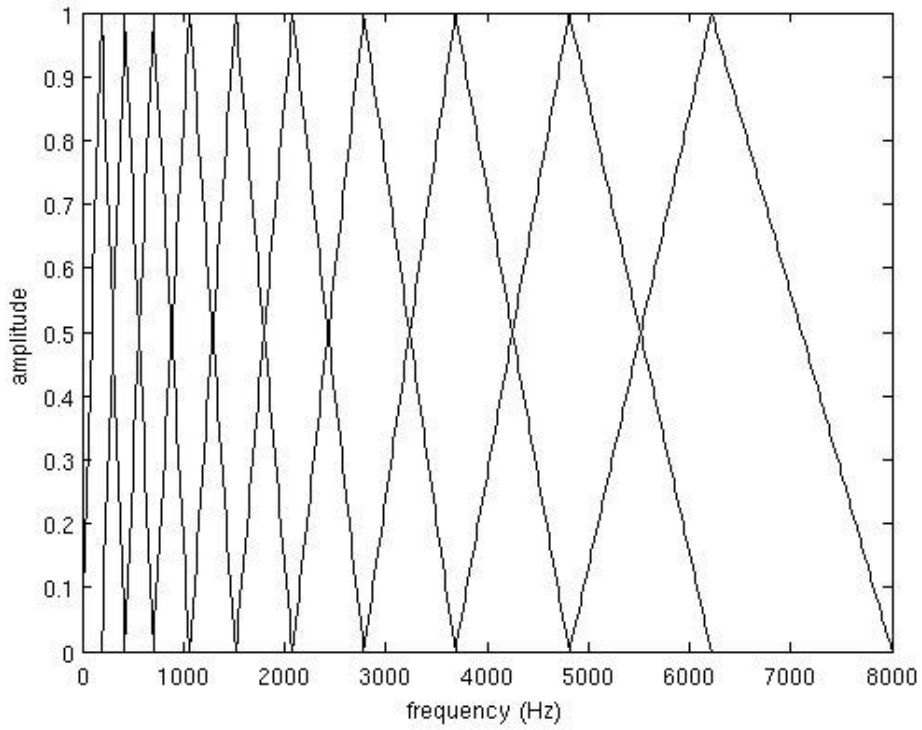


Рис 2. Банк фильтров

После получения гребенчатых фильтров, мы берем их логарифм. Это тоже обусловлено устройством человеческого слуха: мы не слышим громкости в линейном масштабе. Как правило, чтобы удвоить пропущенный объем звука, нам нужно добавить в него в 8 раз больше энергии. Это означает, что большие колебания энергии могут звучать не так, как если бы звук был громким. Эта операция сжатия делает наши функции более близкими к тому, что люди действительно слышат.

В полученных гребенчатых фильтрах получается, что коэффициенты фильтра сильно коррелируют, что может вызвать проблемы в некоторых алгоритмах машинного обучения. Поэтому применяется дискретное косинусное преобразование. Как правило, полученные кепстральные коэффициенты 2-13 сохраняются, а остальные отбрасываются. Отбрасываются они потому, что они представляют собой быстрые изменения в коэффициентах гребенчатого фильтра, которые не способствуют автоматическому распознаванию речи. Полученный вектор называют Мел-кепстральными коэффициентами (MFCC).

В дополнении, можно применить синусоидальный фильтр, который уберет частотную коррекцию сигнала. Полученный вектор можно применять для обучения скрытых Марковских моделей.

Библиографический список

1. Vaseghi, Saeed V. Advanced digital signal processing and noise reduction. – 3ed. – Chichester, 2006.
2. Davis, S. Mermelstein, P. *Comparison* of Parametric Representations for Monosyllabic Word Recognition in Continuously Spoken Sentences. In IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980.
3. X. Huang, A. Acero, and H. Hon. Spoken Language Processing: A guide to theory, algorithm, and system development. PrenticeHall, 2001.

A.E. Mindrov, I.R. Kayumov

METHOD OF PRELIMINARY PROCESSING OF SPEECH SIGNAL IN RECOGNITION OF SPEECH

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

The method of preliminary processing of speech signals used in speech recognition systems is considered.

Key words: speech recognition, chalk-cepstral coefficients, frame, spectrum, signal processing, hidden Markov model.

УДК 004.078

В.И. Пачинин, И.Н. Коренская, А.А. Харлов

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ

Институт информационных технологий БГУИР

Разработанное программное средство осуществляет контроль рабочего времени, необходимость в котором возникает при усовершенствовании процесса распределения задач, в том числе предотвращении ситуаций его переработки и недоработки. В данном докладе рассматривается информационная модель базы данных, архитектура программного средства контроля рабочего времени, а так же описывается алгоритм авторизации.

Ключевые слова: программное средство, мониторинг, рабочее время, модель, фреймворк, токен, алгоритм, разработка, API, JSON.

Основой для реализации задач мониторинга рабочего времени является необходимость контроля отработанного рабочего времени, осуществляемая как со стороны работодателей, так и самими сотрудниками. На организацию производственного процесса существенно влияет дисциплина и мотивация сотрудников, следовательно, контроль персонала необходим для успешного решения производственных задач. Особенно актуальным в настоящее время становится разработка мониторинга для работников с гибким графиком. Информация об использовании системы учета рабочего времени положительно влияет на дисциплину коллектива, продуктивность его работы и безопасность.

Одной из главных задач разработанного программного средства (ПС) контроля рабочего времени является разработка информационной модели базы данных (БД), в которой содержатся сведения о количестве часов, затраченных на выполняемую задачу, а также представление отчетов в удобном для пользователя виде.

При проектировании и разработке ПС использовались следующие принципы:

- исключение дублирования информации и повышение ее достоверности за счет отождествления ранее введенной информации;
- расширяемость/масштабируемость – обеспечение возможности добавления, удаления или редактирования функций при неизменных остальных функциональных частях;
- иерархичность, реализуемая формированием многоуровневой структуры системы с учетом делегирования полномочий для соответствующего уровня управления;
- стандартизируемость – проектирование и разработка на основе согласованных международных стандартов и предложений, осуществление реализации открытости на базе функциональных стандартов (профилей) в области информационных технологий.

Для удобства использования ПС созданы мобильный и веб-клиенты. Во избежание дублирования кода, непременно приводящего к ошибкам в системе, вся бизнес-логика реализуется с помощью REST API, с которым работают оба клиента.

ПС контроля рабочего времени включает такие компоненты как: БД, веб-сервер, веб-клиент, мобильный клиент.

Архитектура программного средства представлена на рис 1.

Обмен данными между клиентом и сервером осуществляется по протоколу HTTPS с использованием сообщений в формате JSON.

В качестве СУБД для ПС была выбрана система управления реляционными БД, разработанная корпорацией Microsoft – Microsoft SQL Server. Основным используемым языком запросов является Transact-SQL, который создан совместно Microsoft и Sybase. Использование данной СУБД обусловлено её надежностью, целостностью, автоматическими обновлениями и производительностью.

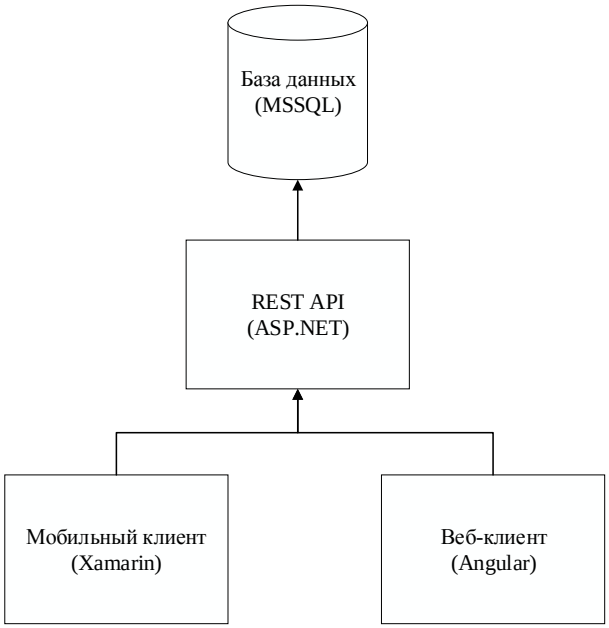


Рис. 1 – Архитектура программного средства

Веб-сервер ПС разработан с применением архитектурного стиля REST, который представляет собой согласованный набор ограничений, учитываемых при проектировании распределённой системы. Создание серверной части проводилось на платформе ASP.NET, которая является составной частью платформы Microsoft .NET и развитием более старой технологии Microsoft ASP. [1]

Для написания клиентской мобильной части был использован фреймворк для кроссплатформенной разработки мобильных приложений Xamarin с использованием языка C#. Он предоставляет возможность применения любого языка программирования с полным доступом ко всем возможностям SDK платформы и механизму создания UI, получая на выходе приложение, которое имеет высокую производительность. [2]

Для реализации веб-клиента был выбран подход SPA (Single Page Application – одностраничное веб-приложение) и один из лидирующих фреймворков Angular. Среди его преимуществ можно выделить такие, как: декларативный стиль кода, высокая скорость разработки, модульность, связывание данных, развитое сообщество.

Информационная модель базы данных представлена на рис. 2.

Приведем описание таблиц информационной модели БД:

- Users – хранит в себе данные о зарегистрированных пользователях ПС, имеет связи с таблицами Roles для определения роли пользователя, Tokens для определения доступных токенов для авторизации, TimerEntries;
- Roles – содержит в себе доступные роли пользователей;
- Tokens – применяется для реализации авторизации пользователей на сервере, хранит токены, которые были созданы во время логина;
- TimerEntries – служит для хранения информации об отработанных часах, включая время начала и окончания работы таймера и краткое описание проделанной работы, имеет связь с таблицей Projects для возможности связать часы с проектом;
- Projects – список проектов компании, доступный для выбора во время начала работы таймера, возможно установление связи проекта с клиентом (таблица Clients);
- Clients – хранит данные клиентов компании;
- ProjectMembers – применяется для управления участниками проекта.

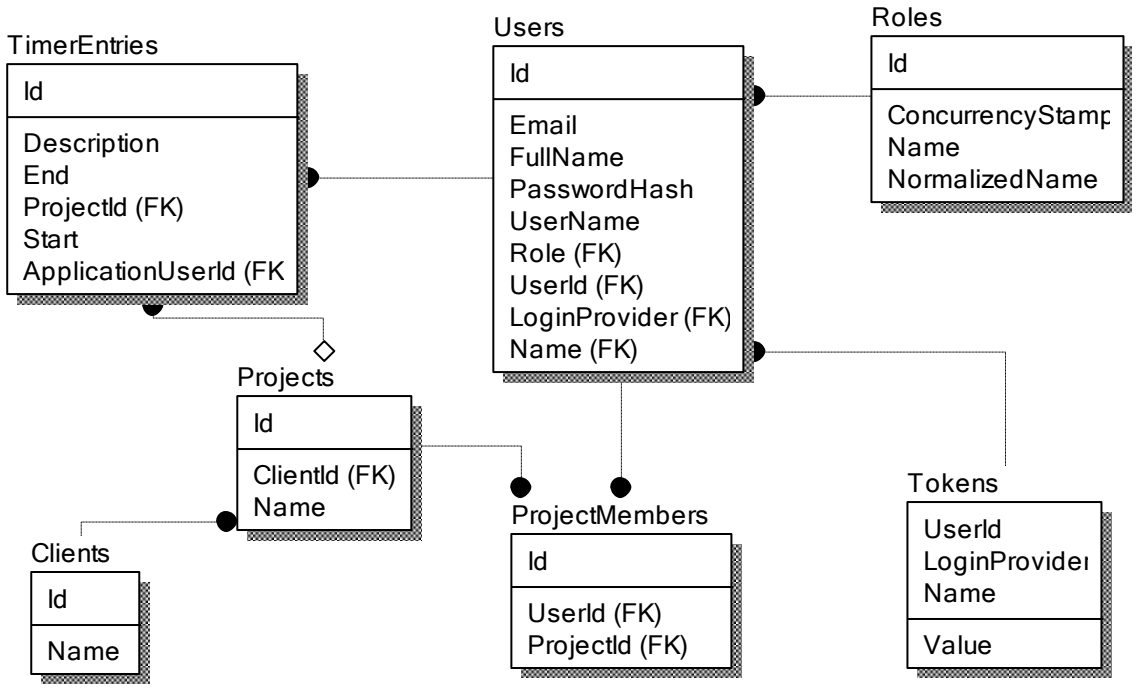


Рис. 2 – Информационная модель базы данных

Рассмотрим одно из наиболее важных требований безопасности при работе с ПС, а именно, доступ к некоторым частям системы, который должен быть осуществлен только после аутентификации пользователя. Для авторизации пользователей используется JWT: JSON Web Token (JWT) - открытый стандарт (RFC 7519) для создания токенов доступа, основанный на JSON формате. Он используется для передачи данных авторизации в клиент-серверных приложениях. Токены создаются сервером, подписываются секретным ключом и передаются клиенту, который в дальнейшем использует данный токен для подтверждения своей личности.

Перечислим преимущества JWT над cooki:

- При использовании cooki сервер хранит информацию о выданных сессиях, а применение JWT не требует хранения дополнительных данных о выданных токенах: только проверяется подпись.
- Сервер может не заниматься созданием токенов, а предоставить это внешним сервисам.
- В JSON токенах можно хранить дополнительные сведения о пользователях. Как следствие – более высокая производительность. В случае с cooki иногда требуется осуществлять запросы для получения дополнительной информации. При использовании JWT данная информация может быть передана в самом токене.
- JWT делает возможным предоставление одновременного доступа к различным доменам и сервисам.

Для каждого действия в контроллерах назначаются группы, которым разрешен просмотр содержимого данной страницы. При попытке перехода на страницу сайта, подсистема безопасности производит проверку наличия доступа текущего пользователя. Данная проверка называется авторизацией. Если разрешение доступа не получено, то пользователь должен пройти процесс аутентификации при помощи своих данных входа.

Схема алгоритма аутентификации и авторизации пользователей представлена на рис. 3.

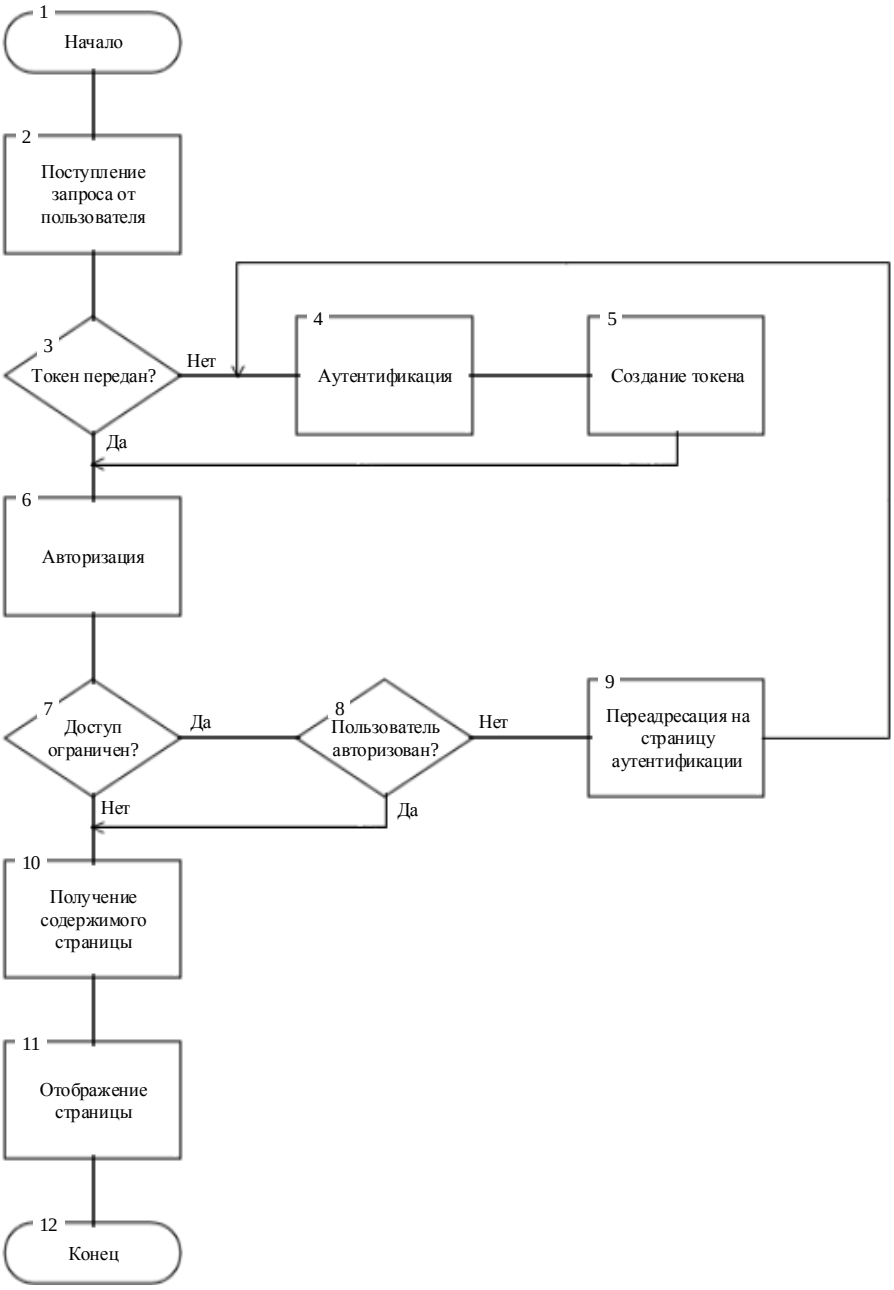


Рис. 3 – Схема алгоритма аутентификации и авторизации пользователей

По умолчанию анонимные пользователи могут обращаться к главной странице. При запросе веб-страницы, к которой закрыт анонимный доступ, выполняются следующие действия:

- Запрос отправляется веб-серверу. Так как идентичность пользователя в данный момент времени отсутствует, то предлагается ввести логин и пароль для входа, используя специальную веб-страницу.
- Пользователь предоставляет свое удостоверение, которое верифицируется приложением.
- Если удостоверение пользователя подтверждается, ему предоставляется доступ к веб-странице. Если же оно оценивается как нелегитимное, то пользователю предлагается ввести логин и пароль.

Разработанное ПС выполняет следующие функции:

- добавление/изменение/удаление клиентов компании;
- создание и редактирование записей таймера;

- отображение статистики пользователя с возможностью сравнения с предыдущим периодом;
- добавление/изменение/удаление проектов;
- просмотр и экспорт отчетов;
- отображение истории таймера в мобильном приложении;
- создание новых записей таймера в мобильном приложении.

Использование результатов разработки позволяет выявить грубые нарушения рабочего режима, доработать процесс планирования и распределения задач, повысить эффективность работы коллектива и дисциплинировать сотрудников.

Библиографический список

1. Nagel, C. Professional C# 6 and .NET Core 1.0 / C. Nagel – Wrox – 2016. – 1536 pp.
2. Xamarin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.xamarin.com/. – Дата доступа: 18.12.2017.

V.I. Pachynin, I.N. Korenskaya, A.A. Kharlov

TIME TRACKING SOFTWARE

Institute of information technologies BSUIR

The developed software allows controlling of the working time for both managers and employees. The control of working hours is necessary to prevent overtimes and shortcomings, allows to improve the process of task distribution. Describes the algorithm of authorization, software architecture and information model of the database.

Keywords: software, tracking, working time, model, framework, token, algorithm, development, API, JSON.

УДК004.056

В.Л. Николаенко, А.А. Охрименко, В.И. Пачинин,
Г.В. Сечко, Т.Г. Таболич, И.И. Шпак

ЗАЩИТА ПЕРСОНИФИЦИРОВАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ В БЕЛАРУСИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Анализируется терминология в области персональных данных пациента и предлагается именовать их персонифицированными медицинскими данными. Рассматриваются традиционные способы защиты персонифицированных медицинских данных и уровень защиты этими способами. Для повышения уровня защиты персонифицированных медицинских данных состоятельных пациентов предлагается использовать белорусские биометрические средств контроля доступа к рассматриваемым данным.

Ключевые слова: медицина, защита персональных данных пациентов, традиционные способы защиты персонифицированных медицинских данных, биометрические средств контроля доступа к данным.

Терминология: медицинские данные, персональные данные,персональные данные пациента, персонифицированные медицинские данные

Характер медицинской деятельности связан с использованием большого количества данных о здоровье пациента, истории его болезней, истории обращения к врачу и других данных. Перечисленные данные содержатся в медицинских документах, которые оформляются сотрудниками медицинских учреждений на каждого пациента. Медицинская документация – это документы установленной формы, предназначенные для регистрации результатов лечебных, диагностических, профилактических, реабилитационных, санитарно-гигиенических и других мероприятий. Примером медицинского документа является медицинская карта [1],которая позволяет обобщать и анализировать данную информацию. Медицинская документация является учетной и отчетной, её держателем выступают медицинские учреждения, следовательно, врачи медицинских учреждений несут ответственность за неправильное оформление соответствующих документов.Назовём все сведения о здоровье пациента, методах его лечения, медицинских назначениях и тому подобные данные *медицинскими данными***.**

Однако, как следует из паспортной части, например, «Медицинской карты амбулаторного больного», в медицинских документах содержатся не только медицинские, но и персональные данные пациента. Согласно Федеральному закону Российской Федерации «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ (статья 3, пункт 1) *персональные данные* – любая информация, относящаяся к прямо или косвенно определенному или определяемому физическому лицу (субъекту персональных данных). Применительно к медицинским данным субъектом персональных данных является пациент, поэтому далее при упоминании о персональных данных речь будет идти только о *персональных данных пациента.* Следует отметить, что белорусский аналог российского закона N 152-ФЗ Национальное Собрание Республики Беларусь планирует рассматривать только в 2019 году.

Медицинская документация может содержать сведения о персональных данных пациента (например, рецепт [2], который содержит фамилию, имя и отчество больного, его возраст, адрес, номер его «Медицинской карты амбулаторного больного», назначения врача), но может и не содержать (например,отчетнаямедицинская документация, представляющая собой сводные статистические документы, содержащие сведения о состоянии и деятельности медицинских учреждений за определенный отрезок времени и т. д.[3]).

Каждый пациент, который попадает на приём в частную клинику, подписывает не только договор об оказании услуг, согласие на медицинское вмешательство, но и согласие на

обработку своих персональных данных *совместно со своими медицинскими данными*в этом медицинском учреждении. Предыдущая фраза заимствована из ресурса[4], но в ней добавлен фрагмент, выделенный курсивом. Суть добавленного фрагмента состоит в том, что для похитителя персональных данных пациента важнее комплект этих данных вместе с медицинскими данными – без них сами по себе персональные данные похитителя мало интересуют в силу малой их привлекательности в части финансовых результатов хищения. Другое дело – описанная в ресурсе [5] утечка в Беларуси медицинских данных умерших пациентов. Их после вызова скорой помощи отвозят в морг специальные машины скорой помощи, именуемые в народе «труповозками». Рост конкуренции между похоронными бюро возрастает с каждым годом. Существует 3 категории людей, обладающих информацией об умерших: врачи скорой помощи, милиционеры и санитары, которые осуществляют перевозку умерших в морг [5]. Утечка информации также возможна на уровне диспетчеров скорой помощи. Медики или сотрудники правоохранительных органов либо сообщают агентам адрес квартиры покойного, после чего те связываются с родственниками умершего, либо прямо рекомендуют определенную похоронную организацию. Обычно сообщение срабатывает – родственникам покойного в состоянии сильнейшего стресса не хочется куда-то идти и разбираться.

Комплект персональных данных пациента вместе с его медицинскими данными будем именовать *персонифицированными медицинскими данными* (название «персональные данные пациента» – синоним»). Именно эти данные – клад для мошенников [4]. Как утверждают независимые эксперты, на чёрном рынке ценность медицинской информации в 10 раз выше финансовой. Полученные незаконным методом сведения о здоровье могут использоваться в ущерб пациентов. Это и обман пенсионеров, когда им пытаются продать препараты-пустышки за баснословные суммы, и желание выручить деньги с угрозами обнародования диагнозов у известных личностей, и другие случаи [4].

Традиционные способы защиты персонифицированных медицинских данных (ПМД) и уровень защиты информации этими способами

Общеизвестно, что самым простым способом защиты является полный переход от бумажного документооборота к безбумажному [6].

По состоянию на сегодня в Минске ПМД хранятся не только в электронном виде (файлы, папки и архивы в компьютерах сотрудников и на сервере лечебного учреждения), но и в бумажном виде – в регистратуре поликлиники («Медицинская карта амбулаторного больного»), в архиве больницы (истории болезни пациентов, переименованные недавно в «Медицинские карты стационарного больного»). В кожвендиспансерах аналогом карт амбулаторного или стационарного больного является форма № 065/у-07 «Медицинская карта амбулаторного больного инфекциями, передаваемыми половым путем» и похожие формыдля других заболеваний № 065-1/у-07 и № 065-2/у-07. Эти формы также хранятся в регистратуре кожвендиспансера.

В начале февраля 2014 года появилась информация [7], что в Минске на базе 29-й поликлиники начали тестировать работу электронной медицинской карты (ЭМК), что давно сделано во многих регионах России [8–11]. По заверению главврача, оцифрованы были медицинские карты всех 39 тысяч пациентов 29-й поликлиники. Но регистратура с бумажными медицинскими картами существует до сих пор.

Если зафиксировать факт несанкционированного доступа к данным или попытки такого доступа в компьютере сотрудника медицинского учреждения технически несложно, то зафиксировать аналогичный факт в регистратуре этого учреждения или в его архиве практически невозможно. Более того, учитывая факт низкой зарплаты медрегистраторов в Беларуси (чуть больше 100 долларов), вероятность утечки ПМД из регистратуры медицинского учреждения или архива больницы очень велика. В настоящее время в белорусских медицинских учреждениях предусмотрены только меры административной

ответственности виновных в утечке (если виновные будут найдены). На наш взгляд, этого недостаточно. Уровень защиты ПМД при наличии бумажного документооборота нулевой.

При наличии в медицинском учреждении только безбумажного документооборота все ПМД учреждения циркулируют в локальной вычислительной сети (ЛВС) его и частично в Интернете (при обмене информацией из ЛВС данного учреждения с ЛВС других учреждений, в том числе вышестоящих). Способы защиты информации в Интернете общеизвестны, их рассматривать не будем.

Защиту информации в ЛВС медицинского учреждения общепринято осуществлять в программными, организационными и вспомогательными методами. К программным методам защиты относится в основном контроль и разграничение доступа к ПМД в ЛВС [6, 12], а также обеспечение безопасности ПМД с помощью криптосредств [13]. К организационным способам можно отнести издание и контроль за исполнением внутренних распорядительных документов и положений, а также политик в отношении обработки ПМД медицинского учреждения, образцы которых содержатся в [14], аполный перечень – в «Методических рекомендациях для организации защиты информации при обработке персональных данных в учреждениях здравоохранения, социальной сферы, труда и занятости [13]. Вспомогательными способами защиты ПМД могут быть обезличивание, абстрагирование и некоторые другие [13]. При этом под обезличиванием понимаются действия, в результате которых невозможно определить принадлежность ПМД конкретному субъекту персональных данных [13].

Перечисленные традиционные способы защиты ПМД (программные, организационные и вспомогательные методы защиты информации в ЛВС) медицинского учреждения позволяют обеспечить некоторый уровень защиты ПМД, но достичь стопроцентной защиты с их помощью невозможно. Действительно, при назначении администратором сети медучреждения прав доступа к ПМД главврач медучреждения и его заместители, лечащие врачи, сам администратор и сотрудники, обрабатывающие ПМД, обязательно получат такие права. Естественно, что в этом случае стопроцентной гарантии исключения утечки данных для пациента через работников медучреждения нет.

Биометрические способы защиты ПМД

В соответствии с российским законодательством биометрические ПМД обрабатываются в соответствии со статьей 11 Федерального закона Российской Федерации от 27 июля 2006 г. N 152-ФЗ «О персональных данных». Существует также Постановление Правительства Российской Федерации от 06.07.2008 N 512 (ред. от 27.12.2012) «Об утверждении требований к материальным носителям биометрических персональных данных и технологиям хранения таких данных вне информационных систем персональных данных». Похожих правовых актов в Республике Беларусь нет, но предварительные научные исследования проводятся. Так например, 8–9 декабря 2016 года Министерство здравоохранения Республики вместе с другими организациями провели в Минскемеждународную научно-техническую конференцию «Медэлектроника–2016. Средства медицинской электроникии новые медицинские технологии». Большой интерес на конференции вызвал доклад доктора медицинских наук, профессора В. Н. Ростовцева и аспиранта А. А. Гивойно, опубликованный в [15]. В докладе для защиты ПМД была предложен архиватор, представляющийсобой по российской классификации информационную системукласса 1 (К1) (информационные системы, для которых нарушение заданной характеристики безопасности ПМД, обрабатываемых в них, может привести к значительнымнегативным последствиям для пациентов). С помощью архиватора ПМД пациента упаковываются в архив, доступ к которому будет иметь только пациент. Архиватор состоит из аппаратной части (системы контроля доступа путем идентификации личности пациента по рисунку радужной оболочки глаза(радужки) Panasonic BM-ET500) и программного обеспечения NPack. Архиватор хорошо известен в Беларуси с 2013 года (дата

первой публикации [16]в журнале о нём), опробован на ряде белорусских предприятий энергетической отрасли для передачи технико-экономических показателей теплоэлектроцентралей. Работы по модернизации архиватора продолжаются в части замены системы Panasonic BM-ET500 на более современную и дешёвую и активно публикуются [15–18].

Заложенная в архиваторе технология аутентификации личности пациента проста: полученное изображение радужки сравнивается с хранящимся в базе архиватора изображением. Уровень традиционные способы защиты ПМД пациента во много раз выше, чем у защиты традиционными способами (см. п. 2 выше), поскольку в этом случае полностью исключается утечка данных для пациента через работников медучреждения. Однако возникает вопрос: не слишком ли дорого стоит для пациента аутентификации его личности по радужке? Предварительные расчёты показывают, что при хранении в базе архиватора в течение трёх лет примерно 2000 изображений радужки стоимость аутентификации, включающая затраты на покупку и эксплуатацию архиватора, для одного пациента составит примерно 50 $.

Выводы

Чтобы минимально защитить конфиденциальные ПМД, нужно отказаться от всевозможных бумажных носителей медицинских данных и перейти на электронные. К сожалению, в части внедрения электронных медицинских карт Беларусь намного отстаёт от России. Отставание имеется и в части законодательства.

При исключении бумажной документации в медучреждении защиту ПМД в ЛВС медицинского учреждения традиционными методами (см. п. 2 выше) можно считать достаточной, а, главное, дешёвой. Естественно, однако, что в этом случае стопроцентной гарантии исключения утечки данных для пациента через работников медучреждения нет.

Наиболее материально обеспеченные пациенты могут достичь более высокого уровня защиты своих ПМД аутентификациейза умеренную плату своей личности по радужкес помощью описанного в [15] архиватора.Воспользоваться аутентификацией по радужке могут и менее обеспеченные пациенты, если нарушение заданной характеристики безопасности ПМД, обрабатываемых традиционными методами, может привести к значительным негативным последствиям для таких пациентов.

Библиографический список

1. Электронная медицинская карта (ЭМК) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: swan-it.ru/elektronnoe_zdravoohranenie/elektronnaya_meditsinskaya_karta.– Дата доступа 25.12.2017.
2. Рецепт — Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рецепт. – Дата доступа 25.12.2017.
3. Медицинская документация отчетная - это... Что такое ... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dic.academic.ru/dic.nsf/medic2/26580. – Дата доступа 25.12.2017.
4. Защита персональных данных в медицинских учреждениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bit-medic.ru/articles/zashita-personalnyh-dannyh/. – Дата доступа 25.12.2017.
5. О чём молчат сотрудники похоронных бюро? Беларускіянавіны – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.newsby.org/by/2011/08/11/text20890.htm. – Дата доступа: 25.12.2017.
6. Защита персональных медицинских данных в автоматизированных медицинских системах лечебно-профилактических учреждений / В. Д. Зыков, Р. В. Мещеряков, К. О. Беляков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 1 (19). – Часть 2 (июнь). –С. 67–70.
7. Электронная медицинская карта. Введение в картотеку « e-Gov.by ... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: e-gov.by/stroitelstvo-e-gov/elektronnaya-medicinskaya-karta-vvedenie-v-kartoteku. – Дата доступа 25.12.2017.

8 Электронная медицинская карта (ЭМК) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: swan-it.ru/elektronnoe_zdravoohranenie/elektronnaya_ meditsinskaya_karta. – Дата доступа 25.12.2017.

9. РИАМС «ПроМед [Электронный ресурс]. – Режим доступа: swan-it.ru/elektronnoe_zdravoohranenie/riams_promed. – Дата доступа 25.12.2017.

10. Что представляет собой RobomedNetwork? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://robomed.io/ru/. – Дата доступа 25.12.2017.

11. Электронная медицинская карта пациента, амбулаторного ... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://robo-med.com/articles/elektronnaya-meditsinskaya-karta/. – Дата доступа 25.12.2017.

12. Введение - StudFiles.net [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfiles.net/preview/6006132/.– Дата доступа 25.12.2017.

13. Методические рекомендации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mz26.ru/netcat_files/140/195/h_3ff46872330d31a54a05a11434a0f613.– Дата доступа 25.12.2017.

14. Образцы организационно-распорядительных документов ... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://miacso.ru/Documents/images/Site/Obrazi_dok_po_ORD_3.doc.– Дата доступа 25.12.2017.

15. Гивойно, А.А. Защита медицинских данных пациентов / А. А. Гивойно, В. Н. Ростовцев // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 79–83.

16. Безопасное архивирование данных с помощью биометрических технологий / А. А. Гивойно, С. В. Нестерович, Г. В. Сечко, Т. Г. // Весніксувязі. – 2013. – № 6 (122). – С. 25–28.

17. Повышение информационной безопасности заархивированной информации / А. А. Гивойно, Г. В. Сечко, Т. Г. // Актуальные вопросы образования и науки: научный журнал. – М.- Архангельск: Архангельский институт управления, 2013. – № 3–4 (37–38). – С. 80–83.

18. Сравнение алгоритмов работы архиватора, использующего различные способы идентификации личности по радужке / А. А. Гивойно, Г. В. Сечко, Т. Г.// Материалы XXI МНТК «Информационные системы и технологии» (ИСТ–2015), Нижний Новгород (17 апреля 2015 г.). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2015. – С. 308.

V.L. Nikolaenko, A.A. Okhrimenko, V.I. Pachynin,
G.V. Sechko, T.G. Tabolich, I.I. Shpak

SECURITY OF THE PERSONAL MEDICAL DATA IN REPUBLIC OF BELARUS

Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics

There is analyzing of the terminology in sphere of patient personal data. This data will be called as personal medical data. Traditional ways of personal medical data security are considered. The level of security by those ways is considered as well. There is proposal of using Belarusian biometric data access control facilities for the purpose of increase the level of high-income patient personal data security.

Key words: medicine, personal medical data security, traditional ways of personal medical data security, biometric data access control facilities.

УДК 004.93

И.А. Сафронова, Д.С. Крупнова, Э.С. Соколова, П.А. Шагалова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ К МЕДИЦИНСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено исследование алгоритмов сегментации изображений. Рассмотрено применение метода активных контурови метода маркерного водораздела к медицинским изображениям с целью распознавания объектов.

Ключевые слова: распознавание изображений, контурный анализ, метод активных контуров, сегментация изображений, метод водоразделов.

Разделение соприкасающихся объектов на изображении является одной из важных задач обработки изображений.Существует много изображений, которые содержат исследуемый объект достаточно однородной яркости на фоне другой яркости. Примером могут служить различные медицинские изображения, или рукописный текст. Если яркости точек объекта резко отличаются от яркостей точек фона, то решение задачи установления порога является несложной задачей. На практике это не так просто, поскольку исследуемое изображение подвергается воздействию шума и на нем допускается некоторый разброс значений яркости.

При детальном изучении любого объекта в сознании человека сформировывается определенный образ. А в момент восприятия глаз прослеживает границу контура, вследствии чего складывается образ с определенными подробностями. Часто полагают, что в момент восприятияскладываются два образа: граница и внутренняя часть изображения.

Контурный анализ в статье [1] определяют, как объединение методов выделения, описания и преобразования контуров изображений и распознавания зрительных образов. Контур служит для полного выделения границ между объектами на изображении, а также содержит нужные данные для распознавания изображений по форме.

В контурном анализе контур зашифровывается в виде последовательности комплексных чисел. На контуре определяется точка, которая носит название начальной точки. После этого контур огибается (например, почасовой стрелке), и каждый вектор смещения записывается в виде комплексного числа $a + ib$, где a — смещение точки по оси x, b — смещение точки по оси y. Смещение определяется относительно предыдущей точки (рис. 1).

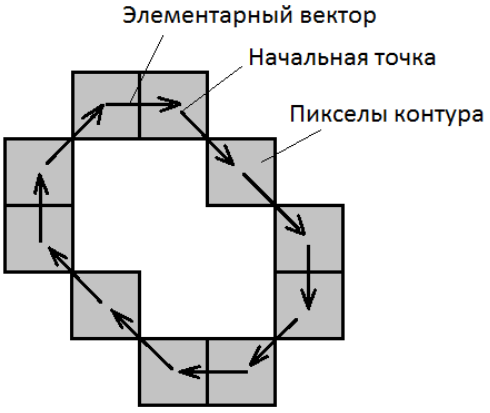


Рис.1 Кодирование контура

В данной работе был проанализирован и применен для распознавания изображений кристаллических структур биологических жидкостей наиболее эффективный метод контурного анализа - метод активных контуров.

Активный контур представляет собойкривую линию, эволюционирующую в таком направлении, чтобы наилучшим образом повторитьконтур выделенного объекта, то есть он как бы стягивается к границам объекта. При таком подходе критерием остановки активного контура и прекращения процесса его дальнейшего изменения является достижение заданного значения градиента яркости между объектом и фоном.

Алгоритм этого метода заключается в следующем (рис.2):

- на изображении в случайном порядке расставляются несколько точек вокруг диагностируемого объекта (рис.2.а);
- после этого строится замкнутый контур(рис.2.б);
- затем он деформируется для задания области объекта (рис.2.в);
- после чего, точки в контуре стремятся к границе контура объекта (рис.2.г).

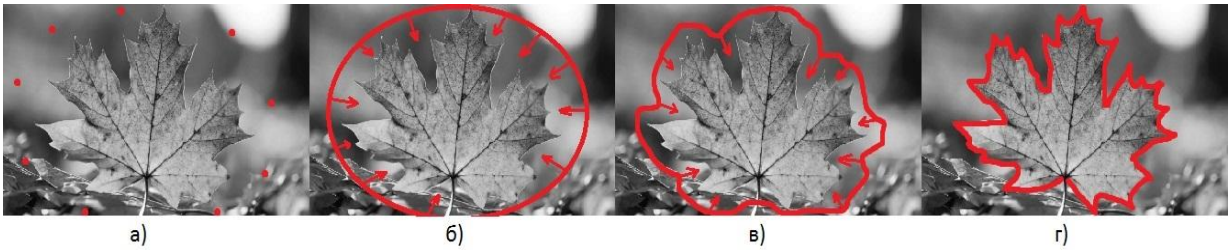


Рис.2 Метод активных контуров, а) точки вокруг объекта, б) образование замкнутого контура, в) изменение контура согласно границам объекта, г) определение четких границ объекта

Целью данного исследования является обнаружение конкреций на медицинских изображениях. Сложность распознавания конкреций на исследуемых изображениях состоит в том, что конкреции не имеют четких контуров и незначительно отличаются по цвету и яркости от окружающего их пространства [2]. На рис. 3 представлен пример исследуемого изображения, конкреции сосредоточены ближе к внешнему контуру окружности, это эллипсы, окруженные чуть более темным фоном.

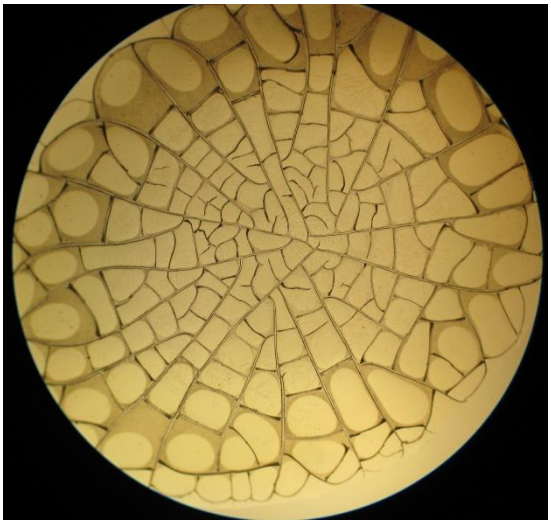


Рис.3 Исследуемое изображение

Исследования показали, что применение метода активных контуров для поиска конкреций на полном изображении кристаллизованной капли сыворотки кровиявляется неэффективным. Поэтому было принято решение разбить изображение на сегменты, содержащие конкреции, а потом к сегментам применить метод активных контуров.

В качестве алгоритма сегментации изображения был выбран метод маркерного водораздела, рассмотрим его подробнее. В данном методе изображение принято рассматривать как карту местности. В географии водоразделом называется некий хребет, который делит области различных речных систем. Значение яркости каждого пикселя принято определять, как его высоту по отношению к некоторому уровню. В этом случае на поверхности можно обнаружить три типа точек:

- точки локального минимума;
- точки, находящиеся на склоне, с которых вода сливается к центру водоема;
- точки, находящиеся на гребне возвышенности.

Если топографический ландшафт постепенно заполнять водой, то сначала будут образованы бассейны (на самых низких уровнях), затем эти бассейны будут разрастаться, и когда они вырастут до определенного уровня «сухими» останутся только водоразделы. Таким образом наша карта местности будет разделена на сегменты, ограниченные водоразделами. Этот метод был выбран именно потому, что он позволяет сегментировать изображение с учетом контуров объектов, а не только по яркости и цвету проанализированных пикселей.

Метод маркерного водораздела является одним из наиболее эффективных методов сегментации изображений. В статье [3] общий алгоритм этого метода описывается следующими шагами:

1 Считывание цветного изображения и преобразование его в полутоновое.
2 Использование значения градиента в качестве функции сегментации.
3 Маркировка объектов переднего плана.
4 Вычисление маркеров фона.
5 Поиск сегментовпо методу маркерного водораздела на основании модифицированной функции сегментации.
6 Визуализация результата обработки.

Рассмотрим результаты применения алгоритма маркерного водораздела к медицинским изображениям. На рис. 4 представлен результат сегментации исследуемого изображения, наложенный на исходное изображение в полупрозрачном режиме. Области изображения, отмеченные разными цветами (имеющие разную яркость), являются сегментами.

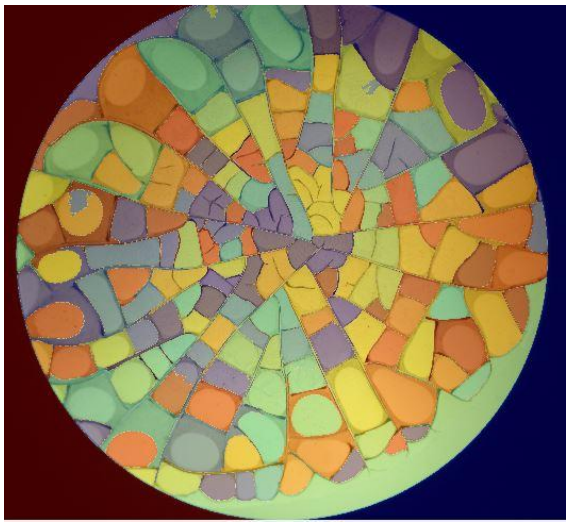


Рис.4 Результат сегментации, наложенный на исходное изображение в полупрозрачном режиме

На рис. 4 видно, что алгоритм маркерного водораздела позволил разбить изображение на сегменты по контурам, образованным радиальными линиями и границами объектов. Кроме того, удалось распознать некоторые конкреции. Для дальнейшего исследования необходимо сохранить каждый сегмент исходного изображения как отдельное изображение. На основе вычисления опоясывающего контура для каждого сегмента изображения отдельных сегментов вырезаются из исходного изображения. На рис.5 представлены примеры полученных отдельных сегментов.

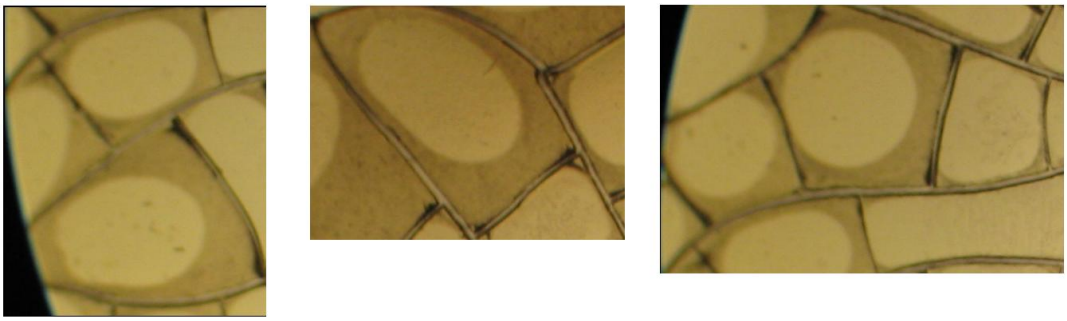


Рис.5Примеры сегментов

Далее, к полученным изображениям отдельных сегментов был применен метод активных контуров с целью поиска на них конкреций. Для автоматизации процессабыло принято решение реализовать расстановку точек случайным образомв разных местах вокруг исследуемого объекта и запустить алгоритм активных контуров для каждого случая. На рисунке 6 представлен результат работы алгоритма при расстановке точек вокруг центра изображения.

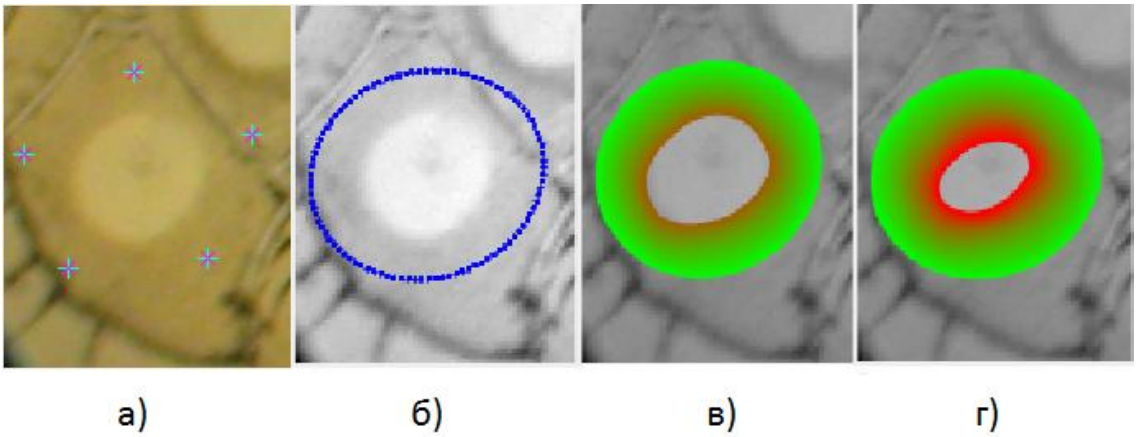


Рис. 6 Результат применения метода активных контуров к отдельному сегменту исследуемого изображения

В данном примере все точки расставлены вокруг центра искомой конкреции примерно на одинаковых расстояниях, и в результате применения алгоритма активных контуров конкреция на отдельных сегментах изображений найдена. Этот случай поиска конкреций является успешным. В случае, когда исходные точки расставлены ближе к какому-либо краю изображения, или часть точек попадает внутрь искомой конкреции, а часть лежит снаружи, реализация метода активных контуров не дает желаемого результата. Именно поэтому было реализовано автоматическое расставление точек в разных областях изображения и запуск алгоритма для различных вариантов расстановки точек.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что применение метода активных контуров к сегментированным изображениям позволяет найти конкреции, в отличие от применения этого метода к полноразмерным снимкам. Но, стоит заметить, что результативность алгоритма при сегментации зависит от месторасположения изначально расставленных точек, которые могут влиять на точность распознавания границ конкреций на изображениях.

Следующим этапом исследований в области распознавания конкреций на медицинских изображениях будет адаптация метода активных контуров для решения поставленных задач при помощи увеличения резкости бинаризованных изображений, а также будет автоматизирован процесс выбора наилучшего варианта расположения точек на изображении при помощи использования геометрических особенностей конкреции (компактность, центр масс и т.д.).

Библиографический список

1. Булов, Ю.С. Обзор основных методов контурного анализа для выделения контуров движущихся объектов / Ю.С.Булов, И.О.Сакович // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. №12. URL: http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1280.html.
2. Краевой, С.А. Диагностика по капле крови. Кристаллизация биожидкостей / С.А.Краевой, Н.А.Колотовой. – Москва, 2013. №1.
3. И.М.Журавель "Краткий курс теории обработки изображений"[Электронный ресурс]/ Matlab.Exponenta–Режим доступа:http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/48.php

I.A. Safronova, D.S. Krupnova, E.S. Sokolova, P.A. Shagalova

APPLICATION OF METHODS OF RECOGNITION OBJECTS TO MEDICAL IMAGES

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The article presents the investigation of image segmentation algorithms. Application of the method of active contours and the method of marker watershed to medical images for the purpose of object recognition.

Keywords: image recognition, contour analysis, active contour method, image segmentation, segmentation of watershed.

УДК 004.93'1

А.А. Сухов, А.И. Тюрин

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ ЧЕЛОВЕКА НА ВИДЕОПОТОКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Цель работы: создать систему распознавания эмоций человека на видеопотоке, с применением сверточной нейронной сети, и протестировать её
Методология: использовалась подготовленная база образовFER2013, и готовая библиотека OpenCV, создание топологии сверточной нейронной сети производилась на языке Python.
Результаты: после тестирования системы были выявлены недостатки базы образов и топологии сети, ошибка распознавания составила 20% для нейтральной эмоции, 10% для радости, 50% для гнева, 69% для грусти, 63% для страха и 30% для удивления
Последующая работа: основываясь на полученных выводах, планируется исправить недостатки базы образов и топологии сети для достижения большей точности распознавания эмоций.
Ключевые слова: распознавание эмоций, топология сети, свёрточная нейронная сеть, сверточный слой, слой подвыборки, база образов.

Введение

Сейчас во всем мире идет массовое изучение и разработка искусственных нейронных сетей, не обошли они и такую сферу как компьютерное зрение. Данное направление изучения нейронных сетей находит применение во множестве областей, например, таких как:

- Взаимодействие человека с компьютером
- Социальная аналитика
- Медицина
- Робототехника

В этой статье будет описано использованиесверточнойнейронной сети в задаче распознавания эмоций по изображению лица человека на видеопотоке. Данная тема актуальна, так как на текущий момент не удается реализовать систему с достаточно высокой точностью распознавания, и работа по данному направлению может помочь в построении систем, которые минимизируют ошибку в задачах определения эмоций.

Разработка системы

Для разработки данной системы были использованы:

- Язык программирования Python для построения приложения и топологии сверточной нейронной сети;
- Набор образов FER2013 для обучающей выборки;
- Библиотека OpenCV для захвата изображения и определения лицевой области с видеопотока при помощи метода Виолы-Джонса.

Обучение производилось с помощью базы образов FER2013. Данная база образов содержит 35887 предварительно обрезанных изображений размером 48x48, все изображения в серых тонах. Каждое изображение лица имеет отметку эмоции, к которой оно относится. Всего в сети присутствуют 7 типов эмоций: гнев, отвращение, страх, счастье, грусть, удивление и нейтральная эмоция.

В данном наборе образов оказалось очень мало экземпляров эмоции «отвращение», поэтому она была исключена из обучения. Таким образом для обучения использовалось 28700 изображений и 3589 были использованы в выборке для тестирования. Пример образов представлен на рис. 1.

Рис. 1. Пример изображений из базы образовFER2013

Для обучения была выбрана архитектура сверточной нейронной сети из 3-х блоков, каждый из которых состоит из 3-х сверточных слоев, 1 слоя подвыборки и слоя регуляризации (с вероятностью 25%).На выходе сети - 2 полносвязных слоя, слой регуляризации (с вероятностью 50%) и слой с 6 нейронами для вывода результата. На вход сети подаются изображения размером 48x48 в серых тонах.

Первый блок содержит сверточные слои имеющие 32 карты признаков и ядро свертки 3x3. На слое подвыборки, уменьшение размера 2x2. Второй блок содержит сверточные слои имеющие 64 карты признаков и ядро свертки 3x3, слой подвыборки также имеет размерность 2x2. Третий блок содержит сверточные слои с 128 картами признаков и ядром свертки 3x3, слой подвыборки аналогичный. [2]

Топология сети показана на рис. 2.

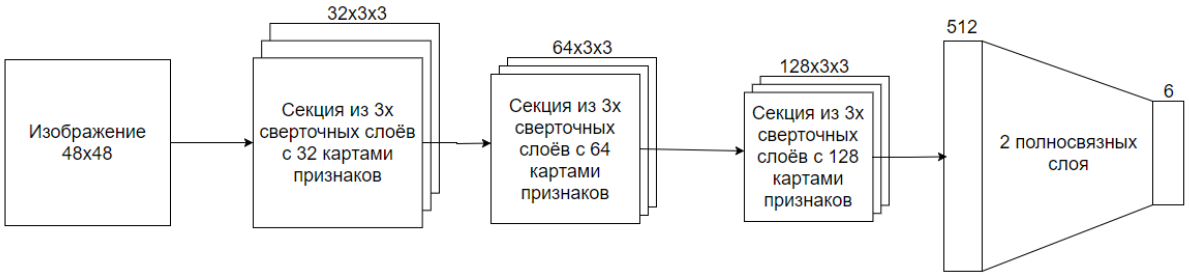


Рис. 2. Топология сверточной нейронной сети

Обучение сети проводилось с помощью технологии CUDA на GPU. Для этого использовалась видеокарта Nvidia GTX 1070, которая имеет 8Gb видеопамяти, что дало высокую скорость обучения ~70 сек\эпоха. Общая продолжительность обучения равная 100 эпохам длилась около одного часа.

В работе была использована библиотека OpenCV – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения [1].

С помощью данной библиотеки при использовании метода Виолы-Джонса, на видеопотоке находится лицевая область, затем она вырезается и обрабатывается – переводится из цветного формата в черно-белый, изменяется в размерах и подается на вход нейронной сети, нейронная сеть обрабатывает изображение и подает на выход определённую эмоцию, которая выводится на экран.

Результат обучения

После обучения сверточнойнейронной сети, написания интерфейса и объединения их в одно приложение полученная система была протестирована. Результат работы системы представлен в табл. 1.

Таблица 1. Таблица смежности эмоций в процентах. (Строки – реальная эмоция, столбцы – определенная эмоция)

	Нейтрал.	Радость	Гнев	Грусть	Удивление	Страх
Нейтрал.	80	7	4	4	2	3
Радость	7	90	1	0	2	0
Гнев	26	5	50	7	3	9
Грусть	39	8	12	31	0	10
Удивление	12	6	3	2	70	7
Страх	26	5	14	7	11	37

Конечная точность распознавания эмоций:

- Нейтральная – 80%
- Радость – 90%
- Гнев – 50%
- Грусть – 31%
- Удивление – 70%
- Страх – 37%

Из результатов тестирования видно, что система имеет низкую точность распознавания таких эмоций, как гнев, удивление, грусть и страх. Смещение происходит в сторону нейтральной эмоции. В дальнейшем планируется уменьшить количество изображений нейтральной эмоции в обучающей выборке, а также добавить изображения плохо определяемых эмоций.

Заключение

В ходе исследования была обучена сверточная нейронная сеть и построена система определения эмоций на видеопотоке по изображению лица человека. После тестирования были выяснены недостатки базы образов FER2013, а также архитектуры нейронной сети которые будут исправлены в дальнейшей работе.

Библиографический список

1. Владимир. OpenCV шаг за шагом. [Электронный ресурс] / Электронный курс – Россия, 2010-2011 – Режим доступа: http://robocraft.ru/page/opencv/, свободный

2. Созыкин Андрей. Курс лекций по обучению нейронных сетей. [Электронный ресурс] / Электронный курс– Россия, 2017 – Режим доступа: https://www.asozykin.ru , свободный.

A.A. Sukhov, A.I. Tyurin

CONSTRUCTION OF THE SYSTEM OF RECOGNITION OF HUMAN EMOTIONS ON THE VIDEO STREAM

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

The purpose of the work: to create a system for recognizing human emotions on a video stream, using a convolutional neural network, and to test it.

Methodology: the prepared image database FER2013 was used, and the finished OpenCV library, creation of the topology of the convolutional neural network was performed in the Python language.

Results: After testing the system, shortcomings in the image database and network topology were revealed, recognition error was 20% for neutral emotion, 10% for joy, 50% for anger, 69% for sadness, 63% for fear and 30% for surprise.

Subsequent work: Based on the findings, it is planned to correct the shortcomings of the image base and the network topology to achieve greater accuracy in the recognition of emotions.

Key words: emotion recognition, network topology, convolutional neural network, convolution layer, sub-sample layer, image base.

УДК 519.876.5

М.М. Гордеев, А.Н. Санников, А.И. Тюрин

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Целью настоящей исследовательской работы является реализация алгоритма графовой модели электрической сети путем применения алгоритма балансировки. Новизной данного исследования является построение визуализированной модели данного графа сети, а так же реализация приложения, позволяющего взаимодействовать с другими программными платформами, в том числе MatLab. Основываясь на результатах, дальнейшая практическая деятельность будет заключаться в построении интеллектуальной энергосистемы, равномерно распределяющей потоки энергии от производителя до потребителя.

Ключевые слова: граф, электрическая сеть, балансировка нагрузки, визуализация графа, SmartGrid.

Введение

Графовая абстракция - это мощный инструмент решения задач, используемый для описания отношений между различными дискретными объектами. Моделирование графов используется в различных областях, например таких, как маршрутизация пакетов в Интернете с использованием алгоритмов нахождения кратчайших путей, проектирование телефонной сети, системы сборки программного обеспечения, системы автоматизированного планирования дорожного маршрута, научные вычисления и т. п. Достоинством графовой абстракции является тот факт, что найденное решение проблемы теории графов может быть использовано в широком диапазоне прикладных областей.Помимо этого графы являются топологическими моделями схем электрических цепей и могут использоваться как основа для разработки интеллектуальных алгоритмов управления в энергосистемах нового поколения «умных сетей».

Актуальность

Интеллектуальные энергосистемы Smart Grid – системы, предназначенные для распределения электроэнергии от производителя до потребителя. Главным преимуществом «умных сетей» является то, что система самостоятельно отслеживает потоки электроэнергии и распределяет их таким образом, чтобы максимизировать эффективность использования. В современном мире, где одним из главных приоритетов является защита природных ресурсов, возникает потребность в рациональном использовании электроэнергии, что и обеспечивают интеллектуальные энергосистемы. Smart Grid наилучшим образом зарекомендовала себя в странах Европы и Америки, однако на данный момент данная система не имеет аналогов в России.

Таким образом, актуальность выбранной темы обуславливается потребностью в достижении сбалансированного распределения нагрузки коммутаторов в электросети.

Графовая модель электрической сети

«Smart Grid» - «умные сети», целью которых является обеспечение интеллектуального управления энергосистемами, их насыщение современными средствами диагностики, установление взаимосвязи между InternetofThings и «силовой» электротехникой. Данная концепция необходима для того, чтобы распределительные сети смогли самостоятельно контролировать свое состояние, режим работы электрических линий и подстанций, принимать быстрые решения об эффективном электроснабжении.

«Умная сеть» должна обеспечивать минимальные потери электроэнергии при увеличении потоков по линиям электропередачи из-за роста ее потребления потребителями, выявлять наиболее слабые или аварийноопасные узлы сети, а в случае выхода из строя одного из коммутаторов перестраиваться во избежание сбоя системы в целом.

Для воплощения, разработки и тестирования подобного рода концепции необходимы алгоритмы управления и распределения нагрузки, для создания которых будет использоваться графовая модель.

Графовая интерпретация электрической сети выглядит следующим образом:

- Взвешенный граф содержит узлы, являющиеся коммутаторами сети
- Ребра – длины дорог, маршруты
- Целью является нахождение оптимального расположения ЛЭП, используя алгоритм построения кратчайшего пути в графовой модели
- Необходимо получить минимальные остовные деревья и провести их анализ
- Использование сильных компонентов связности, создание функций для их вычисления для двух случаев – однократного вычисления (граф не меняется) и непрерывное увеличение количества узлов графа.

Визуализация графовой модели электрической сети

Для удобного создания и редактирования графовой модели электрической сети, а так же ее адаптацию под любые задачи и дальнейшее использование в других программных платформах, необходимо визуализировать полученную модель.

Для данной цели необходимо реализовать приложение. Средой разработки данного приложения будет Eclipse. Eclipse - это расширяемая среда разработки (Integrated Development Environment) с открытым исходным кодом. Она развивается и поддерживается Eclipse Foundation, удобна для разработчика и проста в использовании. Eclipse содержит удобные средства для тестирования и отладки приложений, к примеру, пошаговое выполнение программы с отслеживанием изменений всех интересующих переменных.

Вместе с Eclipse, как средой разработки, написанной на Java, будет использоваться JDK. Java Development Kit— бесплатно распространяемый Oracle Corporation комплект разработчика приложений на языке Java, включающий в себя компилятор Java (javac), стандартные библиотеки классов Java, примеры, документацию, различные утилиты и исполнительную систему Java (JRE).

В качестве языка программирования при разработке будет использоваться Java. Это объектно-ориентированный язык программирования, разработанный компанией Sun Microsystems. Приложения на Java обычно компилируются в специальный байт-код, поэтому они могут работать на любой виртуальной Java-машине (JVM) независимо от компьютерной архитектуры. В этом и состоит одно из главных преимуществ использования этого языка, а именно – в полной независимости байт-кода от операционной системы и оборудования. Это позволяет выполнять Java-приложения на любом устройстве, для которого существует соответствующая виртуальная машина.

Разрабатываемое приложение по визуализации электрической сети имеет вспомогательный пользователю функционал, а именно масштабирование изображения, функции ориентации в пространстве. Для каждой из вершин существует возможность добавления ее характеристик, таких как вес вершины, название и прочие параметры. Так же предусмотрено использование, как ребер, так и дуг, соединяющих элементы графа. Функционал приложения и визуализированный граф представлены на рис.1.

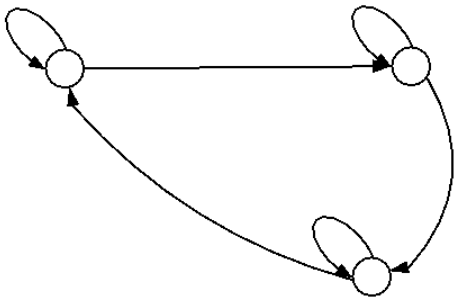


Рис. 1.

Сохранение полученного графа производится в одном из двух форматах *.rgn или *.graphml. Первый позволяет открыть сохраненный граф в приложении в визуализированном виде для дальнейшего его редактирования, второй – предназначен для текстовой интерпретации графа и содержит в список ребер и вершин с соответствующими координатами, а та же параметры элементов графа в формате *«имя параметра»* - *«значение»*. Такой формат удобен при взаимодействии приложения с другими программными платформами, например, такими как MatLab.

Результаты

Таким образом, разработано программное средство визуализации графического представления графов с поддержкой взаимодействия со сторонними приложениями.

Библиографический список:

1. В.Н. Касьянов. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение.// В.Н. Касьянов, В.А. Евстигнеев – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 1104 с;
2. Г. Шилдт. Полный справочник по Java; Java SE 6Edition// ГербердтШилдт - М.: Вильямс, 2007. - 1040 с.;
3. Джереми Сик, Лай - Кван Ли, Эндрю Ламсдэйн.C++ Boost Graph Library//– СПб.:Питер, 2006. – 304 с.

M.M. Gordeev, A.N. Sannikov, A.I. Tyurin

VISUALIZATION OF GRAPH MODELS IN CONTROL TASKS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

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

The purpose of this research work is the implementation of the graph model of the electric network algorithm by applying the balancing algorithm. The novelty of this research is the construction of a visualized model of this graph of the network, as well as the implementation of applications that allow to interact with other software platforms, including MatLab. Based on the results, further practical activities will include the construction of an intelligent power system that evenly distributes energy flows from the producer to the consumer.

Keywords: graph, electric network, load balancing, graph visualization, Smart Grid.

.

УДК 004.023

А. И. Тюрин

ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Модернизация мировой экономики приводит к необходимости пересмотра аспектов функционирования энергетической отрасли. Активное использование информационных технологий в электроэнергетике формируется в концепцию «умных сетей» (Smart Grid), предопределяющую внедрение новых интеллектуальных устройств и алгоритмов управления в существующие электроэнергетические системы. Формулируются задачи управления комплексом устройств нового поколения, определяются требования к интеллектуальным алгоритмам и рассматривается возможность применения точных и эвристических методов решения поставленных задач.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, генетические алгоритмы, электроэнергетические системы, Smart Grid.

Введение

Постоянная модернизация современной экономики, отвечая на вызовы общества, приводит к необходимости пересмотра всех устаревших и неэффективных концепций. Основные проблемы электроэнергетической области РФ можно сформулировать как общее устаревание оборудования, большой процент (больше 60%) выработки электроэнергии на твердотопливных установках с низким КПД, почти полное отсутствие использования альтернативных источников электроэнергии, низкая пропускная способность, надежность и управляемость существующих энергосетей[1]. Все это приводит к негативным экономическим и экологическим последствиям, а также невыполнению обязательств перед некоторыми потребителями электроэнергии. Для решения существующих проблем электроэнергетики и выведения ее на новый, современный уровень была разработана концепция «умных сетей» (SmartGrid). Точное определение концепции пока не сформировано, в общем случае это ставка на сбор и интеллектуальную обработку огромного количества информации внутри электросетей, а также учет массы внешних факторов. По данным IEEE TheIntelliGrids, «Smart Grid» – это новая энергетическая инфраструктура передачи и распределения, которая интегрирует продвижение в коммуникациях, компьютерных системах и электронике для обеспечения требований энергетики будущего. Институт энергетических исследования РАН, определяет SmartGrid как активно– адаптивную сеть (ААС), то есть совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям электрической энергии активных электрических сетей[2]. Одним из основных компонентов новой структуры будут являться интеллектуальные устройства, которые позволят решить существующие проблемы энергосистем, а такжесистема интеллектуального управления комплексом таких устройств.Основными устройствами для модернизации существующих электрических сетей являются различные датчики, позволяющие оперативно получать необходимую информацию обо всех аспектах функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС). Однако, наиболее полезными и перспективными являются устройства, которые предоставляют возможность влиять тем или иным образом на процессы, проходящие в электрической сети.Проектируемое интеллектуальное устройство нового поколения представляет собой твердотельный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения для протяженных и интеллектуальных распределительных электрических сетей классов напряжений 6-20кВ (сокр. ТРВДН) ибудет иметь следующие характеристики изменения параметров сети:

- диапазон регулирования величины выходного напряжения относительно входного U = ± 10%;
- диапазон изменения угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного – φ = ± 5˚;
- дискретность регулирования действующего значения выходного напряжения ΔU – не более 1,5%;
- дискретность изменения сдвига основной гармоники выходного напряжения Δφ – не более 1,5˚.

Включение в схему электрической сети необходимого количества данных устройств позволит динамически изменять ее характеристики и подразумевает необходимость использования системы интеллектуального управления комплексом устройств высшего уровня, которая позволит способствовать модернизации существующих ЭЭС в рамках концепции SmartGrid. Рассмотрим задачи, на решение который направлена разработка системы интеллектуального управления комплексом устройств ТРВДН.

Постановка задач интеллектуального управления

В соответствии с ГОСТ 13109-87 максимальное значение показателя отклонения напряжения δU в электрических сетях с напряжением 6-20 кВ (сетях среднего напряжения) составляет ±10%. Нормальное отклонение показателя лежит в пределах ±5% [3].

Исходя из необходимости соблюдения качества поставляемой электроэнергии, а также повышения экономической эффективности электроэнергетических систем в рамках интеллектуального управления комплексом устройств ТРВДН можно сформулировать две независимые задачи:

Задача №1: Равномерное распределение отклонений по напряжению между всеми узлами (потребителями) электросети.

Задача №2: Минимизация тепловых потерь.

Обе задачи подразумевают выполнение двух ограничений, которые обеспечивают соблюдение стандартов качества электроэнергии и повышают стабильность работы ЭЭС в целом:

1. Исключение отклонения напряжения от номинального на узлах-потребителях электросети более 10%.
2. Соблюдение нагрузочной способности всех узлов и элементов электросети.

Решение поставленных задач будет являться вектор состояний всех устройств ТРВДН в сети, который будет являться основной для отправления непосредственных управляющих сигналов на сами устройства. Соответственно, решение задачи управления необходимо начать с формулирования требований к разрабатываемым алгоритмам управления.

Выбор алгоритмов управления комплексом устройств ТРВДН

Для выбора подходящего интеллектуального алгоритма управления комплексом устройств нового поколения, следует определить требования, которые будут выполняться в рамках управления электроэнергетической системой.

Первое требование выдвигается к *скорости выработки управленческого решения*. Закладывается необходимость соблюдения следующих значений времени принятия управленческого решения:

- 10 минут при работе ЭЭС в рамках штатного режима;
- 0.5 секунды в аварийном режиме;
- 5 секунд – время обновления информации о состоянии ЭЭС на стороне оператора.

Стоит отметить, что при переходе ЭЭС в аварийный режим (пример – короткое замыкание), срабатывают устройства аварийной автоматики и релейной защиты, имеющие во много раз меньшие скорости срабатывания. К примеру, устройство автоматического

ограничения повышения частоты (АОПЧ) имеет время срабатывания измерительного органа по частоте не более 0.1 секунды, при скорости изменения частоты от 1 Гц/с до 10 Гц/с[4].

Данный параметр определяет возможность масштабирования алгоритмов управления, т.е. максимальное количество управляемых устройств в сети. В соответствии с вышесказанным, основным ориентиром является использование устройств ТРВДН в штатном режиме работы ЭЭС, так как при переходе в аварийный режим функции ТРВДН упрощаются ввиду срабатывания устройств релейной защиты и автоматики.

Вторым требованием, которое необходимо определить, является влияние*степени инертности системы на скорость исполнения управленческих решений*. В электрических цепях этим параметром является индуктивность, как мера задержки изменения тока в цепях. Соответственно данный параметр определяет скорость получения обратного отклика ЭЭС на применяемое управляющее воздействие, а также его актуальность на текущий момент времени.

Третьим требованием является *включение возможности быстрой адаптации управленческого решения в ситуации сбоя части системы*. Примерами таких сбоев может являться недоступность связи с частью устройств для передачи управляющих сигналов, задержка в прохождении сигналов, что может вызвать рассинхронизацию в применении управляющих воздействий, а также полное или частичное отсутствие реакции управляющих устройств в случае выхода их из строя. В данном случае необходимо обеспечить механизм диагностики, который позволит отслеживать применение управляющих воздействий в ЭЭС, а также оценивать их эффективность.

Для решения поставленных задач возможно применение точных методов для небольшого количества ТРВДН в сети. Рассмотрим точные методы с точки зрения скорости выработки управленческого решения. Рассчитаем количество состояний ТРВДН для использования алгоритма полного перебора. Исходя из заданных выше характеристик, число значений параметра изменений выходного напряжения с заданным шагом – составляет 14, число значений параметра сдвига основной гармоники выходного напряжения – 7. Количество состояний одного ТРВДН составляет 98.

Число вариантов состояний системы для полного перебора описывается формулой комбинаторики размещений с повторениями:N^k, где N – количество состояний объекта (в нашем случае 98), k – количество объектов в сети.По требованию к интеллектуальным алгоритмам управления, они должны быть масштабируемы до применения в ЭЭС, имеющей 100 управляемых устройств. Таким образом, учитывая размерность, точные методы решения выработки управляющих воздействий подходят лишь для небольшого количества устройств в сети. Для нахождения необходимых управляющих воздействий в рамках выполнения требования к скорости работы алгоритмов необходимо применять эвристический подход. Одним из подходящих инструментов являются генетические алгоритмы.

Рассмотрим простейший случай, когда в сети находятся два ТРВДН. В каждой хромосоме должны быть закодированы все параметры по каждому ТРВДН. Для простоты будем считать, что в ТРВДН два регулирующих параметра: изменение напряжения в % и угол сдвига фаз. Тогда для двух ТРВДН генотип особи будет состоять из четырёх генов – по 2 на каждый ТРВДН. При увеличении количества устройств в электрической сети, генотип будет расти в соотношении 2*k, где k-количество устройств в сети. Кодирование будет осуществляться в двоичном коде, параметр ΔU будет кодироваться четырьмя битами, параметр φ – тремя.

Таблица 1 – Кодирование хромосомы особи в генетическом алгоритме

ΔU_1	φ_1	ΔU_2	φ_2	…	ΔU_k	φ_k
4бита	3 бита	4бита	3 бита		4бита	3 бита

Таким образом, количество состояний каждого ТРВДН при решении задачи генетическим алгоритмом будет составлять 128, и необходима проверка на валидность

полученного решения. С точки зрения последовательности выработки управленческих решений, возможно использованиетрех подходов:

1. итерационный: применяется пошаговая оптимизация. Изменяется состояние одного из управляемых устройств в сети, после этого считывается состояние сети после применения управляющих воздействий и цикл повторяется заново. Условие останова – выполнение граничных условий;
2. одномоментный: вырабатываются и применяются управляющие воздействия для всех управляемых устройств в сети одновременно;
3. смешанный: выделяются определенные кластеры управляющих устройств (например, соответствующие разделению по районам города или питающим электростанциям), в рамках кластеров принимаются решения об изменении состояний всех устройств, входящих в кластер. Для ЭЭС в целом применяется итерационный подход прохода по кластерам устройств в сети.

Выводы

В работе сформулированы задачи интеллектуального управления комплексом устройств нового поколения, позволяющих менять характеристики электроэнергетической системы. Описаны основные параметры данных устройств, требования к алгоритмам управления и возможные решения в виде использования точных методов и генетического алгоритма.

Библиографический список

1. Азнабаева Д.В., Нургалеев Э.Р., Хайбуллина Э.З. Проблемы энергетики в России и зарубежом. Перспективы развития // Символ науки. 2017. №3. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-energetiki-v-rossii-i-zarubezhom-perspektivy-razvitiya (дата обращения: 22.01.2018).
2. Б.Б. Кобец, И.О. Волковой «Видение реализации концепции SmartGrid в России (на основе анализа зарубежных разработок)» URL:http://www.tatgencom.ru(дата обращения: 23.01.2018).
3. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения.
4. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения повышения частоты. Нормы и требования – Москва, 2017г. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_auto_freq_limit.pdf(дата обращения: 27.01.2018).

A.I. Tyurin

PROBLEMSOF INTELLECTUAL CONTROL OF THE COMPLEX OF DEVICES OF NEW GENERATION OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

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

Modernization of the world economy leads to the need to revise aspects of the functioning of the energy sector. The active use of information technologies in the electric power industry is formed in the concept of smart grids, which predetermines the introduction of new intelligent devices and control algorithms into existing electric power systems.Tasks of control of a complex of devices of new generation are formulated, requirements to intellectual algorithms are defined and the possibility of application of exact and heuristic methods of the solution of objectives is considered.

Keywords: intelligent control, genetic algorithms, power systems, Smart Grid.

УДК 004.021, 004.415.2

А.А. Фомичева, Н.Е. Пособилов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РЕКЛАМНЫМИ КАМПАНИЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

В данной работе рассмотрена проблема автоматизации процессов управления рекламными кампаниями, рассмотрена ключевая задача и специфические понятия рекламы. Описаны инструменты для реализации целей рекламной кампании, а так же показаны основные алгоритмы, для реализации автоматизации процесса управления рекламными кампаниями.

Ключевые слова: рекламная кампания, медиапланирование, автоматизация, реклама, стратегия.

Реклама абсолютно любого вида товара либо же услуги состоит из множества компонентов. Ее эффективность, в частности, зависит от некоторых факторов. Сюда, как правило, относят содержание и форму сообщения (подачи информации), соответствие ему средств распространения (это могут быть газеты, журналы, телевидение, радио и так далее), размер, время и общее количество публикаций либо же выход в эфир. Сегодня разработка рекламной кампании – это ответственное мероприятие.

Примечательно, что современная реклама достигает в целом наилучших результатов в том случае, когда имеется целый комплекс положительных решений, то есть когда качественное рекламное сообщение непосредственно доводится до аудитории при помощи самого подходящего и адекватного носителя. В частности, когда избран необходимый размер рекламных носителей, а также наиболее выгодное время и место их расположения, когда правильно рассчитана частота их размещения. При этом каждый неучтенный фактор вполне может повлиять непосредственно на эффективность и продуктивность рекламы самым негативным образом.

Современная кампания рекламная – это, прежде всего, реализация целого комплекса строго спланированных заранее рекламных мероприятий, которые в дальнейшем рассчитаны на определенный период времени, какой-то район действий, некоторую целевую аудиторию.

Управление рекламной кампанией относится к числу важнейших специфических функций рекламного менеджмента.

Разработка рекламной кампании начинается с ситуационного анализа. На основе данных, полученных с его помощью, производится стратегическое планирование рекламной кампании. В рамках планирования определяются такие параметры, как цели, стратегия, время, бюджет (рис.1). Разрабатываются исходные данные (бриф) для медиапланирования и разработки рекламных материалов. К действиям рекламной кампании относят как разработку рекламной кампании, так и собственно ее проведение, а также анализ эффективности проведенной рекламной кампании, ее оценка и коррекция.

При распространении рекламного обращения необходимо выбрать медиаканал.

Медиаканал – носитель рекламной коммуникации, представляющий собой совокупность средств распространения рекламы в пространстве и времени, однотипных с точки зрения способа передачи рекламной информации, и характеризующейся одинаковым типом восприятия аудиторией. Выбор медиаканалов в первую очередь зависит от цели рекламной кампании. Исходя из проблемы создания рекламных кампаний с максимальной эффективностью и минимальными затратами для конкретной области требуется создание общего алгоритма автоматизации процесса управления информационной системой (рис.2).

Автоматизированная информационная система предназначена для обработки статистических данных по целевым аудиториям, рейтингу и стоимости рекламы, а также выдает рекомендации в виде определенных рекламных предложений для конкретного потребителя.

Рис. 1. Этапы рекламной кампании

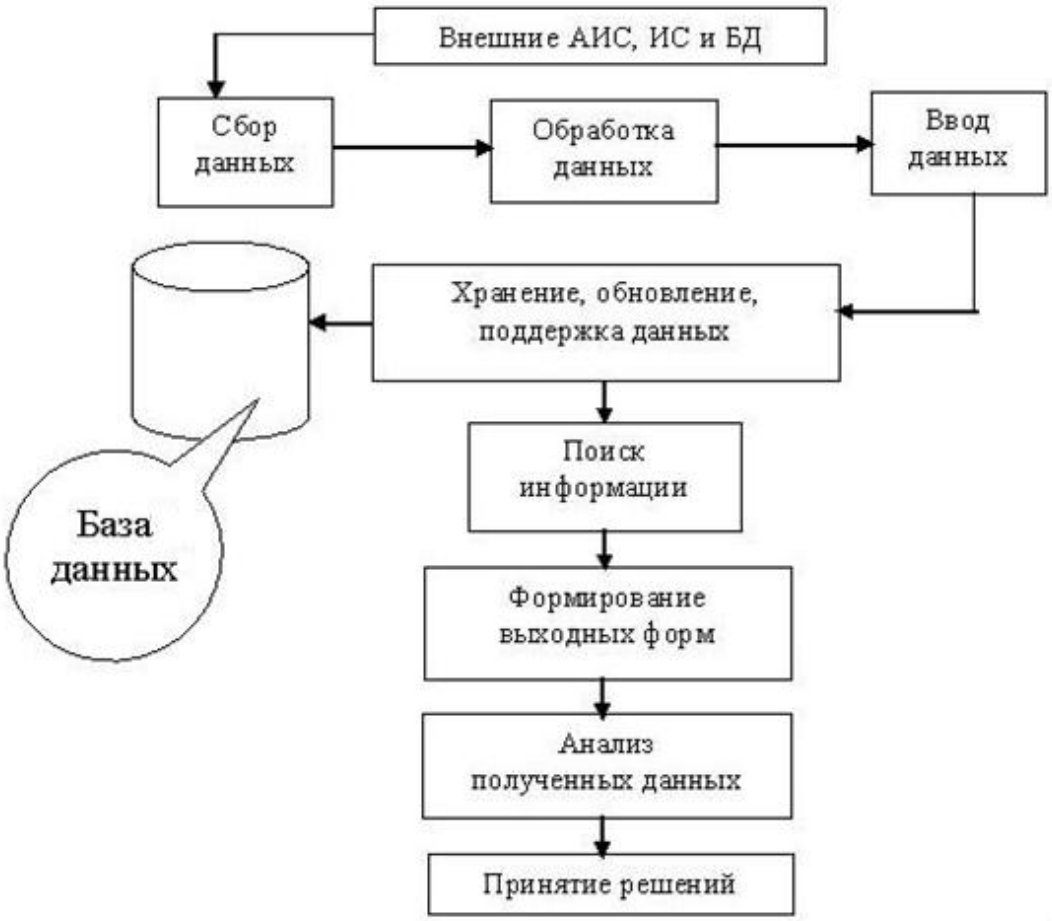


Рис. 2. Общий алгоритм управления ИС

Таблица 1

Цели и инструменты рекламных кампаний

Цель	Инструменты
Вывод бренда/товара на рынок – «запуск»	Использование медиамикса - комплекса СМИ разных типов: – ТВ-реклама; – комплексный видеообраз (зрение+слух); – Радиореклама – аудиообраз (слух); – Интернет (зрение+слух), -наружная реклама, пресса (зрение) – визуальный образ; – BTL (дегустации, раздача образцов)
Стимулирование сбыта	– растяжки (перетяжки) – рекламные баннеры – радио – интернет-баннеры на рейтинговых порталах.
Формирование имиджа бренда	– наружная реклама; – ТВ; – прокат имиджевых видеороликов; -Интернет(баннерная реклама на рейтинговыхресурсах) – глянцевые журналы – организация тематических мероприятий.
Информирование потенциальных потребителей о появлении нового продукта/услуги, его преимуществах и полезных качествах.	– размещение информационных материалов в газетах и журналах; –интернет-реклама – с переходом на сайт рекламодателя или отдельную страницу с подробным описанием; – BTL для продуктовых брендов; – размещение листовок в транспорте; – радио-реклама.

Для более детального рассмотрения последовательности действий, при которой должна быть выбрана наиболее подходящая под запросы потребителя рекламная кампания представлен алгоритм на рисунке 3

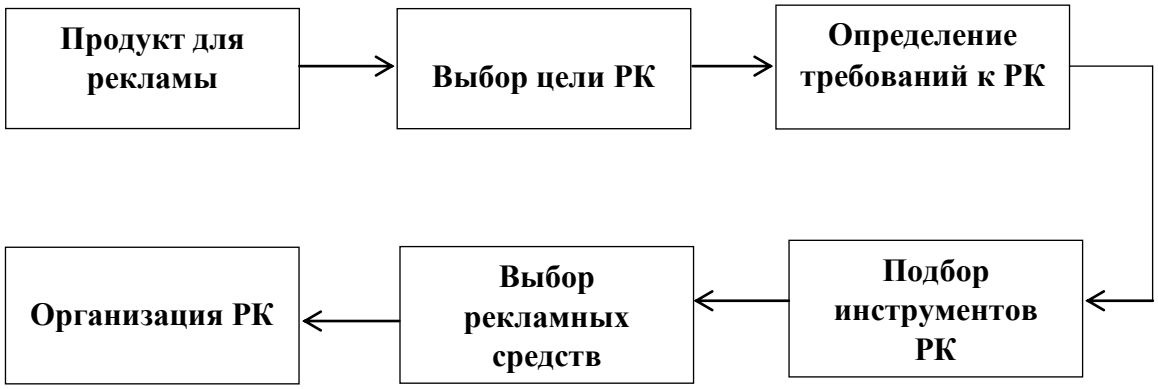


Рис. 3. Алгоритм подбора РК

Следуя данному алгоритму – потребитель приходит в компанию для составления эффективной рекламной кампании по продвижению товара. Далее необходимо определить цель РК, следуя таблицы 1. Следующим шагом вводится ограничение на бюджет и ориентировочный расчет целевой аудитории, а затем происходит подбор инструментов для проведения рекламной кампании, согласно видам из Международной Рекламной ассоциации (реклама в прессе, печатная реклама, аудиовизуальная реклама, радиореклама, телевизионная реклама, рекламные сувениры, наружная реклама, Интернет-реклама, выставки и ярмарки (PR), почтовая реклама (direct-mark)). Так как каждый из инструментов РК состоит из подвидов рекламы, то система предлагает выбрать рекламные средства для проведения рекламной кампании (например, реклама в прессе делится на рекламные объявления и публикации обзорно-рекламного характера, а печатная реклама – это каталог, проспект, буклет, плакат, листовка) с учетом стоимости их проведения. Если же потребителя не устраивает подобранный вариант, то необходимо проанализировать цели РК, увеличить бюджет или изменить целевую аудиторию.

Выводы

В данной работе предложен алгоритм для автоматизации процесса управления рекламными кампаниями и рассмотрен общий алгоритм работы автоматизированной информационной системы. Однако предложенный подход не учитывает обновление статистики по целевым аудиториям, что является перспективным направлением исследований будущей работы.

Библиографический список

1. Рекламные кампании: стратегия, планирование, реализация, анализ - [Электронный ресурс] / Электронная статья – РФ, 2011 – Режим доступа: http://www.life-marketing.ru/life-marketing/advertising, свободный
2. Казимиров Д.С., исследование возможности автоматизации процессов управления рекламными кампаниями в сети интернет - [Электронныйресурс] / Электроннаястатья – РФ, 2015 – Режимдоступа:http://pandia.ru/text/78/268/47816.php, свободный
3. Вертайм К. Цифровой маркетинг [Текст]/ К. Вертайм, Я. Фенвик. – М.: Изд-во Альпина Паблишер, 2010. – 384 с.
4. Сазонов А., Медиапоказатели - [Электронныйресурс] / Электроннаястатья – РФ, 2016 – Режимдоступа: https://educate.adindex.ru/mediapokazateli-v-mediaplanirovanii.htmlf, свободный
5. Медиапланирование - [Электронныйресурс] / Электронная статья – РФ, 2008 – Режимдоступа:http://www.studmed.ru/view/mediaplanirovanie-osnovnye-media-pokazateli_23b45a7cfe3.html, свободный

A.A. Fomicheva, **N.E. Posobilov**

AUTOMATION OF ADVERTISING CAMPAIGN MANAGEMENT PROCESS

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

In this paper, we consider the problem of automating the management of advertising campaigns, we consider the key task and specific concepts of advertising. The tools for implementing the goals of the advertising campaign are described, as well as basic algorithms for implementing automation of the management of advertising campaigns.

Keywords: advertising campaign, media planning, automation, advertising, strategy.

УДК004.021

Т.И. Балашова, С.Н. Капранов, М.А. Степаненко, В.И. Голованов, М.С. Черныш

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕВОЗОК В ТОВАРОПРОВОДЯЩИХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается проблема оптимизации расходов при организации цепей поставок. Предложена дискретная модель, описывающая товаропроводящую сеть. Записана математическая постановка задачи составления оптимального плана по переводу товаропроводящей сети в состояние с заданным объемом запасов в форме задачи линейного программирования. Приведено краткое описание симплекс-метода и его производительность на модельных данных.

Ключевые слова: управление цепями поставок, товаропроводящая сеть, линейное программирование, симплекс-метод.

Управление цепями поставок (Supply Chain Management – SCM) – это процесс планирования, исполнения и контроля материального и связанных с ним информационного, сервисного и финансового потоков от точки их зарождения до точки конечного потребления, с целью снижения затрат и полного удовлетворения требований клиентов [1].

С изобретением Интернета цепи поставок стали прозрачными, все контрагенты в реальном времени знают своих поставщиков и заказчиков с их текущими возможностями и потребностями. Сквозная реакция и повышение прозрачности грузопотоков позволяют эффективно отрабатывать воздействия рыночных колебаний. При хороших прогнозах спроса это дает бизнесу удивительные результаты. Однако, деятельность каждого звена цепи поставок сопровождается неизбежными потерями, возникающих в основном из-за неточного планирования - нерациональной доставки, лишнего времени хранения и т.д. Их уменьшение с целью получения конкурентного преимущества является актуальной задачей для любой организации.

К настоящему времени развитие цепей поставок на макроуровне привело к образованию сетевых структур, которые называют товаропроводящими сетями. Товаропроводящая сеть (ТПС) – это макрологистическая система, обеспечивающая поставки товаров (продукции и услуг) от поставщиков этих товаров к их потребителям. Элементный состав ТПС включает в себя производственные звенья, склады и транспорт, обеспечивающие перемещение товарных материальных потоков.

В данной работе рассматривается задача перевода ТПС в состояние с заданным объемом запасов продукции за определенное время с минимальными затратами. Для этого необходимо составить план производства и транспортировки товаров, который соответствовал бы возможностям данной сети и удовлетворял запланированный спрос в полном объеме.

Стилизация процессов взаимодействия элементов ТПС в духе представлений математики бесконечного и непрерывного представляет собой нетривиальную задачу, поэтому, с учетом развития современной вычислительной техники, выгоднее перейти прямо к дискретным моделям.

Опишем структуру и поведение ТПС через набор ее состояний в дискретные моменты времени $t = \overline{1,T}$, где T– период планирования.

Пусть сеть обеспечивает движение и производство N^Pвидов товарови состоит из N^V складов, N^Eперевозчиков и N^Mточек производства.

Для каждого вида товара $l = \overline{1,N^P}$ задан объем единицы товара при хранении и транспортировке P_l.

Для каждого$k = \overline{1,N^V}$склада заданы:V_k^{list}– множество видов товаров, которые могут храниться на этом складе;V_k^{max} - максимально допустимыйсуммарный объем запасов всех видов товара;$V_k^l(0)$–начальный объем запасов товараlтипа;$V_k^l(T)$ - требуемый объем запасов товара

*l*типа в конце периода планирования;S_k^V– стоимость 1 дня хранения единицы объема любого вида товара;$C_k^l(t)$ – количество единиц товара *l*вида, проданных в момент времени $t = \overline{1,T}$.

Обозначим за $V_k^l(j)$ -объем запасов товара l вида на складеk в момент времениj. Тогда, чтобы не произошло переполнение или вывоз товаров с пустого склада, необходимо выполнение условий (1) и (2):

$$V_k^l(t) \geq 0, k = \overline{1,N^V}, l \in V_k^{list}, t = \overline{1,T} \quad (1)$$

$$\sum_{l \in V_k} V_k^l(t) \leq V_k^{max}, k = \overline{1,N^V}, t = \overline{1,T} \quad (2)$$

Для $i = \overline{1,N^E}$ перевозчиказаданы: E_i^{list}– множество видов товаров, которые может перевозить данный перевозчик;E_i^{max} – максимально допустимыйсуммарный объем всех видов товаров, который можно отправить данным перевозчиком в один момент времени;Δt_i^E - время доставки; S_k^E– стоимость перевозки единицы объема любого вида товара;

$E_i^{start} \in \overline{0,N^V}$ - номер склада отправления;$E_i^{dest} \in \overline{1,N^V}$ - номер склада назначения, при этом $E_i^{start} \neq E_i^{dest}$.

Обозначим объем товаров*l*вида, отправленныхi перевозчиком в j момент времени $x_i^l(j)$. Тогда необходимо выполнение условий (3) и (4):

$$x_i^l(t) \geq 0, i = \overline{1,N^E}, l \in E_i^{list}, t = \overline{1,T} \quad (3)$$

$$\sum_{l \in E_i} P_l x_i^l(t) \leq E_i^{max}, i = \overline{1,N^E}, t = \overline{1,T} \quad (4)$$

Для каждой точки производства $d = \overline{1,N^M}$заданы:$M_d^{start} \in \overline{1,N^V}$– номер склада, с которого отправляется сырье для производства; $M_d^{dest} \in \overline{1,N^V}$– номер склада, куда доставляется готовая продукция; векторы M_d^{in} и M_d^{out} длины R^{N^P}, определяющие количество сырья каждого типа, которое требуется для одного цикла производства, и количество продукции каждого типа, получаемой в результате его выполнения;S_d^M– стоимость одного цикла производства; Δt_d^M– время одного цикла производства;M_d^{max}– максимальное количество циклов производства, которое возможно запустить в один момент времени.

Обозначим за $y_d(t)$ количество производственных циклов, запущенных в момент времени t в точке производства d. Тогда необходимо выполнение условия (5):

$$0 \leq y_d(t) \leq M_d^{max}, d = \overline{1,N^M}, t = \overline{1,T} \quad (5)$$

Суммарная стоимость производства, перевозки и хранения за весь период планирования является целевой функцией, которую необходимо минимизировать:

$$f = f^M + f^E + f^V \rightarrow min \quad (6)$$

Стоимость производства:

$$f^M = \sum_{d=1}^{N^M} \left(S_d^M \sum_{t=1}^{T} y_d(t) \right) \quad (7)$$

Стоимость перевозок:

$$f^E = \sum_{i=1}^{N^E} \left(S_i^E \sum_{j=1}^{T} \sum_{l \in E_i^{list}} P_l x_i^l(j) \right) \quad (8)$$

Стоимость хранения:

$$f^V = \sum_{k=1}^{N^V} \left(S_k^V \sum_{t=1}^{T} \sum_{l \in V_k^{list}} V_k^l(j) \right) \quad (9)$$

Объем запасов в каждый момент времени равен разности объема привезенных и вывезенных товаров. Выразим $V_k^l(t)$ через $x_i^l(t)$ и $y_d(t)$ с учетом начальных запасов и заданного плана продаж (10):

$$V_k^l(t) = P_l \left(\sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{t} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t} x_i^l(j) - \sum_{j=1}^{t} C_k^l(j) \right) + W_k^l(0) \quad (10)$$

Это выражение можно подставить в условия (1) и (2), а также в целевую функцию (9). Кроме того, так как требуется обеспечить заданные объемы запасов в каждой точке хранения в конце периода планирования, необходимо записать краевые условия (11):

$$V_k^l(T) = P_l \left(\sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{T-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{T} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{T-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{T} x_i^l(j) - \sum_{j=1}^{T} C_k^l(j) \right) + W_k^l(0) \quad (11)$$

Теперь можно записать математическую формулировку оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} f = \sum_{d=1}^{N^M} S_d^M \sum_{t=1}^{T} y_d(t) + \sum_{i=1}^{N^E} S_i^E \sum_{j=1}^{T} \sum_{l \in E_i^{list}} P_l x_i^l(j) + \sum_{k=1}^{N^V} \left(S_k^V \sum_{t=1}^{T} \sum_{l \in V_i^{list}} \left(P_l \left(\sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{t} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t} x_i^l(j) - \sum_{j=1}^{t} C_k^l(j) \right) + W_k^l(0) \right) \right) \to min \\ \sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{t} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t} x_i^l(j) \geq \sum_{j=1}^{t} C_k^l(j) - W_k^l(0), k = \overline{1, N^V}, l \in V_i^{list}, t = \overline{1, T-1} \\ \sum_{l \in V_k^{list}} P_l \left(\sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{t} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{t} x_i^l(j) \right) \leq W_k^{max} + \sum_{l \in V_k} \left(P_l \sum_{j=1}^{t} C_k^l(j) - W_k^l(0) \right), k = \overline{1, N^V}, t = \overline{1, T-1} \\ P_l \left(\sum_{d:M_d^{dest}=k} \sum_{j=1}^{t-\Delta t_i^M} M_d^l y_d(j) - \sum_{i:M_i^{start}=k} \sum_{j=1}^{t} M_d^l y_d(j) + \sum_{i:E_i^{dest}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{T-\Delta t_i^E} x_i^l(j) - \sum_{i:E_i^{start}=k, l \in E_i^{list}} \sum_{j=1}^{T} x_i^l(j) \right) = W_k^l(T) + P_l \sum_{j=1}^{T} C_k^l(j) - W_k^l(0), k = \overline{1, N^V}, l \in V_i^{list} \\ \sum_{l \in E_i^{list}} P_l x_i^l(t) \leq E_i^{max}, i = \overline{1, N^E}, t = \overline{1, T} \\ x_i^l(t) \geq 0, i = \overline{1, N^E}, t = \overline{1, T}, l \in E_i^{list} \\ y_d(t) \leq M_d^{max}, d = \overline{1, N^M}, \ t = \overline{1, T} \\ y_d(t) \geq 0, d = \overline{1, N^M}, \ t = \overline{1, T} \end{cases} \quad (12)$$

Нетрудно заметить, что целевая функция и все ограничения являются линейными, соответственно задача (12) является задачей линейного программирования. Данный вид оптимизационных задач достаточно подробно изучен и рассмотрен в научно-технической литературе. Наиболее распространенным методом решения таких задач является симплекс-метод. Он заключается в движении по ребрам многомерного выпуклого многоугольника, описываемого ограничениями задачи, от одной вершины к другой. При этом, направление движения на каждом шаге выбирается таким образом, чтобы максимально уменьшить значение целевой функции. Для решения задачи линейного программирования с его помощью, сначала необходимо найти начальное допустимое решение, то есть любую вершину многогранника. В некоторых случаях допустимым решением может быть нулевой вектор, тогда первую фазу алгоритма пропускают, однако в нашей модели такое возможно, только если объемы продаж и требуемые в конце периода планирования запасы не превышают начальные запасы в каждой точке хранения.

Для нахождения начального допустимого решения в общем случае решается задача линейного программирования относительно новой целевой функции с предварительным изменением ограничений. В них, согласно определенным правилам, добавляется некоторое количество дополнительных и вспомогательных переменных. В исходный базис выбираются дополнительные переменные с коэффициентом 1 и все вспомогательные.

После того, как было модифицировано условие, создаётся вспомогательная целевая функция. Если вспомогательные переменные были обозначеныкак $z_i, i = \overline{1,m}$то вспомогательную функцию определим, как (13):

$$f' = \sum_{i=1}^{m} z_i \to min \tag{13}$$

Далее используетсяклассический симплекс-метод применительно к вспомогательной целевой функции. Поскольку все вспомогательные переменные увеличивают значение f', в ходе алгоритма они будут поочерёдно выводится из базиса, при этом после каждого перехода новое решение будет всё ближе к множеству допустимых решений.

При нахождении оптимального значения вспомогательной целевой функции, могут возникнуть две ситуации:

1. Оптимальное значение f' больше нуля. Это значит, что как минимум одна из вспомогательных переменных осталась в базисе. В таком случае можно сделать вывод, что допустимых решений данной задачи линейного программирования не существует.
2. Оптимальное значение f' равно нулю. Это означает, что все вспомогательные переменные были выведены из базиса, и текущее решение является допустимым.

Во втором случае мы имеем допустимый базис, или, иначе говоря, исходное допустимое решение.Проводится дальнейшая оптимизация, уже относительно целевой функции (6) и без учета вспомогательных переменных.

Так как идея симплекс-метода имеет комбинаторную природу, тов худшем случае время работы алгоритма будет расти экспоненциально с ростом количества ограничений задачи линейного программирования. Тем не менее, во многих реальных задачах он показывает высокую эффективность.Тестирование симплекс-метода на случайно сгенерированных моделях товаропроводящих сетейпоказало, что время поиска оптимального решения пропорционально O^3, где O- количество ограничений задачи линейного программирования:

$$O = T(N^E + N^M) + (T-1)(1 + \overline{V^{list}})N^V + 2N^V\overline{V^{list}}, \tag{14}$$

где $\overline{V^{list}}$– среднее по всем складам количество видов товаров, которые могут на них храниться. Для одной и той же ТПС время поиска оптимального плана пропорционально T^3.

С развитием информационных технологий растет не только мощность вычислительных средств, позволяющая решать все более сложные задачи, но и размерность самих задач, так как появляется возможность собирать большие объемы информации и описывать более сложные системы, требующие оптимизации процессов, протекающих в них. В частности, некоторые задачи, описывающие существующие ТПС, могут иметь такое большое число ограничений и переменных, что даже при нынешнем уровне развития вычислительной техники не получится найти оптимальное решение за приемлемое время. Задачи линейного программирования встречаются не только при исследовании экономических систем, но и в качестве вспомогательных задач при использовании методов нелинейного программирования, методов решения линейных динамических задач оптимизации и при решении других прикладных задач.

Не удивительно, чтопроблема построения эффективных алгоритмов для решения задач линейного программирования большого размера остается актуальной и ей уделяется большое внимание в литературе.Рассматриваются, в частности, разработка эффективных

вычислительных алгоритмов, как точных, так и эвристических, поиск специальных классов задач, на которых хорошо работают те или иные алгоритмы, разработка и исследование алгоритмов с эффективным распараллеливанием вычислений.

Задачи линейного программирования, описывающие процессы производства и перевозок в ТПС, часто представляют собой разреженные матрицы определенной структуры. Анализу и построению эффективных алгоритмов решения подобных задач посвящены работы [3] и [4].

Библиографический список

1. Логистика. Теория и практика. Управление цепями поставок. Часть 3 / Аникин Б.А., Родкина Т.А. - Изд-во Проспект, 2014 г. - 186с.
2. Канторович Л. В. Математико-экономические работы / Л. В. Канторович. — Новосибирск: Изд-во Наука, 2011. — 760 с. — (Избранные труды).
3. Щербина, О.А. Локальные элиминационные алгоритмы для разреженных задач дискретной оптимизации: дис. д-ра. физ.-мат. наук 05.13.17 / Щербина Олег Александрович; Симферополь. Таврический нац. ун-т. им. Вернадского - 2010. - 361с.
4. Жолудев, А.И. Алгоритмические вопросы решения больших структурных задач линейного программирования: дис. канд. физ.-мат. наук 01.01.10 / Жолудев Анатолий Иванович; Иркутск. Академия наук СССР Сибирское отделение Иркутский вычислительный центр – 1984. – 141с.

T.I. Balashova, S.N. Kapranov, M.A. Stepanenko, V.I. Golovanov, M.S. Chernysh

OPTIMAL PLANNING OF PRODUCTION AND TRANSPORTATION IN COMMODITY SUPPLYING NETWORKS

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

The problem of cost optimization in the organization of supply chains is considered. A discrete model describing the commodity distribution network is proposed. A mathematical formulation of the problem of drawing up an optimal plan for converting a commodity distribution network into a state with a specified volume of reserves in the form of a linear programming problem is described. A brief description of the simplex method and its performance on model data are given.

Key words: supply chain management, commodity distribution network, linear programming, simplex method.

УДК 004.056.55

О.П. Тимофеева, А.А. Частикова, О.Н. Корелин

ИССЛЕДОВАНИЕ, РЕАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Поднимается проблема защиты информации. В качестве варианта ее разрешения предлагается шифрование информации с помощью криптографических алгоритмов. Рассматриваются реализации трех алгоритмов шифрования, относящихся к разным веткам классификации. Основываясь на данных реализациях, производится анализ быстродействия алгоритмов в зависимости от входных параметров: объема исходного текста, длины ключа шифрования.

Ключевые слова: криптография, симметричные алгоритмы шифрования, асимметричные алгоритмы шифрования, ГОСТ 28147-89, RSA, RC4.

Введение

В постоянно развивающемся мире компьютерная информация стала играть важную роль, и все большую актуальность стали приобретать проблемы ее защиты. Защита от каждого вида опасности предполагает собственные решения. Существуют и универсальные подходы, способные обезопасить данные от разных угроз. Изучением подходов к защите информации занимается криптография.

Криптография – это наука о математических методах обеспечения конфиденциальности, с помощью которых последовательность символов, называемых открытым текстом, подвергается некоторому преобразованию с использованием ключа, в результате чего получается закрытый текст, непонятный тому, кто не знает алгоритма шифрования и ключа. Другими словами криптография – это искусство так маскировать сообщение, чтобы понять его мог только адресат. В основе криптографических алгоритмов лежит алгоритмическая теория чисел.

Процесс шифрования делится на две составляющие: кодирование и декодирование.

Как правило, процесс шифрования (кодирования), как и его обратная операция – декодирование, являются достаточно трудоемкими. Для сокращения времени, затрачиваемого на эти операции, было разработано программное обеспечение, реализующее криптографические алгоритмы для сообщения, введенного пользователем. Кроме того, были проанализированы результаты работы алгоритмов шифрования.

Постановка задачи

Для реализации алгоритмов шифрования необходимо решить комплекс задач:

- изучить классификацию алгоритмов шифрования и выбрать представителей видов классификации;
- составить блок-схем выбранных алгоритмов шифрования;
- реализовать алгоритмы шифрования;
- проследить зависимость скорости шифрования каждого из алгоритмов от различных входных параметров (объем исходного текста, длина ключа шифрования).

Исследование алгоритмов шифрования

Основным направлением использования криптографических алгоритмов шифрования является передача конфиденциальной информации по каналам связи. В качестве информации, подлежащей шифрованию и расшифрованию, будет рассматриваться текст, построенный на некотором алфавите. Где алфавит – это конечное множество используемых для кодирования информации знаков. А текст – это упорядоченный набор из элементов алфавита.

Криптосистемы подразделяются на симметричные и асимметричные (или с открытым (публичным) ключом). В симметричных криптосистемах для шифрования и для дешифрования используется один и тот же ключ. В системах с открытым ключом используются два ключа открытый (публичный) и закрытый (секретный), которые математически связаны друг с другом. Информация зашифровывается с помощью открытого ключа, который доступен всем желающим, а расшифровывается с помощью закрытого ключа, известного только получателю сообщения.

1. Симметричные криптосистемы.

Симметричные алгоритмы шифрования подразделяются на блочные и потоковые.

Блочные шифры представляют собой семейство обратимых преобразований блоков (частей фиксированной длины) исходного текста. Фактически блочный шифр – это система подстановки на алфавите блоков. В настоящее время блочные шифры наиболее распространены на практике.

К блочным алгоритмам шифрования относятся: алгоритм *DES*и его модификации; стандарт *AES*, алгоритм *Rijndael*; алгоритм *RC*6; российский стандарт шифрования ГОСТ 28147-89.

Потоковые шифры представляют собой разновидность гаммирования и преобразуют открытый текст в шифрованный последовательно по 1 биту.

К потоковым алгоритмам шифрования относятся: алгоритм *RS*4; алгоритм *SEAL*; алгоритм *WAKE*.

2. Асимметричные криптосистемы.

Асимметричные криптосистемы характеризуются тем, что для шифрования и расшифрования используются разные ключи, связанные между собой некоторой зависимостью. При этом данная зависимость такова, что установить один ключ, зная другой, с вычислительной точки зрения очень трудно.

К асимметричным системам шифрования относятся: криптосистема Эль-Гамаля; криптосистема, основанная на проблеме Диффи-Хеллмана; криптосистема Ривеста-Шамира-Адлемана (*RSA*); криптосистемыМеркля-Хеллмана и Хора-Ривеста; криптосистемы, основанные на эллиптических кривых.

Для дальнейшего исследования необходимо выбрать несколько алгоритмов шифрования. Было решено выбрать два алгоритма симметричных криптосистем (один блочный и один потоковый) и один алгоритм асимметричных криптосистем.

Среди блочных симметричных алгоритмов шифрования был выбран Российский стандарт шифрования ГОСТ 28147-89, так как в нашей стране он носит обязательный характер для учреждений, чья деятельность связана с обеспечением информационной безопасности государства.

Среди потоковых симметричных алгоритмов шифрования был выбран алгоритм *RC4*, так как он приспособлен для программной реализации.

Среди асимметричных алгоритмов шифрования была выбрана криптосистема Ривеста-Шамира-Адлемана (*RSA*) [1][2].

Описание алгоритмов шифрования

ГОСТ 28147-89. В Российской Федерации установлен единый стандарт криптографического преобразования текста для информационных систем. Он носит обязательный характер для государственных органов, организаций, предприятий, банковских и иных учреждений, чья деятельность связана с обеспечением информационной безопасности государства. Данный алгоритм предусматривает несколько режимов работы: режим простой замены (базовый режим), режим гаммирования, режим гаммирования с обратной связью. Реализация осуществлялась для базового режима – режима простой замены, так как данный режим рекомендуется использовать только для шифрования ключевой информации.

На вход подаются ключ *W* длиной 256 бит, представляемый в виде восьми 32-разрядных чисел: $W = X(7)X(6)X(5)X(4)X(3)X(2)X(1)X(0)$ и блок открытого (нешифрованного) текста длиной 64 бита, который разделен на две последовательности $B(0)$ и $A(0)$ по 32 бита.

На выходе получаем блок зашифрованного текста.

Для дешифрования используется тот же ключ, но процесс дешифровки является инверсным по отношению к исходному[3].

Алгоритм RC4. Алгоритм *RC*4 представляет собой потоковый шифр с переменной длиной ключа. Структура алгоритма включает блок замены размерностью 8 × 8: S_0, ..., S_{255}. Блок замены представляет собой зависимую от ключа переменной длины перестановку чисел 0, ..., 255.

Реализация алгоритма происходит в соответствии со следующим планом:

1. Инициализация блока замены.
2. Генерирование псевдослучайного байта.
3. Шифрование текста.

Дешифрование происходит аналогично шифрованию.

На вход подаются массив сгенерированных псевдослучайных байтов и массив исходного текста.

На выходе получаем массив шифрованного текста [4].

Алгоритм RSA. Система *RSA* представляет собой криптосистему, стойкость которой основана на сложности решения задачи разложения числа на простые множители.

Пользователь выбирает пару различных простых чисел p и q, вычисляется $n = pq$ и выбирается число e, такое, при котором

$$\text{НОД}\big(e, \varphi(n)\big) = 1,$$
$$\varphi(n) = (p-1)(q-1),$$

где $\varphi(n)$– функция Эйлера. Затем вычисляется величина d, такая, что $de = 1 \ (mod\ \varphi(n))$.

Реализации алгоритма шифрования и алгоритма дешифрования практически аналогичны, за исключением ключей. Пара ключей (n, e) – называется открытым, или кодирующим ключом криптосистемы *RSA*, а пара (n, d) – секретным, или декодирующим ключом системы шифрования *RSA*.

На вход подается пара ключей (открытая или секретная) и текст (открытый или шифрованный).

На выходе получаем шифрованный или дешифрованный текст [5].

Анализ алгоритмов шифрования

Рассмотрим зависимости скорости шифрования каждого из алгоритмов от размера входного файла и от размера ключа шифрования с помощью реализованного программного обеспечения.

Исследование зависимости скорости шифрования от размера входного файла. Входной файл – это блокнот. В него заносится текст, различный по объему. Далее он шифруется и замеряется затраченное на это время.

Ниже приведены результаты (табл. 1), (рис. 1), отражающие данную зависимость, для каждого из алгоритмов.

Таблица 1.

Зависимость времени шифрования от объема входного файла

Объем входного файла, Кб	Скорость шифрования, с		
	ГОСТ 28147-89	*RC*4	*RSA*
1,56	0,07	0,04	13,04
3,24	0,25	0,08	34,5
8,95	0,45	0,19	73,83
14,50	0,50	0,27	119,19
19,70	0,68	0,43	174,31
32,00	0,90	0,51	284,81
56,20	1,05	0,78	462,46

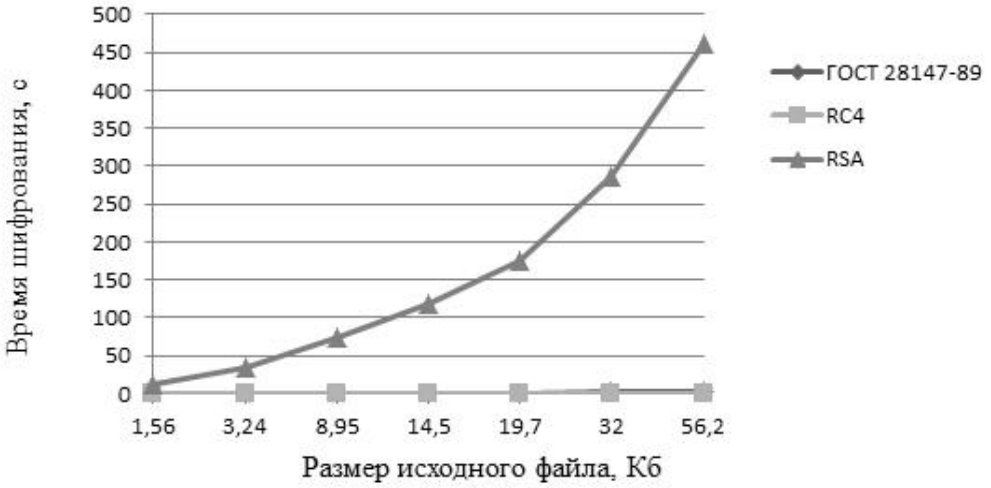


Рис.1 – Зависимость времени шифрования от объема входного файла

Исследование зависимости скорости шифрования от размера ключа. Так как в алгоритме *RSA*используется два ключа (открытый и закрытый), меняем только размер публичного (открытого) ключа.

Ниже приведены результаты (табл. 2), (рис.2), отражающие данную зависимость для каждого из рассматриваемых алгоритмов.

Таблица 2.

Зависимость времени шифрования от размера ключа

Длина ключа, биты	Скорость шифрования, с		
	ГОСТ 28147-89	*RC*4	*RSA*
5	0,9	0,23	0,22
7	0,93	0,26	0,40
9	0,97	0,38	1,08
10	1,46	0,64	3,63
11	1,93	1,31	6,11
12	3,27	2,48	41,55

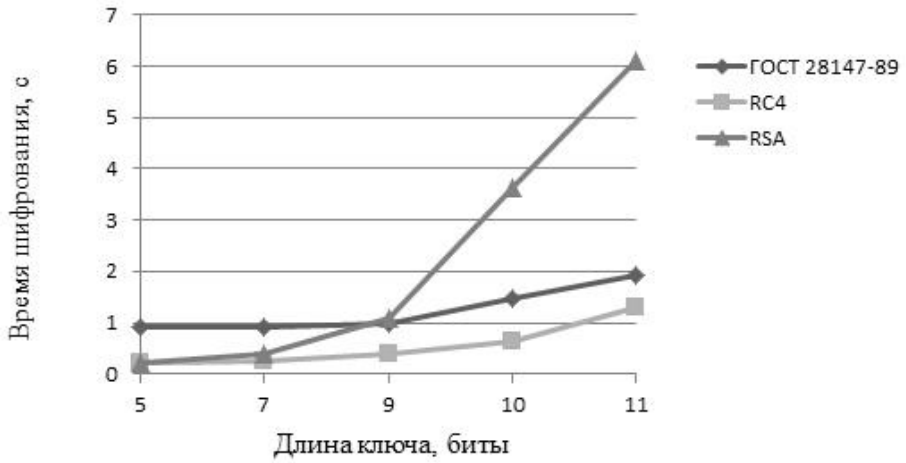


Рис.2 – Зависимость времени шифрования от размера ключа

Выводы

С помощью разработанного программного обеспечения можно автоматизировать процесс шифрования и дешифрования данных достаточно быстро. Для разных алгоритмов скорость шифрования различна и меняется в зависимости от входных параметров. Анализ результатов показывает, что наименьшее время для шифрования сообщений требуется алгоритму *RC*4, причем при любых входных данных. Худшее время шифрования показывает алгоритм *RSA*. Но следует отметить, что время шифрования это лишь одна из характеристик алгоритма шифрования, существуют и другие, например, криптостойкость, оценку которой можно проводить, используя методы криптоанализа. Эти вопросы планируются на дальнейшее исследование.

Библиографический список

1. Баричев С. Г., Гончаров В. В., Серов Р. Е. Основы современной криптографии: Учебный курс. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 175 с.: ил.
2. Яковлев А. В., Безбогов А. А., Родин В. В., Шамкин В. Н. Криптографическая защита информации: учебное пособие – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 140 с.
3. Свободная энциклопедия википедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: *https://ru.wikipedia.org/wiki/ГОСТ_28147-89*
4. Свободная энциклопедия википедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: *https://ru.wikipedia.org/wiki/RC4*
5. Свободная энциклопедия википедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: *https://ru.wikipedia.org/wiki/RSA*

O.P. Timofeeva, A.A. Chastikova, O.N. Korelin

RESEARCH, REALISATION AND ANALYSIS OF ENCRYPTION ALGORITHMS

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

Raised a problem of protection of the information. As an option it is proposed to her permissions information encryption using cryptographic algorithms. Discusses the implementation of the three encryption algorithms belonging to different branches of the classification. Based on these implementations, performance analysis is performed according to the algorithm input parameters: the volume of the original text, the length of the encryption key.

Keywords: cryptography, symmetric encryption algorithms, asymmetric encryption algorithms, GOST 28147-89, RSA, RC4.

УДК 004.728.5

В.Ю. Карпычев, Д.С. Яснев

МОДИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛА UDP ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной статье рассматривается модификация протокола пользовательских дейтаграмм на основе предложенных алгоритмов для повышения эффективности работы этого протокола в системах реального времени путем повышения надежности передачи данных без существенных для систем данного типа потерь скорости передачи данных.

Ключевые слова: системы реального времени, протокол пользовательских дейтаграмм.

Транспортный протокол для передачи данных в реальном времени должен отвечать следующим показателям эффективности, установленным для систем реального времени:

1. Малая задержка отправки и получения пакетов (до 100 мс для процесса отправки и подтверждения доставки)
2. Надежность
   - В случае потери данных, определить этот случай и восстановить их;
   - Осуществлять упорядочивание данных.

Стандартный протокол UDP не отвечает второму показателю эффективности, поэтому необходимо реализовать данный функционал через дополнительные модули.

Модули в системах реального времени зачастую используют встроенное программное обеспечение, требующее отладки. В связи с этим, вторичным показателем эффективности является простота проектирования и реализации протокола.

Модифицированный протокол пользовательских дейтаграмм разделен на три основных модуля: отправка, получение и движок протокола. Задача первых двух заключается в эффективной отправке и получении данных. Они предоставляют возможности настройки для оптимизации производительности протокола в операционной системе. Движок протокола должен реализовывать требования к надежности модифицированного протокола. Структура модулей показана на рис. 1.

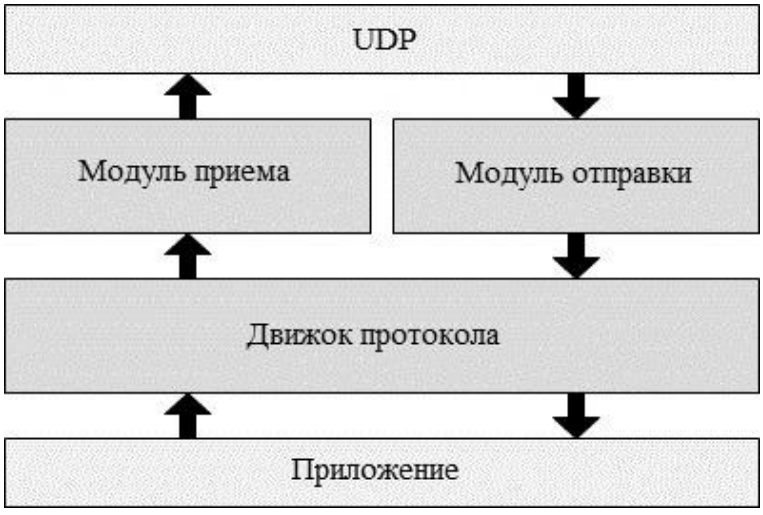


Рис. 1. Модули модифицированного протокола

Обнаружение и восстановление потерянных данных

Для получения информации о том, что данные достигли получателя, необходимо получить подтверждение получателя. Отправитель сохраняет отправленное сообщение в памяти компьютера до тех пор, пока не получит подтверждение об успешной доставке. Если сообщение о выполненной доставке не приходит к отправителю, оно должно быть повторно передано. Данный процесс показан на рис. 2.

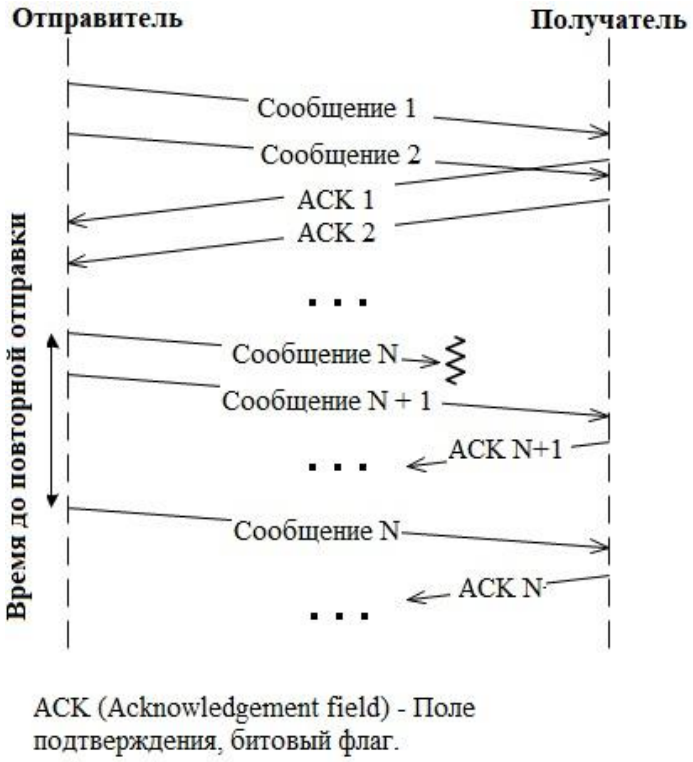


Рис. 2. Пересылка сообщений

При выполнении операции отправки сообщения выполняются следующие процедуры. Движок протокола осуществляет присваивание сообщению идентификатора и передает его модулю отправки, который осуществляет передачу сообщения непосредственно адресату. Затем производится настройка времени до повторной отправки на данное сообщение и осуществляется помещение его в очередь ожидающих подтверждения о выполнении операции передачи данных. При обнулении значения времени до повторной отправки, происходит повторная передача сообщения и устанавливается новое время до повторной отправки. Если подтверждение получено, движок протокола получает уведомление о данном факте от модуля приема. Производится проверка отправленных сообщений ожидающих подтверждения и если идентификатор совпадает с одним из них, происходит удаление сообщения из очереди и протокол уведомляет приложение-отправитель об успешной доставке сообщения.

Упорядочивание сообщений

Модуль приема передает принятые сообщения в движок протокола. Если это сообщение данных, то движок протокола должен подтвердить его. Таким образом, он генерирует сообщение подтверждения и передает его модулю отправки. Затем он сохраняет полученное сообщение до тех пор, пока оно не будет запрошено приложением. Данный процесс показан на блок-схеме на рис. 3.

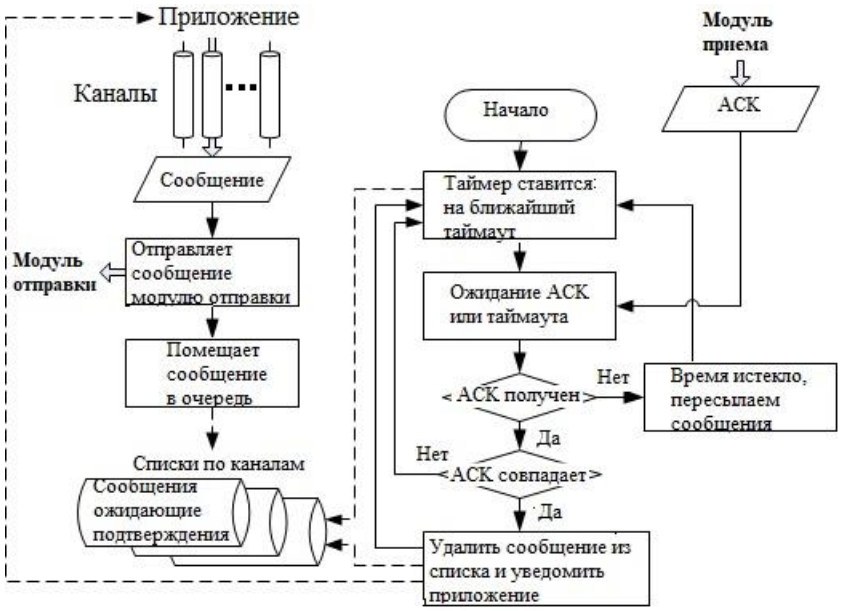


Рис. 3. Схема отправки сообщений

Движок протокола может избавляться от сообщений из-за повторных передач и маршрутизации. Таким образом, протокол помещает сообщения в набор каналов, упорядоченных по идентификаторам сообщений. Движок хранит в себе информацию о том, какое сообщение должно прибыть следующим, поэтому передача сообщения получателю не происходит вне очереди, данная операция переходит в режим ожидания. Данный процесс показан на блок-схеме на рисунке 4.

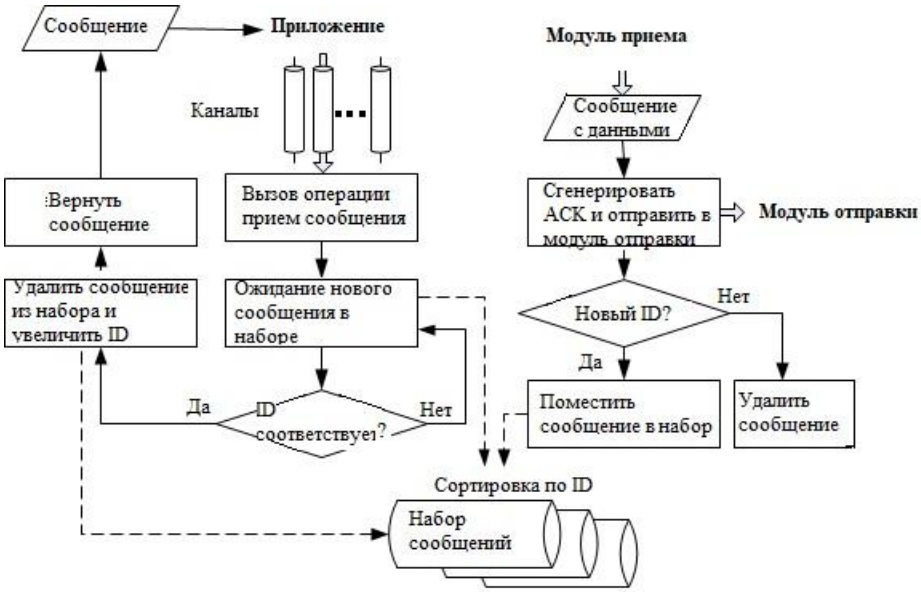


Рис. 4. Схема получения сообщений

Таймер повторной передачи сообщений

Модифицированный протокол UDP (протокол пользовательских дейтаграмм) определяет максимальную задержку сообщения как время, которое приложение разрешает для доставки сообщений. Задержка сообщений - это фактическое время, необходимое для передачи

сообщения; его значение зависит от поведения сетевых устройств и одноранговых сетей. Предположим что максимальная задержка сообщения значительно больше, чем стандартная задержка сообщения, и имеется достаточно времени для повторных передач. В результате значение тайм-аута таймера повторной передачи становится самым важным параметром в конфигурации протокола. Чтобы установить тайм-аут повторной передачи, отправитель вычисляет среднее RTT (round-trip time – круговая задержка) сообщения. Он записывает метку времени в заголовок сообщения, и получатель копирует метку времени в соответствующее сообщение ACK, с помощью которого отправитель может рассчитать RTT при получении подтверждения. При нормальном RTT тайм-аут повторной передачи может быть установлен в среднем (RTT) + ε, где ε является компенсацией для дрожания RTT. Поскольку распределение сообщений RTT можно рассматривать как нормальное, ε можно установить на 2 * σ, который охватывает более 97% RTT-s. В то время как средние RTT и ε могут быть рассчитаны во время работы протокола, первоначальный тайм-аут повторной передачи должен быть установлен приложением (начальная настройка времени повторной передачи), и его значение должно определяться путем бенчмаркинга или теоретических вычислений.

Средняя модель повторной передачи RTT работает только при условии, что количество каналов относительно невелико, а потери сообщений спорадичны по времени и каналам. Если какое-то случайное сообщение потеряно, протокол будет повторно передавать его после среднего (RTT) + ε таймаута. Теперь рассмотрим ситуацию, когда сообщение теряется снова и снова. Как только время превысит максимальное значение задержки сообщения, протокол не должен пытаться повторно передать сообщение и вместо этого действовать в соответствии с настройкой политики отключения сообщения. Этот параметр позволяет приложению настраивать поведение UDP для истекших сообщений; протокол может либо отменить эти сообщения, либо инициировать отказ.

Выводы

Модификация протокола пользовательских дейтаграмм на основе представленных в статье алгоритмов позволяет значительно повысить эффективность данного протокола для систем реального времени. Представленные алгоритмы отвечают всем требованиям надежности для систем реального времени, не допуская критического для подобных систем снижения скорости передачи данных. Данный модифицированный алгоритм отлично работает в условиях небольшой системы реального времени без большого количества всплесков активности пользователей.

Библиографический список

1. Бройдо В.Л., Ильина О.П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: Учебник для вузов. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2011. — 560 с.: ил.
2. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2010. — 944 с.: ил.

V.Y. Karpychev, D.S. Yasnev

MODIFICATION OF UDP TRANSPORT PROTOCOL FOR IMPROVING EFFICIENCY OF DATA TRANSFER IN REAL TIME SYSTEMS

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

This article describes the modification of the protocol of user datagrams based on the proposed algorithms to improve the efficiency of this protocol in real-time systems by increasing the reliability of data transmission without significant data loss for systems of this type.

Keywords: real-time systems, user datagram protocol.

УДК 53.02

Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич

ОПОЗНАВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Общество с ограниченной ответственностью «Собственный вектор»

Цель работы – привлечь внимание к возможностям автоматического опознавания автомодельных физических закономерностей и построению на этой основе устройства опознавания качественных изменений технических и биологических объектов.

Ключевые слова: автомодельная физическая закономерность, опознавание закономерностей, наблюдение, собственный вектор, собственное значение, мультипликативный инвариант, аллометрическое уравнение.

В настоящее время развиваются концепции, предполагающие — при решении задач мониторинга разнообразных объектов — комплексное использование различных физических полей и, следовательно, разнородных физических величин (то есть физических величин, имеющих разные размерности). Эта тенденция закрепляется созданием новых типов датчиков и уменьшением их цены.

В табл.1 представлены ситуации опознавания, введенные в основополагающей работе А.А. Харкевича [1]. В данной статье рассматривается четвёртая ситуация распознавания, когда в качестве наблюдаемого объекта выступает некоторое явление, а в качестве объекта опознавания выступает закономерность.

Далее будем полагать, что:

1. Явление представлено в виде ансамбля наблюдений, которому соответствует матрица ансамбля наблюдений, каждый столбец которой — упорядоченное множество наблюдаемых физических величин, характеризующих явление.

2. Опознаваемая закономерность относится к классу автомодельных физических закономерностей, которые характерны для широкого круга физических [2], биологических [3], а также, по нашим наблюдениям, и для социальных систем [4]. Некоторые из общеизвестных автомодельных физических закономерностей сведены в табл.2.

Как видно из табл.2, все приведенные в ней автомодельные физические закономерности носят мультипликативный характер, что не является случайным. В [2, стр. 29] отмечается, что: «... функциональные зависимости, выражающие собой физические факты, которые не зависят от единиц измерения, должны обладать некоторой специальной структурой». Такая универсальная структура (которую мы будем именовать «мультипликативный инвариант» или, вслед за [3], – «аллометрический инвариант») имеет следующий вид

$$\prod_{i=1}^{M} \hat{X}_i^{\alpha_i} = C, \qquad (1)$$

где $\hat{X}$ — наименование (символическое обозначение) i - ой наблюдаемой физической величины, α_i — показатель степени при i - ой наблюдаемой физической величине (без ограничения общности $\sum_{i=1}^{M} \alpha_i^2 = 1$), M — число наблюдаемых физических величин, C — константа, зависящая от выбора единиц измерения.

Известно, что соотношение (1) обеспечивает единственно возможный вариант взаимосвязи наблюдаемых физических величин, отвечающий принципу автомодельности, при котором функциональная связь между физическими величинами удовлетворяет соотношению [2]

$$F(a_1 \cdot x_1, a_2 \cdot x_2, \ldots, a_M \cdot x_M) = k(a_1, a_2, \ldots, a_M) \cdot F(x_1, x_2, \ldots, x_M), \qquad (2)$$

где $k(a_1, a_2, \ldots, a_M) = \prod_{i=1}^{M} a_i^{\alpha_i}$.

Таблица 1

Объекты наблюдения и опознавания по А.А.Харкевичу [1]

№ п/п	Объект наблюдения	Объект опознавания
1	Предмет	Предмет
2	Отношение между предметами	Ситуация
3	Изменение предмета, отношения, ситуации	Явление
4	Явления	Закономерность

Таблица 2

Примеры общеизвестных автомодельных физических закономерностей

Автомодельная физическая закономерность		Мультипликативный инвариант
Закон Ома	$U = I \cdot R$	$U^{0.577} \cdot I^{-0.577} \cdot R^{-0.577} = 1$
Резонансная частота колебательного контура	$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$	$f^{-0.816} \cdot L^{-0.408} \cdot C^{-0.408} = 2 \cdot \pi$
Ёмкость плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$	$C^{0.577} \cdot d^{0.577} \cdot S^{-0.577} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$
Корреляционная длина в окрестности критической точки	$\xi \propto \frac{1}{\lvert t^{\nu} \rvert}$	$\xi^{\frac{1}{\sqrt{1+\nu^2}}} \cdot \lvert t \rvert^{\frac{\nu}{\sqrt{1+\nu^2}}} = const$

Отмечается [5, стр. 132], что степенные зависимости являются характерными и для поведения сложных систем при приближении их к фазовому переходу второго рода: «Рассматриваем ли мы магнитную систему, перколяцию на решетке или разрушение материала, любая из этих систем вблизи критической точки переходит со своих, специфических законов поведения, на универсальные степенные зависимости. Происходит это потому, что флуктуации становятся фрактальными, то есть, другими словами, поглощают все возможные масштабы поведения системы, от постоянной решетки до размера в целом».

Нетрудно заметить, что логарифмирование левой и правой части (1) превращает мультипликативную модель в линейную — в логарифмических координатах. Следовательно, автоматическое опознавание автомодельных физических закономерностей сводится к оценке по матрице логарифмических наблюдений параметров линейной модели

$$\sum_{i=1}^{M} \alpha_i \cdot \tilde{X}_i = C', \ \tilde{X}_i = \ln \hat{X}_i, \ C' = \ln C. \qquad (3)$$

Рассмотрим устройство, которое автоматически, по данным многомерных наблюдений за объектом, представленным матрицей ансамбля наблюдений, восстанавливает автомодельную физическую закономерность, то есть определяет вектор степеней

$$\left|\alpha\right\rangle = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{bmatrix}, \text{ где } \left\langle \alpha \middle| \alpha \right\rangle = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i^2 = 1 \qquad (4)$$

и постоянную $C' = \ln C$.

На рис.1 представлена упрощенная структурная схема устройства опознавания качественных изменений технических и биологических объектов, осуществляющего действия, соответствующие формуле полезной модели [6]. Опишем работу устройства.

Пусть наблюдения объекта к некоторому моменту дискретного времени L представлены матрицей ансамбля наблюдений $A_{K\times L}=\left[x_{ij}\right]_{K\times L}$, каждый столбец которой — отдельное наблюдение за K наблюдаемыми физическими величинами. Из матрицы $A_{K\times L}$ в блоке 1 формируется логарифмическая матрица наблюдений. Для этого с использованием некоторого шаблона (зависимого от решаемой задачи) из матрицы $A_{K\times L}$ отбираются M строк и N столбцов, после чего отобранные элементы логарифмируются (по любому основанию). Таким образом, на выходе блока 1 получается логарифмическая матрица наблюдений $\tilde{A}_{M\times N}=\left[\ln x_{ij}\right]_{M\times N}=\left[\tilde{x}_{ij}\right]_{M\times N}$, представляющая собой набор отдельных логарифмических наблюдений, то есть $\tilde{A}_{M\times N}=\left[\left|\tilde{x}_1\right\rangle,\left|\tilde{x}_2\right\rangle,\ldots,\left|\tilde{x}_N\right\rangle\right]$, где отдельные логарифмические наблюдения M наблюдаемых физических величин в j-ый момент времени имеют вид

$$\left|\tilde{x}_j\right\rangle=\begin{bmatrix}\tilde{x}_{1j}\\ \tilde{x}_{2j}\\ \vdots\\ \tilde{x}_{Mj}\end{bmatrix},\ j=1,\ldots,N. \tag{5}$$

Нетрудно показать, что матрица невязки (в форме «бра») модели (3) — $\left|\Delta\right\rangle$ при некотором заданном наборе $\left|\alpha\right\rangle$ задается матричным соотношением

$$\left|\Delta\right\rangle=D_{N\times N}\cdot\tilde{A}'_{M\times N}\cdot\left|\alpha\right\rangle, \tag{6}$$

где $D_{N\times N}=E_{N\times N}-1_{N\times N}/N$ — матрица оператора центрирования (проектор), $E_{N\times N}$ — единичная матрица размера N, $1_{N\times N}$ — матрица размера N, состоящая из единиц, а штрих означает транспонирование.

Средняя квадратическая невязка модели (3) определяется с использованием (6):

$$\left\langle\Delta\middle|\Delta\right\rangle/N=\left\langle\alpha\right|\cdot\tilde{K}_{M\times M}\cdot\left|\alpha\right\rangle, \tag{7}$$

$$\tilde{K}_{M\times M}=\tilde{A}_{M\times N}\cdot D_{N\times N}\cdot\tilde{A}'_{M\times N}/N. \tag{8}$$

$\tilde{K}_{M\times M}$ — симметричная неотрицательно определённая матрица [7].

Вычисление матрицы (8) осуществляется в блоке 2.

Известно, что неотрицательно определенная квадратичная форма (7) достигает своего минимума на собственном векторе матрицы $\tilde{K}_{M\times M}$, имеющем минимальное собственное значение [7].

В блоке 3 решается стандартная задача линейной алгебры, в ходе решения которой получаются собственные пары — то есть пары собственных векторов и собственных значений, удовлетворяющих соотношению [7]

$$\tilde{K}_{M\times M}\cdot\left|\psi_i\right\rangle=\lambda_i\cdot\left|\psi_i\right\rangle,\ i=1,\ldots,M, \tag{9}$$

$$\left\langle\psi_i\right|\cdot\tilde{K}_{M\times M}=\lambda_i\cdot\left\langle\psi_i\right|,\ i=1,\ldots,M. \tag{10}$$

где $\left\langle\psi_i\right|$, $\left|\psi_i\right\rangle$, $i=1,\ldots,M$ – собственные векторы в форме «бра» и «кет», соответственно, λ_i, $i=1,\ldots,M$ – собственные значения.

В блоке 4 решается задача поиска номера минимального собственного значения (как правило, для известных реализаций общепринятых вычислительных алгоритмов это последнее M-ое собственное значение). Собственный вектор, имеющий минимальное собственное значение, и есть вектор $\left|\alpha\right\rangle$, который минимизирует невязку (7) модели (3), а, следовательно, и в

модели (1), то есть по матрице $\tilde{A}_{M\times N} = \left[\left|\tilde{x}_1\right\rangle, \left|\tilde{x}_2\right\rangle, \ldots, \left|\tilde{x}_N\right\rangle\right]$ опознаётся автомодельная физическая закономерность.

В блоке 5 вычисляются (для различных наборов данных, соответствующих различным моментам системного времени) значения косинуса угла между наборами $\left|\alpha\right\rangle$, и значения константы C, соответствующие заданным моментам системного времени:

$$\cos\Delta\Phi(t_1,t_2) = \left\langle \alpha(t_1)\middle|\,\alpha(t_2)\right\rangle, \tag{11}$$

$$\left\langle C(t)\right\rangle = \exp\left(\left\langle 1\middle|\cdot\tilde{A}'\cdot\middle|\,\alpha(t)\right\rangle \Big/ N\right), \tag{12}$$

где $\cos\Delta\Phi(t_1,t_2)$ — косинус угла поворота вектора $\left|\alpha\right\rangle$, произощедшего за период времени от t_1 до t_2,

$\left\langle C(t)\right\rangle$ — оценка значения мультипликативного инварианта C (правая часть модели (1)) в момент времени *t*.

Полученные в блоках 4 и 5 результаты позволяют опознать автомодельную физическую закономерность и записать ее — или в форме мультипликативного инварианта (1), или в виде явного выражения для одной из наблюдаемых физических величин:

$$\prod_{i=1}^{M} \hat{X}_i^{\alpha_i(t)} = C(t), \tag{13}$$

$$\tilde{X}_k = \sqrt[\alpha_k(t)]{\left\langle C(t)\right\rangle \cdot \prod_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{M} X_i^{-\alpha_i(t)/\alpha_k(t)}}. \tag{14}$$

Приведем пример использования устройства. Рис.2 иллюстрирует поведение механической системы, в которой до момента времени 450 верен закон $F\cdot a^{-1}\cdot m^{-1} = const$, а после момента времени 450 — верен закон $F^{11/10}\cdot a^{-1}\cdot m^{-1} = const$. Рис.3 иллюстрирует работу устройства при обработке данных, представленных на рис.2.

Таким образом, устройство опознавания качественных изменений позволяет на основе автоматического опознавания автомодельных физических закономерностей строить обобщающие свертки наблюдаемых физических величин и сигнализировать о качественных изменениях наблюдаемого объекта, проявляющихся в отклонениях от автоматически опознанных физических закономерностей. Использование опознавания качественных изменений может расширить возможности и повышает эффективность контроля за медико-биологическими, природными, энергетическими и другими инженерными и социальными системами и объектами, поведение которых обладает свойством автомодельности, позволяя вести комплексный контроль нескольких параметров, изменяющихся в широких пределах.

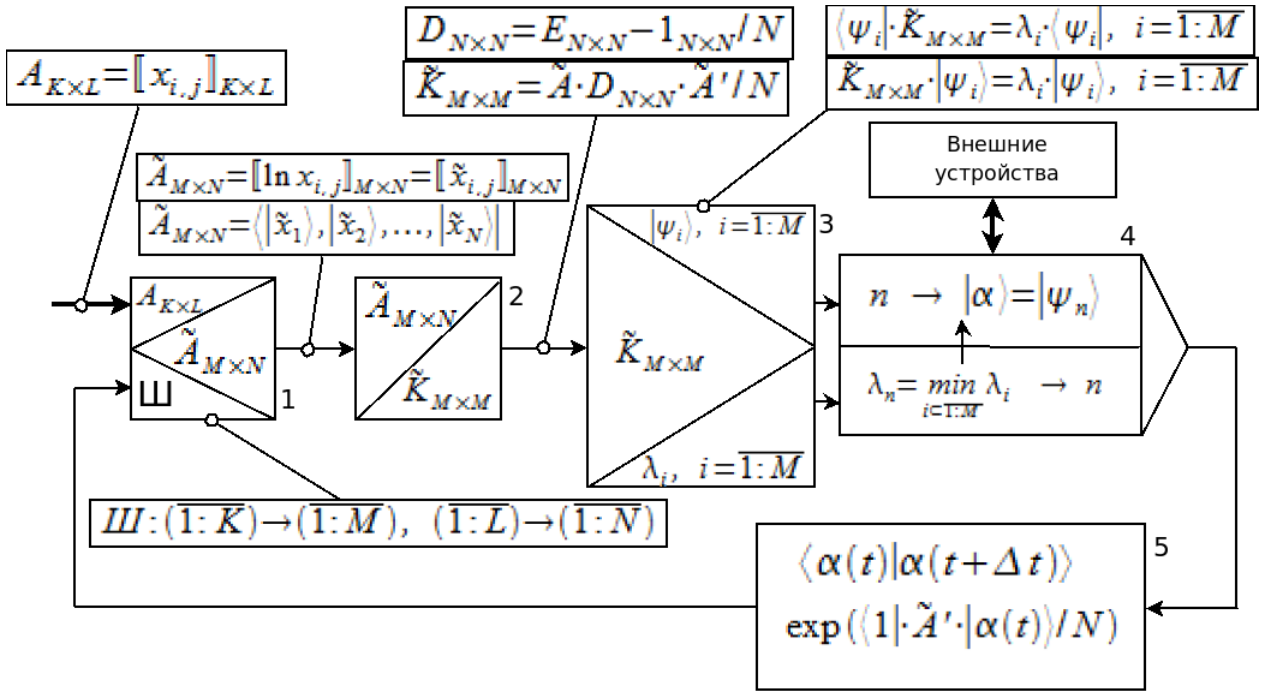


Рис. 1. Устройство опознавания качественных изменений технических и биологических объектов [6]: 1 — блок формирования ансамблей логарифмических матриц наблюдений; 2 — блок вычисления корреляционной матрицы; 3 — блок вычислителя собственных векторов и собственных значений; 4 — блок выбора собственного вектора; 5 — блок анализа ситуаций опознавания.

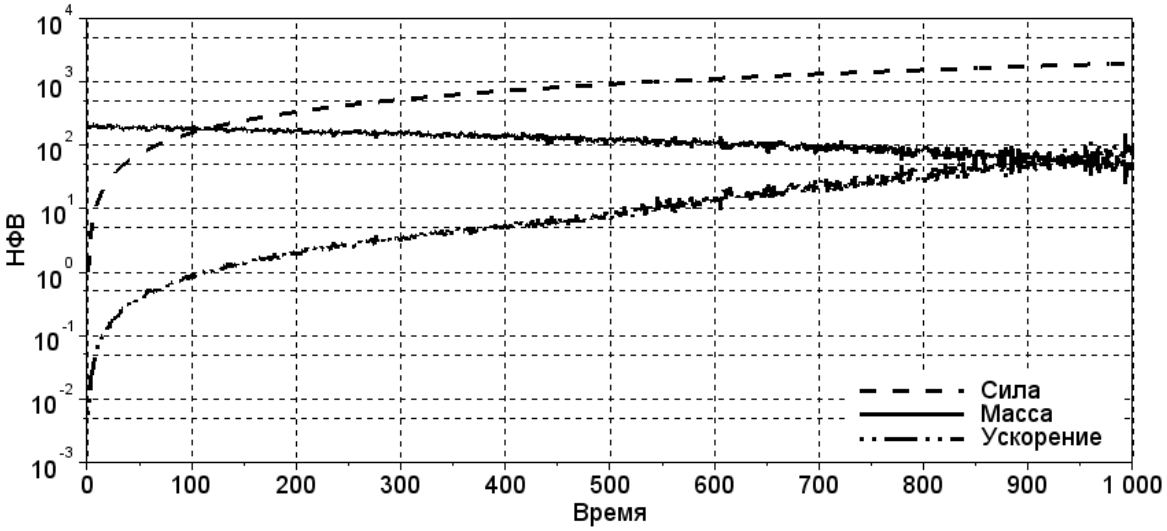


Рис. 2. Наблюдение трех физических величин, которые до момента времени 450 связаны законом $F\cdot a^{-1}\cdot m^{-1}=const$, а после момента времени 450 — законом $F^{11/10}\cdot a^{-1}\cdot m^{-1}=const$.

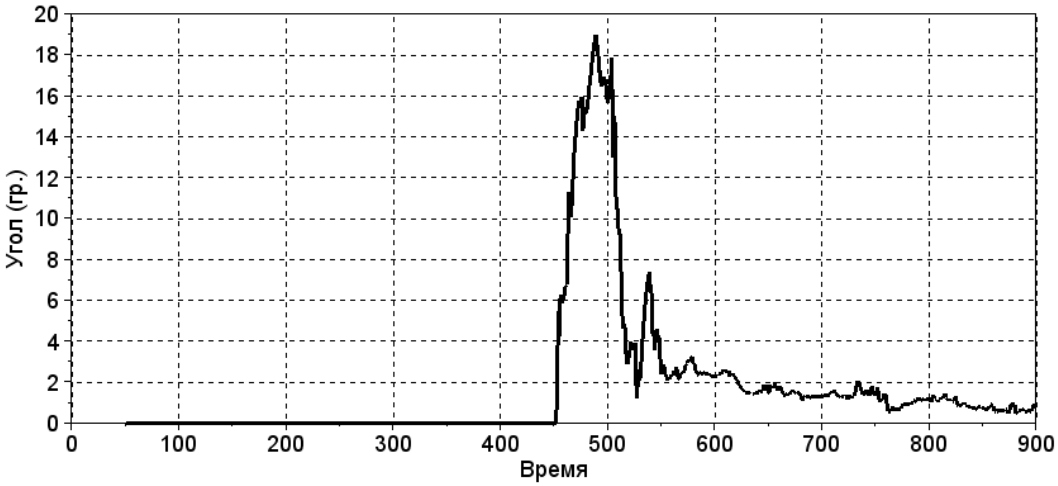


Рис.3. Изменение угла $\cos\Delta\Phi(t,t+50)=\langle\alpha(t)|\alpha(t+50)\rangle$ на выходе блока анализа ситуаций опознавания 5 при обработке данных, представленных на рисунке 2. При обработке в устройстве использовано сравнение матриц ансамблей наблюдений для смежных ансамблей с объемами $N=50$

Библиографический список

1. Харкевич А.А. Некоторые методические вопросы в проблеме опознавания. Проблемы передачи информации. т. 1, 1965, Вып. 3, стр. 3 — 11.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике., изд. 8-е, переработанное, М.: Наука, 1977, 440 с.
3. Шмидт-Ниельсен К. Размеры животных: почему они так важны? М.: Мир, 1987.
4. Исакевич В.В. Косвенная оценка численности потенциальных групп риска при наблюдении многолетних рядов онкологической заболеваемости. / Исакевич В.В., Кочетков А.П., Симонова Н.И. // Мед. труда и промышл. экология. 1997. - № 8. - С. 37-39.
5. Абаимов С.Г. Статистическая физика сложных систем: От фракталов до скейлинг-поведения. Изд. стереотип. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2015. 392 с.
6. Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Устройство опознавания качественных изменений технических и биологических объектов. Заявка на полезную модель №2017122737/28(039336), Решение о выдаче патента на полезную модель от 25.12.2017 г. Заявитель: ООО «Собственный вектор», авторы и группа физических лиц.
7. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Издательство «Лань». 2009. — 736 с.

L.V. Grunskaya, V.V. Isakevich, D.V. Isakevich

DETECTING QUALITATIVE CHANGES IN TECHNICAL AND BIOLOGICAL OBJECTS

Vladimir State University, Eigenvector Ltd., Vladimir

The goal of the work is attracting attention to the facilities of automatic revealing self-similar physical patterns and to the perspective of creating on this basis a device for detecting qualitative changes in technical and biological objects.

Keywords: self-similar physical pattern, revealing patterns, observation, eigenvector, eigenvalue, multiplicative invariant, allometric equation.

УДК004.896

Н.С. Грушин, В.Л. Елисеев

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Рассматривается нейросетевая система управления устойчивым линейным объектом.Исследуется вопрос формирования обучающего и тестового множества для настройки компонентов нейросетевой системы управления – модели объекта и регулятора. Рассматриваются различные пробные сигналы уставки и изучается их эффективность при обучении нейросетей. Изучается влияние плотности точек обучающей выборки на точность нейросетевой модели объекта управления.Предлагается методика формирования обучающей выборки для модели объекта с контролем заполнения рабочей области.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, системы автоматического регулирования, косвенное адаптивное управление, обучающая выборка.

Введение

В настоящее время наряду с традиционными линейными регуляторами активно исследуются и используются регуляторы других типов, в частности основанные на искусственных нейронных сетях. Этот интерес обусловлен актуальностью ряда задач: увеличение точности регулирования в условиях неточных знаний об объекте, учет нелинейных свойств объектов управления, реализация специальных свойств контура управления, таких как адаптация регулятора к изменению параметров объекта управления. В то же время, нейросетевой регулятор обладает нелинейными свойствами а также по методам настройки существенно отличается от традиционных ПИ и ПИД регуляторов. В частности, характерной особенностью искусственных нейронных сетей является обучение на примерах как с учителем, так и без учителя. Это ставит задачу формирования обучающего и тестового множества.

Данная работа посвящена изучению свойств обучающего множества нейронной сетив задаче синтеза нейросетевой системы управления линейным объектом. Обучающие множества напрямую влияют на качество управления объектом, однако в большинстве работ по нейросетевым системам управления вопрос обоснованного формирования обучающей выборки систематически не рассматривался.

Рассматривается контур управления, представленный на рис 1.

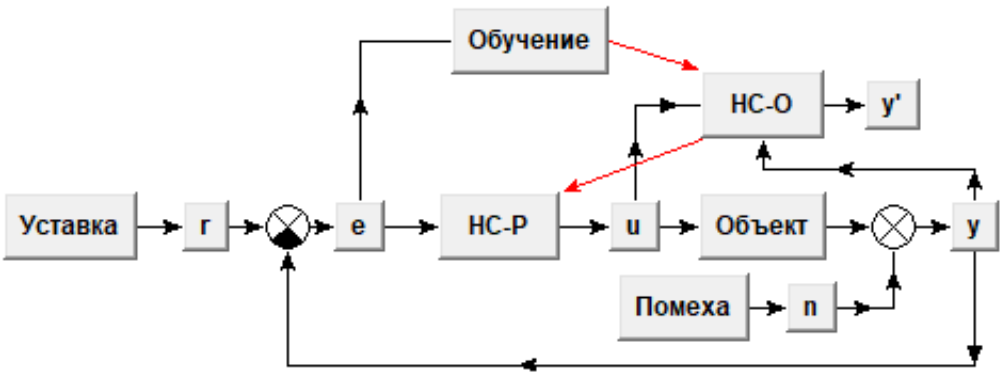


Рис. 1. Контур нейросетевой системы управления в режиме обучения

Для обучения используется комбинированный нейросетевой метод управления объектом с участием нейронной сети для моделирования объекта (НС-О) и нейросетевого регулятора (НС-Р). Данный метод реализует подход косвенного адаптивного управления и описан в [4].НС-О (рис 2.) является моделью типа НАРСС (нелинейной авторегрессии - скользящего среднего). С помощью НС-О формируются необходимые выборки для обучения НС-Р и реализуется его обучение.

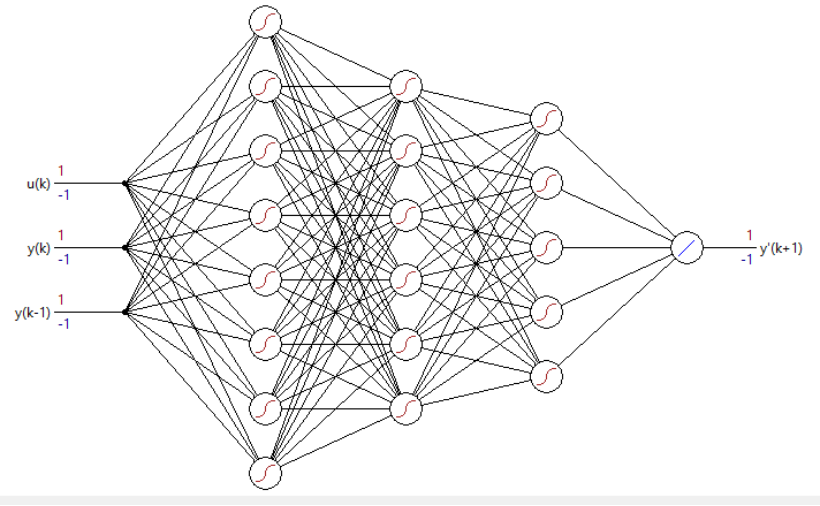


Рис. 2. Нейросетевая модель нелинейной авторегрессии-скользящего среднего

Специфика обучения нейросетевоймодели объекта

Точность нейросетевой модели объекта оказывает прямое влияние на качество процесса управления. Линейный стационарный объект управления можно представить функциональной зависимостью вида $Y = f(y, U)$,где y представляет зависимость от прошлых состояний объекта, а U–входное воздействие на объект. Обучающая выборка представляет собой множество состояний(U, Y), в которых прибывает объект.Для получения точной модели объекта управления необходимо чтобы выборка содержала информацию обо всей рабочей области. Это связано с обобщающей способностью нейронной сети и проблемой переобучения. В то же время, желательно, чтобы объем обучающей выборки был минимален, так как большая выборка требует больших ресурсов при обучении нейронной сети.

Второй причиной минимизации продолжительности сбора данных для обучающей выборки является ускорение времени адаптации нейросетевой системы управления нестационарным объектом. Поэтому задачу формирования обучающей выборки для НС-Оможно описать как создание минимального набора данных, обеспечивающего заданное качество имитации объекта управления нейронной сетью в рабочей области. При этом надо учесть, что обучающая выборка должна формироваться в процессе рабочего функционирования объекта, и заполнение рабочей области объекта может происходить только с учетом динамики системы управления. Таким образом, при формировании обучающей выборки надо сочетать выбор подходящего пробного сигнала и требование заполнения рабочей области экспериментальными данными.

Обзор подходов к формированию обучающей выборки для НС

Подход к формированию обучающей выборки напрямую влияет на качество полученных НС. При этом важно учесть специфические свойства НС, например, в работе [3] автор подробно описывает основные особенности и проблемы формирования обучающих множеств с точки зрения машинного обучения. В настоящее время НС применяются для решения широкого спектра различных задач, поэтому данный вопрос также рассматривается и с точки зрения

различных прикладных направлений. В работе [1] автор описывает специфику формирования обучающей выборки в задаче формирования временных рядов в экономике.В диссертации [2] детально освещается вопрос целенаправленного формирования обучающей выборки для объекта с монотонным гладким поведением. Однако в этой работе не сформирован критерий достаточности объема формируемой выборки.

Обзор видов пробных сигналов

Рассмотрим распространенныевлинейных системах автоматического управления виды пробных сигналов. На рис. 3-6 изображены множества состояний объекта управления *(U,Y)*, полученные при различных типах входного воздействия.

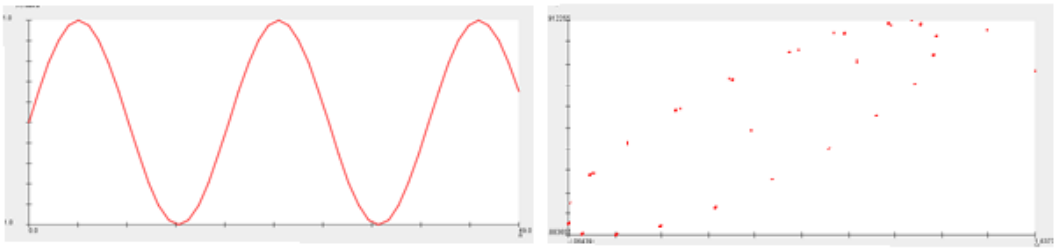


Рис. 3. Синусоидальный входной сигнал

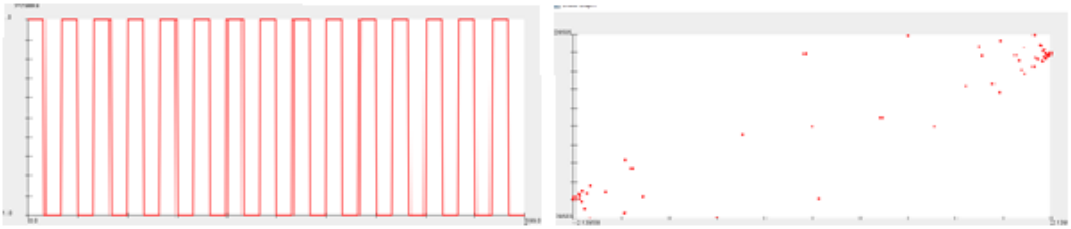


Рис. 4. Входной сигнал типа меандр

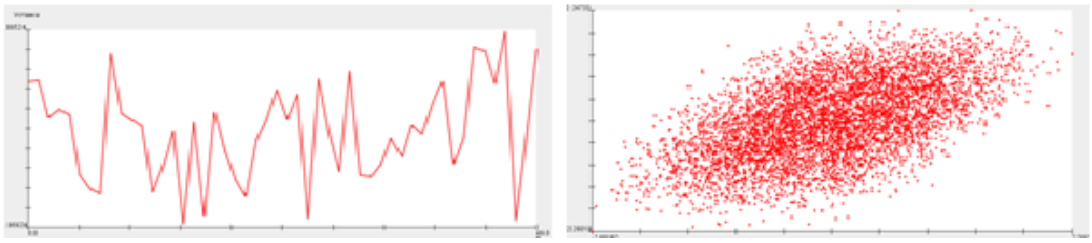


Рис. 5.Входной сигнал типа “Белый шум”

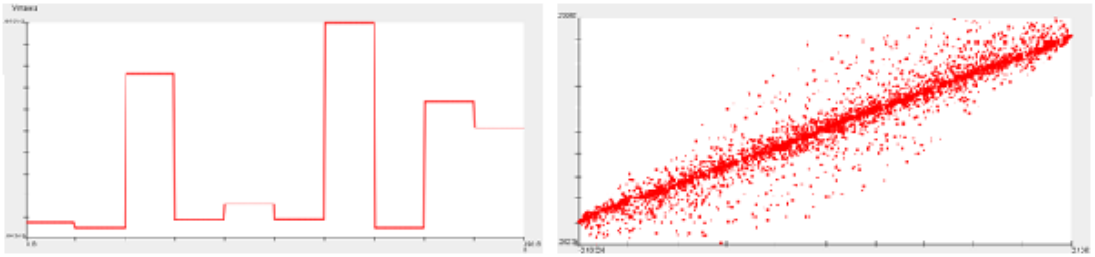


Рис. 6.Входной сигнал типа “Случайный меандр”

Отметим, что синусоидальный сигнал и меандр приводит объект в ограниченное число состояний и не подходит для формирования обучающей выборки. Очевидно, что наиболее полное множество состояний объекта задает сигнал типа “Белый шум”, поэтому данный сигнал является наиболее предпочтительным при формировании выборки для обучения НС-О. Однако, данный сигнал физически не реализуем в реальных системах управления, наиболее полную

информацию о множестве состояний объекта в таком случае формирует сигнал типа “Случайный меандр”.

Методика формирования обучающей выборки

Рассмотрим задачу построения методики формирования выборки с контролем плотности заполнения и достаточности её объема. Рабочая область объекта *(U,Y)*рассматривается как множество клеток (секторов) равного размера. При этом будем считать, что пробный сигнал обеспечивает заполнение необходимой для моделирования поведения объекта части рабочей области.Предложенная методика формирования выборки включает в себя следующие этапы:

1. Задание рабочей области работы объекта исходя из характеристик системы.
2. Выбор шага сетки. От шага сетки зависит точность полученной НС-О и время обучения НС.
3. Задание доли секторов, требующих заполнения.
4. Задание параметров пробного сигнала (случайный или случайный меандр).
5. Запуск рабочего функционирования системы с заполнением ячеек сетки точками наблюдаемых данных
6. Процесс сбора данных останавливается в случае заполнения заданного количества секторов.

Результат разделения рабочей области на сектора равномерной прямоугольной сеткой демонстрируется на рис. 7, хотя возможны и иные способы разбиения, дающие сектора равного размера и формы. Назовем выборку данных, полученную в соответствии с изложенной методикой оптимальным равномерным заполнением.

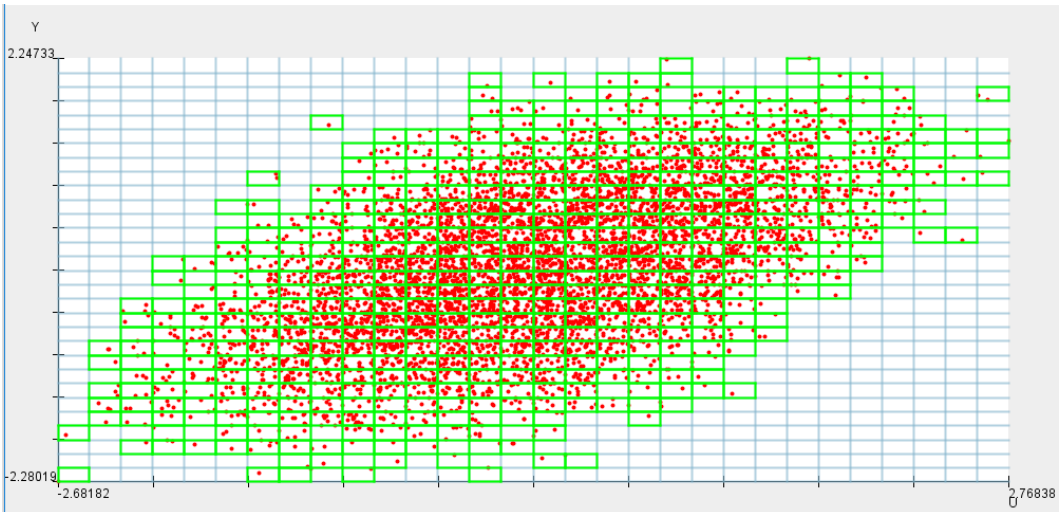


Рис. 7. Разделение множества значений на сектора и их заполнение

Применение предложенной методики обеспечивает с одной стороны равномерное покрытие рабочей области обучающими данными, с другой стороны -позволяет остановить процесс сбора данных, как только нужное количество секторов будет заполнено хотя бы одной точкой*(U,y)*. Следует отметить, что данный критерий заполнения может применяться для пробных сигналов любой формы и обеспечивает для них контроль достаточной длины выборки.

Основными параметрами методики являются размер сектора и доля секторов из рабочей области, заполнение которых обеспечат нужный объем и детальность обучающей выборки для НС-О.

Эксперименты

На рис.8-10 представлены результаты работы НС-О и линейного объекта для оценки качества имитации при различной степени заполнения выборки. Обучение производилось методом Левенберга-Марквардта и использовалось одинаковое количество итераций для обучения всех НС-О.

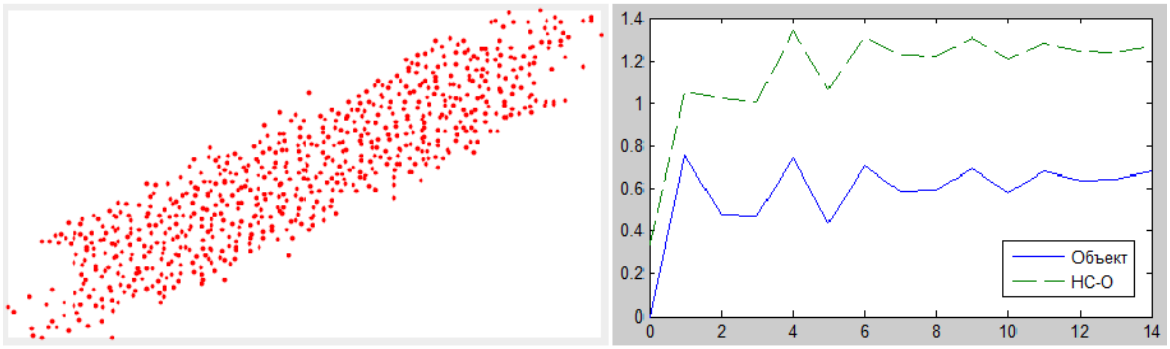


Рис.8. Недостаточное заполнение рабочего диапазона

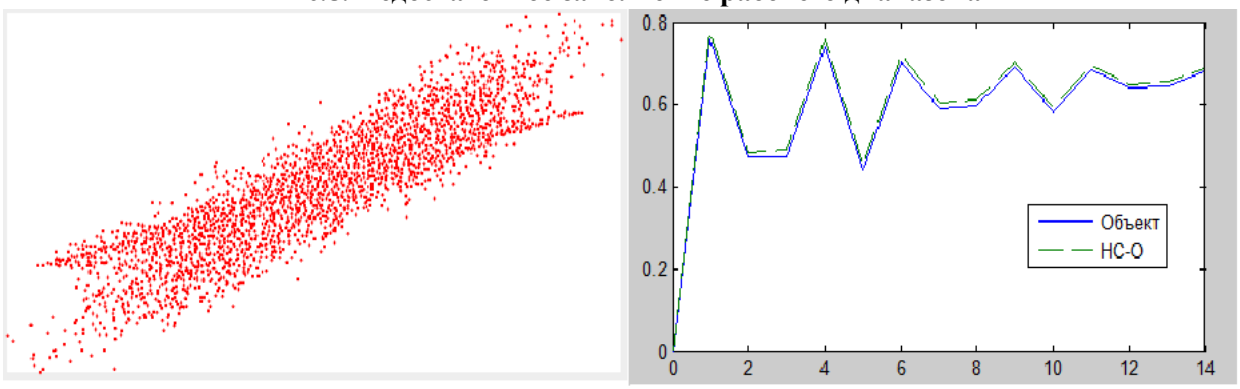


Рис.9. Оптимальное заполнение рабочего диапазона

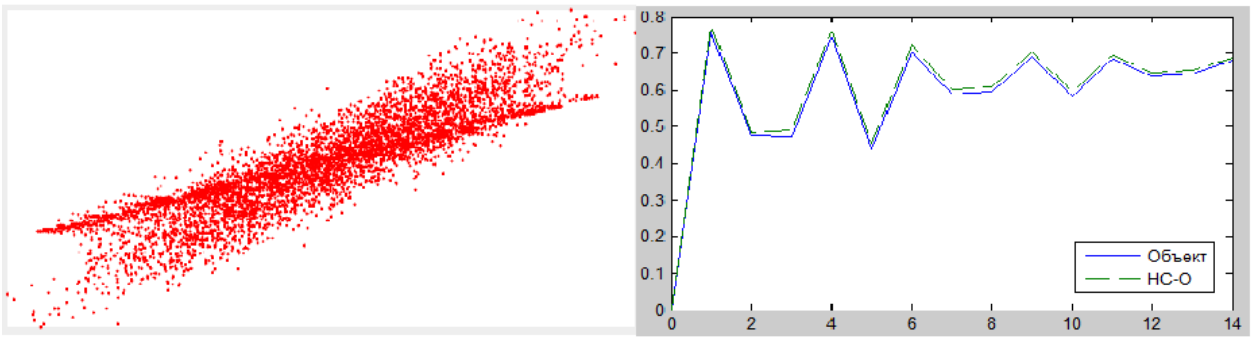


Рис.10. Избыточное заполнение рабочего диапазона

При избыточном заполнении рабочего диапазона НС-О имитирует объект управления практически с такой же точностью что и при оптимальном равномерном заполнении. При этом на её обучения затрачивается существенно больше вычислительных ресурсов и времени.

Выводы

Разработанная методика дает возможность контролировать объем и детальность формирования обучающей выборки для настройки нейросетевого регулятора и модели объекта управления. При этом не накладывается условий на вид объекта управления и возможно применение пробных сигналов различного вида. Изложенный подход к формированию обучающей выборки может оказаться полезным для применения в адаптивных нейросетевых системах управления нестационарным объектом.

Библиографический список

1. Александрович Е.В. Эффективный анализ качества обучающей выборки для нейросетей, используемых в целях прогнозирования временных рядов в экономике // Брянский государственный технический университет [Электронный ресурс].URL:http://www.science-bsea.bgita.ru/2010/ekonom_2010/alexandrovich_effekt.htm
2. Кабирова А.Н. Методы и комплексы программ построения нейросетевых моделей регуляторов для управления динамическим объектом: дис. … канд. техн. наук: 05.13.18/ КабироваАйгульНадилевна. — Казань, 2017. — 130с.
3. Кафтанников И.Л., Парасич А.В. Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения // Вестник ЮУрГУ, Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16, № 3. С. 15–24/
4. Филаретов Г. Ф., Елисеев В. Л. Нейросетевой оптимальный регулятор // Доклады международной конференции “Информационные средства и технологии”. Т. 3. Москва: 2000.—октябрь. С. 64–67/
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание, пер. с англ. – М: Издательский дом «Вильямс», 2008.

N.S. Grushin, V.L. Eliseev

METHOD OF TRAINING SET COMPOSITION FOR NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM WITH LINEAR OBJECT

National Research Moscow Power Engineering Institute

We consider a neural network control system for a stable linear object. The issue of a training and test set composition for tuning the components of the neural network control system – the model of the object and the regulator is investigated. Various test signals of the set point are considered and their effectiveness is studied in the training of neural networks. The influence of the density of training sample points on the accuracy of the neural network model of the control object is studied. A technique is proposed for forming a training sample for an object model with control over the filling of the work area.

Keywords: artificial neural networks, automatic control systems, indirect adaptive control, training set.

УДК 519.854.2

Жукова Г.Н.[1], Ульянов М.В.[2]

ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАТУРАЛЬНОГО ЛОГАРИФМА ВРЕМЕНИ РЕШЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ КОММИВОЯЖЕРА МЕТОДОМ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
[2] Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова

Работа посвящена аппроксимации вероятностного распределения натурального логарифма времени решения индивидуальной задачи коммивояжера (TSP) методом ветвей и границ, а также его максимального значения. На основе экспериментальных данных получены параметры нормального распределения, приближающего распределение натурального логарифма времени решения индивидуальной TSP . Построена зависимость этих параметров от размерности задачи n, где n принимает значения от 25 до 45. Аналогично исследовано распределение максимума натурального логарифма времени решения индивидуальной TSP в серии из m задач.

Ключевые слова: **з**адача коммивояжера; TSP; метод ветвей и границ; МВГ; время решения индивидуальной задачи коммивояжера; максимальное значение.

Введение

В работе рассматривается асимметричная постановка задачи коммивояжера (ATSP), для решения задачи используется классический метод ветвей и границ [1]. Основной изучаемой характеристикой индивидуальной задачи коммивояжера является время работы программы, реализующей алгоритм ветвей и границ. Значение этого времени для конкретной задачи определяется экспериментально в ходе выполнения программной реализации алгоритма. Также проведено исследование вероятностного распределения максимальных значений времени работы МВГ как в подмножествах выборки при фиксированной размерности, так и поведения параметров этого распределения при изменении размерности задачи коммивояжера.

Аналогично [2-4] экспериментально установлено, что распределение натурального логарифма времени работы МВГ близко к нормальному. Использование линейной регрессии выборочных квантилей на стандартное нормальное распределение позволило для каждого значения размерности задачи коммивояжера найти приближенные значения параметров нормального распределения, которое удовлетворительно приближает распределение времени работы МВГ. Далее в статье исследуется вопрос о зависимости параметров вероятностного распределения времени работы МВГ, а также максимального значения времени работы МВГ в выборках объема 10^4 , 10^3 и 500 от размерности задачи коммивояжера, качество аппроксимации оценивается сравнением квантилей распределения максимума $X_{\max}$ с выборочными квантилями максимальных значений в сериях из 500 и 1000 задач коммивояжера.

Теоретические основы анализа

Оценку параметров нормального распределения, используемого как приближение распределения натурального логарифма времени (значения времени измерялись в микросекундах), проведем с помощью линейной регрессии выборочных квантилей на квантили стандартного нормального распределения, аналогично [2-4].

Квантили q_p^X и q_p^Y случайных величин X и $Y = LX = kX + b$ связаны соотношением $q_p^Y = kq_p^X + b$. Значения параметров k и b выберем такими, чтобы сумма квадратов отклонений квантилей $q_{p_i}^{N(0,1)}$, $i = \overline{1,N}$, случайной величины со стандартным нормальным распределением

от выборочных квантилей $q^*_{p_i}$, $i=\overline{1,N}$, логарифма времени работы алгоритма МВГ индивидуальной TSP $X=\ln t_n$ (n фиксировано) была минимальной:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(q_{p_i}^{N(0,1)}-q^*_{p_i}\right)^2\to\min, \qquad (1)$$

уровни квантилей $p_i=0.05i$, $i=\overline{1,N}$, $N=19$.

Значения параметров k и b линейной регрессии квантилей стандартного нормального распределения $q_{p_i}^{N(0,1)}$ на выборочные квантили $q^*_{p_i}$ можно вычислить по формулам [5]:

$$k=\frac{\overline{q^{N(0,1)}q^*}}{\left(q^{N(0,1)}\right)^2},\ b=\overline{q^*}, \qquad (2)$$

где

$$\overline{q^{N(0,1)}q^*}=\frac{\sum_{i=1}^{N}q_{p_i}^{N(0,1)}q^*_{p_i}}{N},\ \overline{\left(q^{N(0,1)}\right)^2}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(q_{p_i}^{N(0,1)}\right)^2}{N},\ \overline{q^*}=\frac{\sum_{i=1}^{N}q^*_{p_i}}{N}.$$

Также мы учли, что для стандартного нормального распределения среднее значение квантилей равно нулю.

Коэффициент корреляции

$$r=\frac{\overline{q^{N(0,1)}q^*}}{\sigma_1\sigma_2}\quad\left(\sigma_1=\sqrt{\overline{\left(q^{N(0,1)}\right)^2}-\left(\overline{q^{N(0,1)}}\right)^2}=\sqrt{\overline{\left(q^{N(0,1)}\right)^2}},\sigma_2=\sqrt{\overline{\left(q^*\right)^2}-\left(\overline{q^*}\right)^2}\right)$$

принимает значение больше 0.999. Полученные значения параметров k и b линейной регрессии приведены на рис. 1.

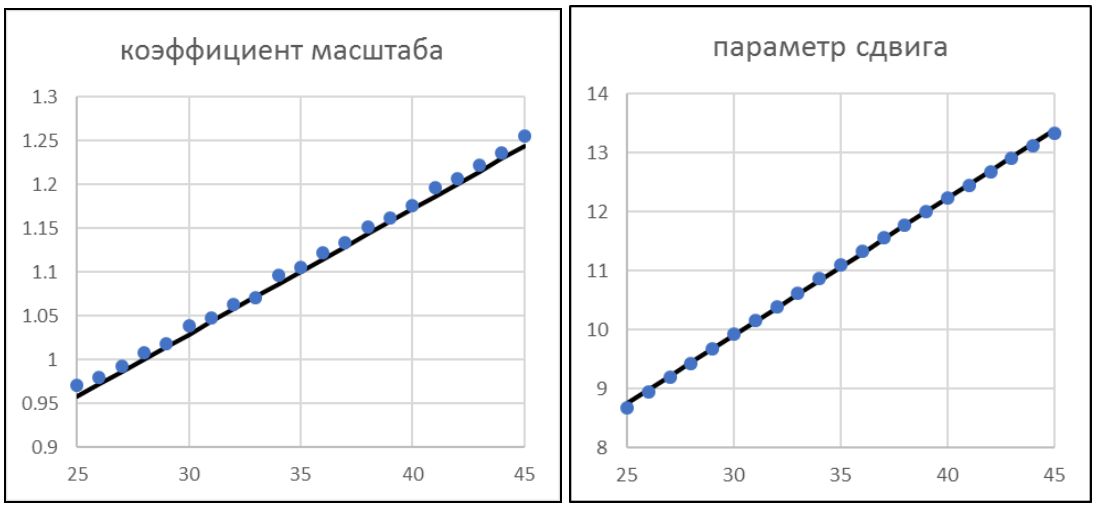


Рис. 1. Зависимость параметров регрессии времени работы МВГ на стандартное нормальное распределение от размерности задачи

На рис. 1 точками обозначены выборочные значения параметров масштаба и сдвига линейной регрессии времени работы МВГ на стандартное нормальное распределение, а линиями — зависимость (6) с экспериментально полученными значениями параметров.

Интерполирование зависимости параметров k и b от n.

Аналогично полученным ранее результатам для натурального логарифма сложности [2-4] будем считать, что распределение времени работы МВГ в первом приближении нормальное с параметрами, зависящими от размерности задачи n следующим образом:

$$\sigma = k \approx An + B, \qquad \mu = b \approx Dn + F, \tag{3}$$

где $A = 0.0143$, $B = 0.61$, $D = 0.232$ и $F = 2.95$ — экспериментально полученные значения параметров. Для вычисления параметров A, B, D и F использовались выборки из натурального логарифма времени работы МВГ для n от 20 до 45 (объемом по 100 000 каждая). Таким образом, натуральный логарифм времени работы МВГ приблизительно равен

$$\ln t_n \approx (An + B)N(0,1) + Dn + F, \tag{4}$$

где $N(0,1)$ обозначает случайную величину со стандартным нормальным распределением.
Сгруппируем отдельно слагаемые, включающие n

$$\ln t_n \approx (AN(0,1) + D)n + BN(0,1) + F,$$

после чего в результате потенцирования получим

$$t_n \approx e^{\lambda n + \ln\alpha}, \lambda = AN(0,1) + D, \ln\alpha = BN(0,1) + F, \tag{5}$$

и, окончательно

$$t_n \approx \alpha e^{\lambda n}, \alpha = e^{BN(0,1)+F} \tag{6}$$

Приведем формулу [5] для максимального $X_{\max}$ значения, наблюдаемого в выборке объема m из нормального распределения $N(\mu,\sigma)$

$$X_{\max} = \mu + \sigma\sqrt{2\ln m} - \sigma\frac{\ln\ln m + \ln 4\pi}{2\sqrt{2\ln m}} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\ln m}}v, \tag{7}$$

где v — случайная величина с плотностью вероятности (в пределе при $m \to \infty$)

$$j_1(t) = e^{-t-e^{-t}}. \tag{8}$$

Запишем формулу (1) в виде

$$X_{\max} = Kv + R, \tag{9}$$

$$K = \frac{\sigma}{\sqrt{2\ln m}}, \qquad R = \mu + \sigma\sqrt{2\ln m} - \sigma\frac{\ln\ln m + \ln 4\pi}{2\sqrt{2\ln m}}. \tag{10}$$

Для квантилей линейной функции $X_{\max} = Kv + R$ случайной величины v имеем

$$q_p^{\max} \approx Kq_p^v + R. \tag{11}$$

Подставляя (3) в (10), окончательно получим:

$$K = \frac{An + B}{\sqrt{2\ln m}}, R = Dn + F + (An + B)\left(\sqrt{2\ln m} - \frac{\ln\ln m + \ln 4\pi}{2\sqrt{2\ln m}}\right) \quad (12)$$

Квантили $q_p^{\max}$ уровня p максимума натурального логарифма времени работы МВГ для задачи коммивояжера размерности n в выборке объема m можно представить в виде (11) с параметрами (12). Однако вычислительный эксперимент показал, что использование предельного распределения (8) дает плохой прогноз при объеме выборки 100-200. При замене распределения (8) нормальным с параметрами, равными матожиданию и среднеквадратическому отклонению распределения (8) получается лучшее приближение выборочных квантилей максимума натурального логарифма времени работы МВГ теоретическими (см. рис. 3 справа).

Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент состоял в решении индивидуальных задач асимметричной TSP классическим методом ветвей и границ с матрицами стоимостей размерности n от 25 до 45. В качестве элементов матрицы стоимостей использовались псевдослучайные натуральные числа с дискретным равномерным распределением. При проведении вычислительного эксперимента для каждой размерности задачи было сгенерировано 10^5 матриц $A_i, i = 1, 10^5$, для каждой из которых было измерено время работы алгоритма МВГ в микросекундах. Полученную выборку при фиксированной размерности будем называть серией. Таким образом, мы получили 25 экспериментальных серий объемом 10^5 каждая.

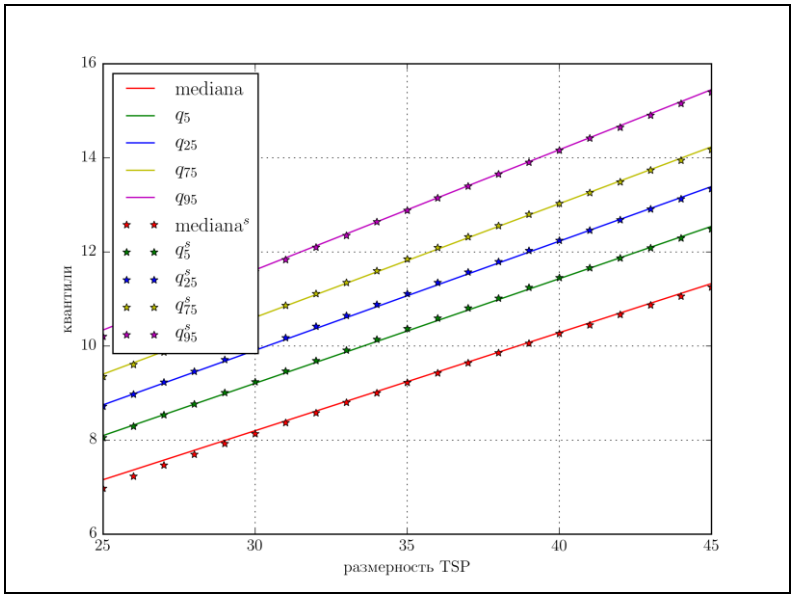


Рис. 2. Теоретические и выборочные квантили $\ln t_n$

На рис. 2 приведены прогнозы квантилей сложности (уровней 0.5, 0.75, 0.9 и 0.95) для n от 36 до 45, рассчитанные на основе значений параметров A, B, D и F, полученных по выборкам для n от 20 до 45, а также экспериментально полученные значения соответствующих квантилей.

Прогноз достаточно хороший, он дает удовлетворительную верхнюю оценку квантилей сложности индивидуальной задачи коммивояжера, решаемой методом ветвей и границ.

Для исследования распределения максимума логарифма времени работы алгоритма МВГ эти серии были разбиты на непересекающиеся подмножества s_i, $\left(i = 0,1,2,...,10^5/m-1\right)$ объема $m = 500,1000,10000$.

В каждом подмножестве s_i был найден максимальный элемент $x_i^{\max}$, затем из полученных максимумов были сформированы выборки логарифма максимума времени $\left\{x_i^{\max}\right\}_{i=0}^{m-1}$.

Далее мы предполагаем, что наблюдается случайная величина $X_m^{\max}$, равная максимальному значению в выборке объема m, полученной при наблюдении за нормально распределенной случайной величиной с параметрами μ и σ, вычисленным по формулам (3). По выборкам $\left\{x_i^{\max}\right\}_{i=0}^{m-1}$ вычислим выборочные процентные квантили q_t, $t = 5,25,75,95$, а также медиану, по формулам (11) найдем теоретические квантили q_t^s, $t = 5,25,75,95$ и медиану случайной величины $X_m^{\max}$, изобразим на общем графике полученные результаты (см. рис. 3 слева).

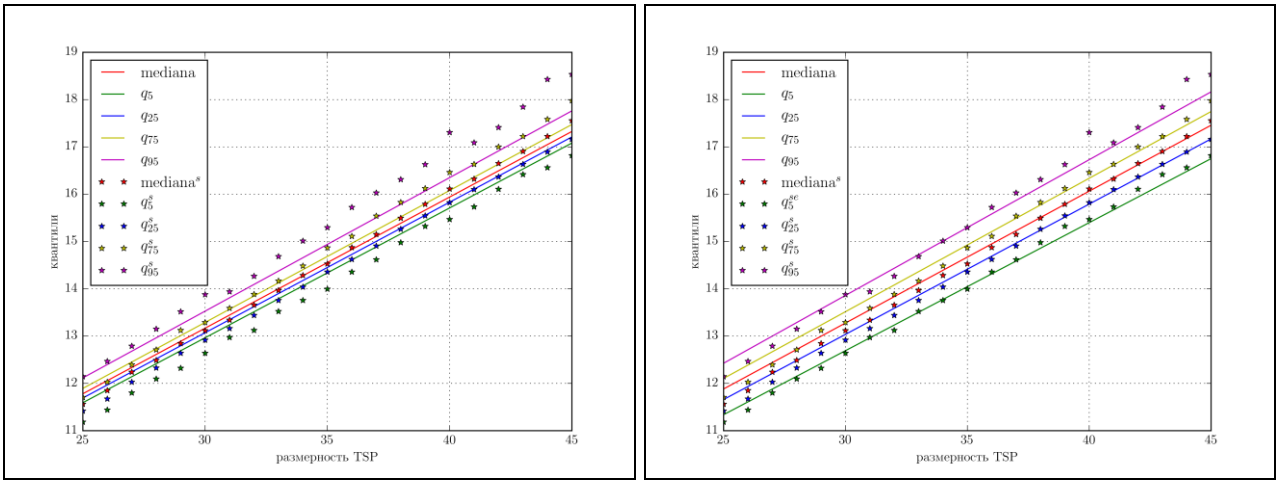


Рис. 3. Теоретические и выборочные квантили $\max_m \ln t_n$, объем выборки $m = 1000$.

Таким образом, формулы (7) - (9) дают грубую оценку максимального времени работы МВГ при решении задачи коммивояжера (без предвычисления начального тура). Точность оценки можно улучшить, если вместо предельного распределения (8) использовать нормальное распределение с параметрами $\mu^* = E\nu \approx 0.577$, $(\sigma^*)^2 = D\nu \approx 1.645$ (рис. 3 справа). Эти результаты могут также применяться для прогнозирования максимального времени работы программной реализации метода ветвей и границ при размерности задачи более 50.

Заключение

Предложено представление времени работы МВГ при решении задачи коммивояжера как экспоненциальной функции случайной величины со стандартным нормальным распределением, причем показатель экспоненты линейно зависит от размерности задачи n. Это представление позволяет прогнозировать квантили натурального логарифма времени работы МВГ при довольно больших n, а, значит, получать верхние оценки для времени p% выборки при любом p от 5 до 95 (ввиду того, что в больших по объему выборках могут встречаться очень большие довольно редкие значения, прогноз верхней границы сложности при p больше 95 делать не имеет смысла).

В работе также исследована зависимость максимального наблюдаемого в выборке объема m (при фиксированной размерности задачи) значения натурального логарифма времени работы МВГ индивидуальной задачи коммивояжера от размерности задачи и от объема выборки. Получено приближенное выражение для квантилей распределения максимума натурального логарифма времени работы МВГ. Определены значения параметров распределения максимума времени работы МВГ и даны формулы (10) и (11) для вычисления квантилей распределения $\max_m \ln t_n$. Полученные результаты позволяют давать прогнозную оценку для максимума времени работы МВГ индивидуальной задачи коммивояжера в зависимости от размерности задачи и объема выборки. Полученные результаты позволяют оценить временные затраты при решении индивидуальных задач коммивояжера.

Благодарности

Авторы выражают благодарность студенту магистратуры ФКН НИУ Высшая школа экономики Фомичеву Михаилу Игоревичу за проведение вычислительного эксперимента.

Работа поддержана Грантом РФФИ №16-07-160.

Библиографический список

1. Ульянов М.В. Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 304 с.
2. Головешкин В.А., Жукова Г.Н., Ульянов М.В., Фомичев М.И. Оценка параметров распределения логарифма сложности задачи коммивояжера // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2017. — Т. 13, № 1. — С. 19-24.
3. Головешкин В.А., Жукова Г.Н., Ульянов М.В., Фомичёв М.И. Использование квантильных коэффициентов асимметрии и эксцесса для оценки сложности решения задачи коммивояжера. International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — Т. 4, № 12. — С. 7-12.
4. Головешкин В.А., Жукова Г.Н., Ульянов М.В., Фомичев М.И. Распределение логарифма сложности индивидуальных задач коммивояжера при фиксированной длине входа // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2016. — Т. 12, № 3-2. — С. 131-137.
5. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975. — 648 с.

Zhukova G.N. [1], Ulyanov M.V. [2]

PROBABILITY DISTRIBUTION OF THE NATURAL LOGARITHM OFRUNNING TIME OF INDIVIDUAL TSP USING BRANCH AND BOUND ALGORITHM

[1]National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
[2] Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences, Moscow, Russia

This article is about the approximation of the probability distribution of the natural logarithm of the running time of the individual travelling salesman problem (TSP) using branch and bound algorithm. Parameters of the normal distribution, which is used as an approximation of the distribution of the natural logarithm of the running time of the individual TSP, are obtained by the experiment.We propose representations for these parameters as linear functions of size n of TSP, where n varies from 25 to 45.The probability distribution of the maximum of the running time of the individual TSP in series of m TSPsis also studied.

Keywords: traveling salesman problem; TSP; branch and bound method; B&B; running time of the individual TSP; sample maximum; the largest observation.

УДК 004.021

О.К. Канев

НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ МЕЖАТРИБУТИВНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящей статье предлагается алгоритм неиерархической нечеткой кластеризации, учитывающий межатрибутивную корреляцию при вычислении расстояния от объекта до центра кластера в *N*-мерном пространстве. Представлена математическая модель многомерного объекта. Проведён теоретический анализ поставленной задачи и обоснована необходимость учета межатрибутивной корреляции при оценке расстояния. Приводится описание предлагаемого алгоритма и методики оценки качества полученного разбиения. В экспериментальной части проводится сравнительный анализ показателей работы алгоритмов Fuzzy C-Means и Correlation C-Means. На основе полученных данных сделаны выводы.

Ключевые слова: кластерный анализ; нечеткая кластеризация; интеллектуальный анализ данных; описательный набор; межатрибутивная корреляция; многомерный объект.

Введение

Кластеризация многомерных объектов является одной из наиболее перспективных на сегодняшний день ветвей интеллектуального анализа данных. Это обусловлено в первую очередь необходимостью группировать объекты произвольного множества по категориям в условиях с высокой энтропией, основываясь исключительно лишь на описательном наборе признаков, поставленном в соответствие каждому объекту. Другая задача, для решения которой столь же актуален кластерный анализ данных, является автоматическая выработка эталонной базы на основе образцовой выборки.

Существует достаточно широкий спектр различных методов кластерного анализа, однако наибольшую популярность при решении задач кластеризации приобрели алгоритмы, основанные на поиске оптимального (в определенном смысле) разбиения множества данных на кластеры (группы) [1]. Во многих задачах в силу своих достоинств используются именно алгоритмы построения разбиения, такие как k-means [2], Hard C-Means [1], Fuzzy C-Means [1, 3], Possibilistic C-Means [4] и алгоритм Гюстафсона-Кесселя [1]. Однако, как отмечено в [5], недостатком предлагаемых алгоритмов является привязка к конкретной форме кластера. Кроме того, при оценке расстояния между объектом и прототипом кластера не учитывается корреляция между атрибутами, участвующими в описании объекта. Ввиду этого мы можем при разбиении получить ряд ошибок отнесения объекта не в тот кластер, что способствует снижению качественных показателей работы алгоритма.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния вычисления расстояния между объектом и прототипом кластера с учетом межатрибутивной корреляции на конечный результат кластерного анализа многомерных объектов.

Постановка задачи

Пусть нам дано множество объектов *X*, мощностью *D* элементов. Каждый объект характеризуется перечнем из *N* признаков (атрибутов). Не имея никаких априорных сведений о предоставленных объектах, кроме числовых значений их атрибутов, необходимо выделить на исходном множестве ряд подмножеств (кластеров). Причем в процессе кластеризации необходим учет межатрибутивной корреляции для улучшения качественных показателей результирующего разбиения.

Модель объекта

Так как каждому объекту множества *X* поставлен в соответствие описательный набор из *N* признаков, мы можем представить выборку в виде матрицы «объект-признак», которая имеет следующий вид:

$$X = \begin{vmatrix} x_1^{(1)} & \cdots & x_j^{(1)} & \cdots & x_N^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ x_1^{(k)} & \cdots & x_j^{(k)} & \cdots & x_N^{(k)} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{(D)} & \cdots & x_j^{(D)} & \cdots & x_N^{(D)} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $x_j^{(k)}$ – числовое значение *j*-го признака *k*-го объекта, *D* – количество объектов в выборке (мощность выборки), *N* – число признаков, описывающих объект.

Такое представление позволяет рассматривать нам отдельно взятый объект как точку в *N*-мерном пространстве.

Для разбиения множества *X* на кластеры необходим набор *C* из *L* опорных точек (их число равняется числу выделяемых кластеров) *N*-мерного пространства, которые выступают в роли центроидов или прототипов кластеров. Описывается множество *C* аналогичной (1) матрицей «центроид-признак»:

$$C = \begin{vmatrix} c_1^{(1)} & \cdots & c_j^{(1)} & \cdots & c_N^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ c_1^{(i)} & \cdots & c_j^{(i)} & \cdots & c_N^{(i)} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^{(L)} & \cdots & c_j^{(L)} & \cdots & c_N^{(L)} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $c_j^{(i)}$ – числовое значение *j*-го признака *i*-го центроида, *L* – количество кластеров.

Решением задачи кластерного анализа является конечное сюръективное отображение *F* множества *X* на множество *C*, обеспечивающее оптимальное разбиение множества *X* на *L* кластеров:

$$F = X \to C, \quad (3)$$

В роли данного отображения *F* выступает матрица разбиения *M*:

$$M = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1i} & \cdots & \mu_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ \mu_{k1} & \cdots & \mu_{ki} & \cdots & \mu_{kL} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{D1} & \cdots & \mu_{Di} & \cdots & \mu_{DL} \end{vmatrix}, \mu_{ki} \in [0;1], \quad (4)$$

где μ_{ki} – степень принадлежности *k*-го объекта *i*-му кластеру.

Теоретический анализ

Как правило, в многомерном анализе данных самой часто используемой метрикой является функция вычисления Евклидового расстояния, выражаемая следующей формулой:

$$\rho_{ki} = \sqrt{\left(x^{(k)} - c^{(i)}\right)^T * \left(x^{(k)} - c^{(i)}\right)}, i = \overline{1, C}, \quad (5)$$

Если проанализировать данную формулу, то очевидно, что можно ввести в качестве промежуточного множителя между множителями подкоренного выражения единичную матрицу *E*, как показано в формуле (6), что никак не повлияет на результат.

$$\rho_{ki} = \sqrt{\left(x^{(k)} - c^{(i)}\right)^T * E * \left(x^{(k)} - c^{(i)}\right)}, i = \overline{1, C}, \quad (6)$$

Матрица *E* выступает в роли масштабирующей матрицы, которая свидетельствует об абсолютной равнозначности атрибутов объекта (то есть о полном отсутствии какой-либо

корреляции между описательными признаками). Однако на практике подобное встречается крайне редко. Кроме того, использование единичной матрицы при вычислении расстояния приводит к выделению гиперсферических кластеров одинакового радиуса, что, вне всякого сомнения, приводит к потерям при разбиении, так как заведомо разделяемые на L кластеров объекты могут содержаться в совершенно разных пропорциях относительно друг друга. Это однозначно снижает качество разбиения. Среди алгоритмов нечеткой кластеризации этот недостаток присущ алгоритму Fuzzy C-Means. В алгоритме Possibilistic C-Means попытались преодолеть данный недостаток, для чего был введен такой параметр, как ширина кластера, однако, как замечено в [6], это приводит к выделению тех же гиперсферических кластеров, но уже разного диаметра. В алгоритме Гюстафсона-Кесселя за счет использования метрики, основанной на использовании в качестве масштабирующей матрицы для каждого кластера его собственной ковариационной матрицы, удалось получить некоторый выигрыш благодаря выделению кластеров в форме гиперэллипсоидов, однако привязка к форме кластера никуда не делась.

Очевидно, что фиксированная форма кластера обусловлена тем, что описательные атрибуты объекта считаются априори независимыми друг от друга. Но так как на практике, как было ранее сказано, подобная ситуация встречается достаточно редко, справедливо предложить алгоритм, учитывающий межатрибутивную корреляцию при оценке расстояния между объектом и центром кластера.

В виду этого для решения поставленной задачи предлагается алгоритм нечеткой кластеризации Correlation C-Means, разработанный на базе алгоритма Fuzzy C-Means, являющегося опорным стержнем, лежащим в основе всей линейки алгоритмов данной серии.

Ниже приведем описание алгоритма Correlation C-Means и в экспериментальной части сравним его качественные и количественные показатели с аналогичными характеристиками алгоритма Fuzzy C-Means, как корневого представителя серии алгоритмов неиерархической нечеткой кластеризации. Его описание приводить в статье мы не будем, так как по структуре он аналогичен предлагаемому алгоритму за исключением используемой метрики и наличия дополнительного этапа.

Описание алгоритма Correlation C-Means

На этапе инициализации задаются следующие параметры:

- количество кластеров C;
- экспоненциальный вес w;
- точность ε.

Очевидно, что число кластеров должно быть не менее двух, иначе не было бы смысла проводить кластерный анализ. Касаемо оптимального значения экспоненциального веса нет особых ограничений, но, как отмечается в [3], его значение принимают, как правило, равным двум в виду того, что нет теоретически обоснованного правила его выбора. Кроме того, в [7] было проведено исследование влияния значения w на результат кластеризации и было установлено, что его значение не влияет на качественные характеристики разбиения. А раз так, то принимаем значение экспоненциального веса равным двум.

Точность выбираем до тысячных, так как в [7] было экспериментально доказано, что величина данного параметра никак не влияет на качество разбиения, способствуя лишь росту времени обработки исходного множества.

Этап 1. Вычисляется корреляционная матрица атрибутов:

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{iN} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & \cdots & r_{Nj} & \cdots & r_{NN} \end{vmatrix}, r_{ij} \in [-1;1], \quad (7)$$

где r_{ij} – коэффициент корреляции i-го и j-го атрибутов, вычисляемый по следующей формуле:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{D}\left[\left(x_i^{(k)} - \overline{x_i}\right) * \left(x_j^{(k)} - \overline{x_j}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{k=1}^{D}\left(x_i^{(k)} - \overline{x_i}\right)^2 * \sum_{k=1}^{D}\left(x_j^{(k)} - \overline{x_j}\right)^2}} \quad (8)$$

Этап 2. Вычисляется начальная матрица нечеткого разбиения M посредством работы алгоритма жесткой кластеризации Hard C-Means, как предлагается в [8].

Этап 3. На основе полученной матрицы M рассчитываются положения кластерных центроидов в заданном N-мерном пространстве по следующей формуле:

$$c^{(i)} = \frac{\sum_{k=1}^{D}\left(\mu_{ki}^{w} * x^{(k)}\right)}{\sum_{k=1}^{D}\mu_{ki}^{w}}, i = \overline{1,C}, \quad (9)$$

где $c^{(i)}$ – центр i-го кластера; μ_{ki} – степень принадлежности k-го объекта i-му кластеру; $x^{(k)}$ – вектор атрибутов k-го объекта; D – число объектов в выборке.

Этап 4. Осуществляется вычисление квадратов расстояний по следующей формуле:

$$\rho_{ki}^2 = \left(x^{(k)} - c^{(i)}\right)^T * R * \left(x^{(k)} - c^{(i)}\right), i = \overline{1,C}, \quad (10)$$

где R – корреляционная матрица, используемая как масштабирующая матрица.

Этап 5. На основе рассчитанных квадратов расстояний выполняется пересчет элементов матрицы M:

$$\mu_{ki}^{*} = \begin{cases} 1, \ если \ \rho_{ki}^2 = 0 \\ \left(\sum_{j=1}^{C}\frac{\rho_{ki}^2}{\rho_{kj}^2}\right)^{-\frac{1}{w-1}}, \ если \ \rho_{ki}^2 \neq 0 \end{cases}, i = \overline{1,C}, \quad (11)$$

где μ_{ki}^{*} – пересчитанная степень принадлежности k-го объекта i-му кластеру

Этап 6. После пересчета матрицы разбиения проверяется условие оптимальности полученного результата. Для этого вычисляется матричная норма разности старой и новой матриц нечеткого разбиения и сравнивается с заданным параметром ε. В качестве матричной нормы принимается максимум модуля. Необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\left\|M - M^{*}\right\| = max\left\{\left|\mu_{ki} - \mu_{ki}^{*}\right|\right\} < \varepsilon \quad (12)$$

Если условие (12) не выполняется, новая матрица нечеткого разбиения считается старой и осуществляется переход на этап расчета центров кластеров. В противном случае считается, что оптимальное разбиение достигнуто, и алгоритм завершает свою работу.

На рис. 1 представлена блок-схема данного алгоритма.

Экспериментальная часть

Нам дана экспериментальная выборка, мощность которой составляет 300 объектов. Каждый объект описывается набором из 7 признаков, числовые значения которых лежат в интервале от 0 до 12. Необходимо разбить предоставленное множество на 4 кластера. Как было отмечено в описании алгоритма, экспоненциальный вес принимаем равным двум, а точность задаем до тысячных долей.

Каждый объект имеет экспертную оценку от 0 до 3, с которой после установления соответствия между номером кластера и номером состояния объекта будет сравниваться присвоенный объекту номер кластера. Иными словами, мы будем сравнивать программную оценку с экспертной, которую априори считаем эталонной. При несовпадении присвоенного номера кластера с экспертной оценкой фиксируем ошибку отнесения не в тот кластер. Качество разбиения оценивается по следующей формуле:

$$Q = \frac{D - E}{D} * 100\% \quad (13)$$

где E – количество ошибок, D – мощность выборки.

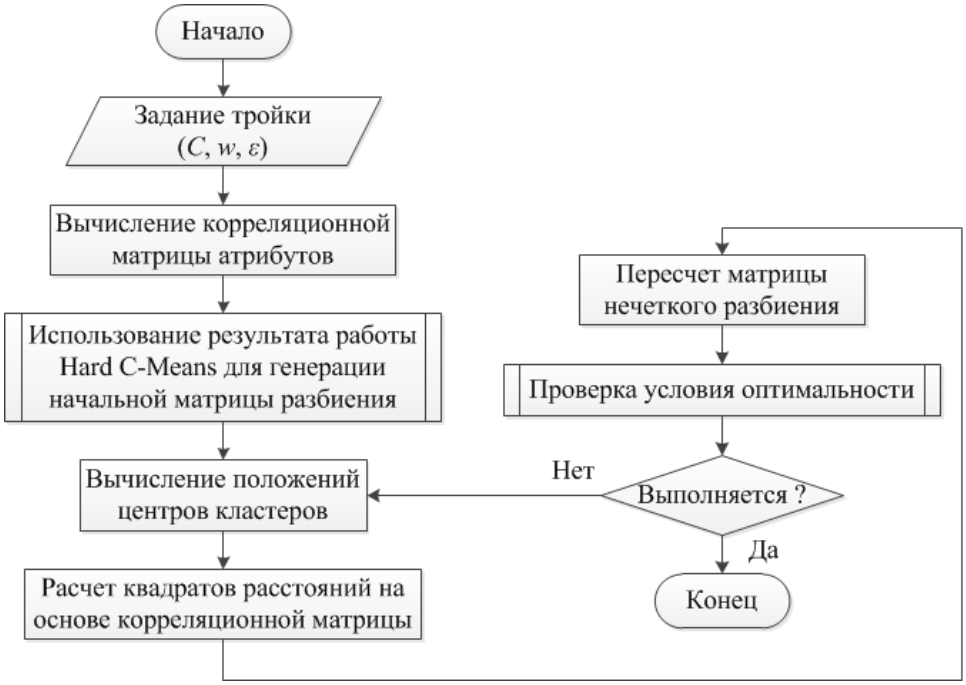


Рис. 1. Блок-схема алгоритма Correlation C-Means

Кроме того, в рамках эксперимента фиксируется время выполнения алгоритма *t* и число итераций *n*, за которые достигается оптимальное разбиение.

Для проведения эксперимента из предоставленного множества формируются тестовые выборки мощностью от 50 до 300 объектов с шагом, равным 50.

Для проведения эксперимента было разработано приложение на языке C# в среде Microsoft Visual Studio 2010.

Сравнение качественных и количественных характеристик представленного в статье алгоритма проводится с аналогичными характеристиками алгоритма Fuzzy C-Means, в котором не учитывается межатрибутивная корреляция в виду использования единичной матрицы в качестве масштабирующей.

Результаты и выводы

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка качественных и количественных характеристик алгоритмов Fuzzy C-Means и Correlation C-Means

Мощность выборки	Fuzzy C-Means				Correlation C-Means			
	Q	E	n	t, мс	Q	E	n	t, мс
50	48%	26	13	4,92	92%	4	739	152,79
100	40%	60	15	8,02	88%	12	1595	665,31
150	35,33%	97	16	12,02	72%	42	624	389,19
200	34%	132	13	16,04	88%	24	871	727,29
250	33,2%	167	14	19,97	88%	30	1055	1122,44
300	33,33%	200	15	23,96	84%	48	1024	1304,57

Как видно из представленных результатов эксперимента, использование при оценке расстояния между объектами межатрибутивной корреляции приводит к резкому увеличению числа итераций, что однозначно ведет к росту затрачиваемого на разбиение времени, однако существенно снижается количество ошибок отнесения объекта не в тот кластер, что означает безусловный рост показателей качественных характеристик разбиения.

Кроме того, результаты проведенного исследования показали, что качественные характеристики разбиения не зависят от мощности кластеризируемой выборки.

Библиографический список

1. Барсегян, А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.

2. Daniel Fasulo «An Analysis Of Recent Work on Clustering Algorithms». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://logic.pdmi.ras.ru/ics/papers/aca.pdf

3. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Винница: Континент-Прим. – 2003. – 198 с.

4. R. Krishnapuram and J. Keller. A possibilistic approach to clustering. IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1. no. 2, pp. 98-110, Apr. 1993.

5. Канев, О.К. Применение нечеткой кластеризации многомерных объектов для дальнейшего диагностирования их состояний / О.К. Канев // Будущее технической науки: сборник материалов XV Международной молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. – С. 116-117.

6. Канев, О.К. Использование методов нечеткой кластеризации в рамках реализации блока обучения диагностической системы / О.К. Канев // «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)»: материалы XXII международной научно-технической конференции, Н. Новгород, 22 апреля 2016 г. – Н.Новгород: НГТУ. – 2016. – С. 362-363.

7. Канев, О.К. Проблема неопределенности выбора начальных условий для работы алгоритмов нечеткой кластеризации многомерных объектов / О.К. Канев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 20-21 апреля 2016 года / ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Электрон. дан. (1 файл: 33 Мб.). – Ижевск, 2016. – 1044 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Acrobat reader 6.0 и выше – С. 548-553.

8. Канев, О.К. Использование четкой кластеризации для начальной инициализации центров кластеров при нечеткой кластеризации данных / О.К. Канев // Вектор развития современной науки. X Международная научно-практическая конференция.[Электронный ресурс].–М.:Изд-во «Олимп», 2016. – С. 477-481. – Режим доступа: http://olimpiks.ru/d/797165/d/sbornik_x_konferentsii.pdf.

O.K. Kanev

FUZZY CLUSTERING MULTIDIMENSIONAL OBJECTS WITH TAKING INTO ACCOUNT INTER-ATTRIBUTIVE CORRELATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

A nonhierarchical fuzzy clustering algorithm provided taking into account inter-attributive correlation for an object-centroid distance calculation process in an N-dimensional space is proposed in the paper. A multidimensional object mathematical model is presented. The main problem theoretical analysis has been performed. Necessity to take into account inter-attributive correlation for an object-centroid distance calculation process is reasoned. The proposed algorithm description and partitioning quality evaluation methods are given. Fuzzy C-Means and Correlation C-Means performance characteristics comparative analysis is carried out in the experimental part. Conclusions based on experiments results are done.

Keywords: clustering; fuzzy clustering; data mining; descriptive set; inter-attributive correlation; multidimensional object.

УДК: 519.854.2

Д.И. Коган[1], Ю.С. Федосенко[2]

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ ОДНОФАЗНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ БИНАРНОГО ПОТОКА В СИСТЕМЕ ДВУХ ИДЕНТИЧНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Московский технологический университет[1],
Волжский государственный университет водного транспорта[2]

Рассматривается модель одностадийного обслуживания конечного детерминированного потока объектов в двухпроцессорной системе с накопительно-расходным компонентом – резервуаром ограниченной емкости. Поток состоит из двух подпотоков: подпотока объектов, пополняющих резервуар, и подпотока объектов, заполняемых из резервуара. С каждым объектом ассоциируется линейная функция индивидуального штрафа за время пребывания в системе обслуживания. Для задачи построения расписания, минимизирующего суммарный штраф по всем объектам потока, конструируется реализующий концепцию динамического программирования решающий алгоритм.

Ключевые слова: задача диспетчеризации, расписание, динамическое программирование

1. Рассматриваемая модель возникла при исследовании процессов грузовой обработки танкерного флота в условиях Северного завоза авиационного топлива через речной порт г. Салехарда. В течение непродолжительного навигационного периода крупнотоннажным танкерным флотом по реке Обь с нефтеперегонных заводов Западной Сибири в Салехардский порт доставляется авиационное топливо. Прибывающие суда в определенной очередности подаются к специализированному терминалу, техническими средствами которого нефтепродукт перекачивается в резервуар ограниченного объема. Данный резервуар является ёмкостью временного хранения, из которой в соответствии с оперативным планом нефтепродукт отбирается для заправки парка воздушных судов. В описанной технологической схеме задействована техника, характеризующаяся различными технико-экономическими параметрами. Задача диспетчеризации заключается в выработке стратегии управления очередностью их обслуживания, которое в пределах горизонта оперативного планирования обеспечивает сокращение суммарных эксплуатационных расходов, обусловленных непроизводительными простоями. В статье дано описание математической модели рассматриваемой двухпроцессорной технологии обслуживания, обобщающей однопроцессорный случай [1], сформулирована оптимизационная задача синтеза оптимального расписания и на основе концепции динамического программирования [2] выполнено построение решающего алгоритма.

2. Изучается модель $\boldsymbol{M}$, в которой конечный поток объектов $O_n = \{o_1, o_2, \ldots, o_n\}$ подлежит однофазному обслуживанию стационарной двухпроцессорой системой с накопительно-расходным компонентом − резервуаром ёмкости V^*; объекты $o_1, o_2, \ldots, o_n$ потока O_n пронумерованы в порядке их поступления в систему обслуживания; заполнение резервуара в момент времени t будем характеризовать переменной $V(t)$ с известным начальным значением $V(0)$.

Для каждого объекта o_i, $i = \overline{1,n}$ определены целочисленные параметры: t_i − момент поступления в очередь на обслуживание $(0 = t_1 \le t_2 \le \ldots \le t_n)$, τ_i − норма длительности обслуживания, a_i − штраф за единицу времени пребывания в системе обслуживания, v_i − объемная характеристика (вместимость объекта).

Поток O_n обладает свойством бинарности, т.е. состоит из двух подпотоков O^+ и O^- таких, что $O^+ \cup O^- = O_n$, $O^+ \cap O^- = \varnothing$. Объекты подпотока O^+ предназначены для пополнения резервуара, а объекты подпотока O^- предназначены для заполнения из резервуара. Принадлежность объекта o_i, $i = \overline{1,n}$ тому или иному подпотоку определяется значением параметра w_i ($w_i = +1$, если $o_i \in O^+$; $w_i = -1$, если $o_i \in O^-$).

Обслуживание каждого объекта подпотока O^+ осуществляется процессором P^+, без прерываний. Аналогично осуществляется обслуживание каждого объекта подпотока O^-: процессором P^- и также без прерываний. Процессоры P^+ и P^- идентичны по производительности, готовы к обслуживанию начиная от момента времени $t = 0$; обслуживание объектов из соответствующих подпотоков оба процессора P^+ и P^- осуществляют независимо, в том числе в частично или полностью в паралельных режимах; неоправданные простои процессоров отстствуют.

Как очевидно, необходимым условием возможности обслуживания процессором P^+ объекта o_i из подпотока O^+ на дискретном временном промежутке $[\,t\,,\ t + \tau_i\,]$ является наличие в резервуаре в каждый момент времени по крайней мере одной единицы свободного объема; в результате реализации обслуживания объекта o_i из подпотока O^+ заполнение резервуара увеличивается на v_i. Аналогично необходимым условием обслуживания объекта o_i из подпотока O^- на временном промежутке $[\,t\,,\ t + \tau_i\,]$ является наличие в резервуаре в каждый момент временного по крайней мере одной единицы заполнения резервуара; в результате реализации обслуживания объекта из подпотока O^- заполнение резервуара уменьшается на v_i.

Расписание обслуживания потока O_n определяем как перестановку $\rho = \{i(1), i(1), \ldots, i(n)\}$ совокупности индексов $N = \{1, 2, \ldots, n\}$. При его реализации объект с индексом $i(k)$ обслуживается соответствующим ему процессором k-м в общей очереди на обслуживание ($k = \overline{1,n}$). Условимся считать, что если процессоры P^+ и P^- одновременно приступают к обслуживанию объектов из им соответствующих потодпотоков, то k-м по очереди будет обслуживаться объект потодпотка O^+, а объект подпотока O^- будет обслуживаться (k +1)-м.

Расписание ρ именуем допустимым, если в процессе его выполнения удовлетворяются отмеченные выше объемные ограничения, т.е.

$$0 \le V(0) + \sum_{p=1}^{q} v_{i(p)} \cdot w_{i(p)} \le V^*,\ q = \{1, 2, \ldots, n\}.$$

Поскольку рассматриваемая модель ***M*** исключает возможность неоправданных простоев процессоров, то данное обстоятельство обеспчивает компактность допустимых расписаний обслуживания [3]; совокупность таких расписаний обозначим Ω.

Заполнение резервуара после завершения обслуживания всех объектов потока O_n оказывается равным $V(0) + \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot w_i$. Легко показать, что выполнение неравенства $0 \le V(0) + \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot w_i \le V^*$ является необходимым и достаточным условием непустоты совокупности Ω. Каждое расписание ρ из Ω однозначно определяет для произвольного объекта $o_{i(k)}$ момент начала $t_{beg}(i(k), \rho)$ и момент завершения $t^*(i(k), \rho)$ его обслуживания; при его реализации суммарный штраф $K(\rho)$ по всем объектам потока O_n оказывается равным $\sum_{i=1}^{n} a_i \cdot [t^*(i, \rho) - t_i]$.

Требуется построить расписание, минимизирующее величину суммарного штрафа, т.е. найти решение задачи

$$\min_{\rho\in\Omega} K(\rho). \qquad (1)$$

3. Решающий алгоритм сконструируем на основе концепции динамического программирования, для чего определение искомой последовательности обслуживания объектов будем трактовать как синтез оптимальной траектории в соответствующим образом построенной дискретной системе с конечным числом состояний и конечным числом возможных в каждом состоянии управлений; при этом пошаговые штрафы зависят от выбираемых управлений. При таком подходе решение задачи (1) означает построение минимизирующей суммарный штраф последовательности управлений, переводящей систему из начального состояния в одно из финальных ее состояний.

Будем считать, что управленческие решения в рассматриваемой системе принимаются в моменты, когда один из процессоров оказался свободным и его надо загрузить работой по обслуживанию поступающих объектов. Каждый такой момент характеризуется набором $T = < t, \alpha, \mu, S_1, S_2 >$, где t – момент принятия решения по загрузке процессора; $\alpha = 1$, если свободным в момент времени t оказался процессор P^+, и $\alpha = 0$, если свободным в данный момент времени оказался процессор P^-; μ – количество тактов времени, оставшихся до освобождения другого процессора, $\mu \geq 0$; S_1 и S_2 соответственно подмножества индексов объектов подпотоков O^+ и O^-, которые прибыли в систему, но пока не обслужены. Полагаем, что в S_1 и S_2 имеются нулевые индексы; объект с нулевым индексом считается фиктивным, его обслуживание означает простой соответствующего процессора; необходимость введения такой возможности пояснена в [1].

Наборы вида $T = < t, \alpha, \mu, S_1, S_2 >$ будем именовать состояниями системы. Управление в состоянии T заключается в выборе индекса объекта, который в этот момент будет поставлен на обслуживание процессором P^-, если $\alpha = 0$, и процессором P^+, если $\alpha = 1$. Отметим, что знание начального заполнения резервуара $V(0)$ и подмножеств S_1, S_2 дает возможность арифметически подсчитать заполнение $V(t)$ резервуара по состоянию на рассматриваемый момент времени. Зная величину $V(t)$, арифметически определяем подмножество индексов объектов, любой из которых в данный момент может быть принят на обслуживание без прерываний при некотором возможном функционировании на соответствующем отрезке времени другого процессора; указанное подмножество обозначим $M(T)$. Отметим, что $M(T) \subseteq S_2$, если $\alpha = 0$, и $M(T) \subseteq S_1$, если $\alpha = 1$.

Начальное состояние системы определяем как $T^0 = < 0, 0, 0, S_1^0, S_2^0 >$, где $S^0{}_1$ и $S^0{}_2$ – совокупности индексов объектов подпотоков O^+ и O^-, которые по состоянию на момент времени 0 имеются в системе. Все состояния, в которых первая компонента превышает t_n, четвертая и пятая являются пустыми множествами, именуем финальными; множество всех финальных состояний системы обозначим через $\boldsymbol{F}$. Через $D_1[a, b]$ и $D_2[a, b]$ обозначим совокупности индексов объектов подпотоков O^+ и O^- соответственно, поступающих в систему обслуживания на произвольном отрезке времени $[a + 1, b]$.

Введем в рассмотрение функцию $B(t, \alpha, \mu, S_1, S_2)$ – минимально возможный суммарный штраф по всем объектам входного потока, которые по состоянию на момент принятия решения t еще не обслужены. $B(t, \alpha, \mu, S_1, S_2)$ – функция Беллмана для решаемой задачи; $B(0, 0, 0, S_1^0, S_2^0)$ – оптимальное значение суммарного штрафа $K_{opt}(\rho)$.

Пусть в состоянии системы $T = < t, \alpha, \mu, S_1, S_2 >$ в совокупности $M(T)$ выбран индекс i, т.е. в момент времени t на обслуживание свободным процессором поступает объект o_i. В таком случае величина штрафа по этому объекту оказывается равной $a_i(t + \tau_i - t_i)$. В очередной

момент принятия решения состояние системы будет описываться как $T^* = < t^*, \alpha^*, \mu^*, S_1^*, S_2^* >$; при этом $t^* = t + \min(\tau_i, \mu)$; $\alpha^* = \alpha$ при $\tau_i < \mu$ и $\alpha^* = 1 - \alpha$ в противном случае; $\mu^* = \mathrm{mod}(\tau_i < \mu)$; $S_1^* = \{ S_1^* \cup D_1[t, t + \min(\tau_i, \mu)]\} \setminus \{i\}$ и $S_2^* = \{ S_2^* \cup D_2[t, t + \min(\tau_i, \mu)]\}$ при $\alpha = 1$, $S_1^* = \{ S_1^* \cup D_1[t, t + \min(\tau_i, \mu)]\}$ и $S_2^* = \{ S_2^* \cup D_2[t, t + \min(\tau_i, \mu)]\} \setminus \{i\}$ при $\alpha = 0$.

Согласно принципу Беллмана записываем

$$B(t, \alpha, \mu, S_1, S_2) = \min_{i \in M(T)} \{ a_i(t + \tau_i - t_i) + B(t^*, \alpha^*, \mu^*, S_1^*, S_2^*)\}. \quad (2)$$

Кроме того, как очевидно,

$$B(T) = 0 \text{ при } T \in \boldsymbol{F}. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) суть рекуррентные соотношения динамического программирования для решения задачи (1).

Дополнительно отметим, что множество индексов $M(T)$ для некоторых состояний системы $T` = < t`, \alpha`, \mu`, S_1`, S_2` >$ может оказаться пустым. В таком случае следует считать, что $B(t`, \alpha`, \mu`, S_1`, S_2`) = +\infty$.

Библиографический список

1. Коган, Д. И. Задачи обслуживания бинарного потока объектов в системе с накопительно-расходным компонентом / Д. И. Коган, А.С., Куимова, Ю. С. Федосенко // Автоматика и телемеханика. 2014. № 7. – С. 122-135.
2. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 457 с.
3. Коган, Д. И. Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы / Д. И. Коган, Ю. С. Федосенко // Дискретная математика. 1966. Т. 8. Вып. 3. – С. 135-147.

D.I. Kogan[1], **Yu.S. Fedosenko**[2]

MODEL AND SYNTHESIS ALGORITHM FOR THE OPTIMUM SCHEDULE OF SINGLE-STAGE SERVICING OF BINARY STREAM OF OBJECTS IN THE SYSTEM OF TWO IDENTICAL PROCESSORS

Moscow Technological University[1],
Volga State University of Water Transport[2]

We consider a model for single-stage servicing of a finite deterministic stream of objects by a two-processor system with a storage component, a reservoir of bounded capacity. The stream consists of a stream of objects that fill the reservoir and a stream of objects that are filled from the reservoir. With each object, we associate a linear individual penalty function for the time it spends in the servicing system. For the task of constructing a schedule with minimum total penalty for all stream objects, the decision algorithm based on the concept of dynamic programming is constructed.

Keywords: dispatching problem, schedule, dynamic programming

УДК519.615.7

А.Г. Коротченко, В.М. Сморякова

О ТЕСТИРОВАНИИ ОДНОЙ СТРАТЕГИИ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматривается реализация одной стратегии численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, обладающей свойством оптимальности в том смысле, что число узлов интегрирования на фиксированном отрезке является минимальным при выполнении ограничений, определяемых точностью вычислений.

Ключевые слова: конечно-разностные формулы, стратегии интегрирования.

Введение

При численном решении различного рода задач происходит перестройка модели вычислений, связанная с тем, что в ходе вычислений извлекается новая информация о решаемой задаче. При этом алгоритм решения таких задач, как правило, зависит от ряда параметров, которые можно выбирать на каждом этапе алгоритма, исходя из требований, предъявляемых к решению задачи.Задачи, связанные с построением такого рода алгоритмов, рассматривались, например, в [1-10].

В данной статье рассматривается задача построения алгоритма численного интегрирования, основанного на использовании конечно-разностной формулы, при условии минимизации числа узлов интегрирования на заданном отрезке, при выполнении ограничений, связанных с точностью вычислений.

Постановка задачи

Пусть требуется найти решение $Y = Y(x)$ задачи Коши (предполагается, что решение $Y(x)$ - единственно и четырежды непрерывно дифференцируемо на отрезке $[x_0, t]$) для системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$Y' = F(x,Y),\ Y(x_0) = Y_0,$$
$$Y = Y(x) = (y^1(x),...,y^n(x)),\ x_0 \le x < t, \tag{1}$$

где значение параметра t либо задаётся априори, либо определяется в процессе интегрирования системы. В случае, когда система (1) линейна, $F(x,Y) = B(x)Y + b(x)$, где $B(x)$ - $(n \times n)$- матрица, $b(x)$ - n-мерный вектор.

Для определения численных значений $Y_i = \left(y_1^i,...,y_n^i\right)$, $i = 1,2...$, решения системы (1) будем использовать метод, основанный на применении конечно-разностных формул.

Рассмотрим конечно-разностную формулу:

$$Y_i = a_{i-3}Y_{i-3} + a_{i-2}Y_{i-2} + a_{i-1}Y_{i-1} + h_i a_i q_i, \tag{2}$$

где

$$q_i = F(x_i, Y_i),\ Y_i = (y_i^1,...,y_i^n),\ Y_i = (y_i^1, y_i^2,...,y_i^n)$$
$$a_{i-3} = 1 - a_{i-2} - a_{i-1},$$
$$a_{i-2} = \frac{-h_i^2\psi_i^2}{h_{i-2}h_{i-1}(h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2} + 2h_ih_{i-2} + 3h_i^2 + 4h_{i-1}h_i)},$$
$$a_{i-1} = \frac{(h_i + h_{i-1})^2\psi_i^2}{h_{i-1}(h_{i-2} + h_{i-1})(h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2} + 2h_ih_{i-2} + 3h_i^2 + 4h_{i-1}h_i)},$$

$$a_i = \frac{(h_i^2 + h_{i-1}h_i)\psi_i}{h_i(h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2} + 2h_ih_{i-2} + 3h_i^2 + 4h_{i-1}h_i)},$$

при этом $\psi_i = h_{i-2} + h_{i-1} + h_i$, $h_i = x_i - x_{i-1}$ - шаг интегрирования.

Будем считать, что система (1) удовлетворяет условиям, при выполнении которых вектор $Y_i = \left(y_1^i, ..., y_n^i\right)$ может быть определён из решения системы уравнений

$$Y_i = a_{i-3}Y_{i-3} + a_{i-2}Y_{i-2} + a_{i-1}Y_{i-1} + h_ia_iF\left(x_i, Y_i\right). \quad (3)$$

Если система (1) линейна, то (3) принимает вид

$$C_iY_i = c_i, \quad \textbf{Ошибка!}$$

Закладка не определена.

где $C_i = E - h_ia_iB(x_i)$, $c_i = a_{i-3}Y_{i-3} + a_{i-2}Y_{i-2} + a_{i-1}Y_{i-1} + h_ia_ib(x_i)$, E - единичная матрица. Будем считать, что система (3) может быть решена одним из методов решения систем нелинейных уравнений, например, методом Ньютона, а система (4)| - методом Гаусса.

В качестве основной характеристики формулы (2) будем рассматривать локальную ошибку, получаемую на i-ом шаге для каждой j-ой компоненты решения $Y_i = (y_i^1, ..., y_i^n)$:

$$R_i^j = \frac{h_i^6 + 2(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^5 + 2h_{i-1}(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^4}{3h_i^2 + 2(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i + (h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2})} +$$
$$+\frac{2h_{i-1}(h_{i-2} + h_{i-1})(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^3 + h_{i-1}^2(h_{i-2} + h_{i-1})^2h_i^2}{3h_i^2 + 2(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i + (h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2})}(y^{IV}(\Theta_i))^j, \quad (4)$$

где $x_{i-2} - h_i \le \Theta_i \le x_{i-1} + h_i$ и $(y^{IV}(\Theta_i))^j$ - значение четвертой производной от j-ой компоненты вектора решения $Y(x)$ в точке Θ_i. Локальная ошибка (4) возникает вследствие конечно-разностной аппроксимации производных системы дифференциальных уравнений.

Потребуем, чтобы в процессе интегрирования системы выполнялись условия:

$$\max_{1\le j\le n} |R_i^j| \le \varepsilon_i,$$

где ε_i - заданная точность на i-ом шаге интегрирования.

Пусть четвёртая производная от компонент вектора решения $Y(x)$ удовлетворяет на отрезке $[x_0, x_0 + z]$ условию:

$$\max_{1\le j\le n} |y^{IV}(x)^j| \le K,$$

где $z > 0$, $K > 0$ - вещественные константы.

Тогда получаем, что ограничение на формулу (2), обусловленное точностью вычислений на i-ом шаге интегрирования, сводится к выполнению неравенства:

$$\varphi_i(h_{i-2}, h_{i-1}, h_i) = h_i^6 + 2(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^5 + 2h_{i-1}(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^4 +$$
$$+2h_{i-1}(h_{i-2} + h_{i-1})(h_{i-2} + 2h_{i-1})h_i^3 + h_{i-1}^2(h_{i-2} + h_{i-1})^2h_i^2 - 3\Delta_ih_i^2 - \quad (5)$$
$$-2(h_{i-2} + 2h_{i-1})\Delta_ih_i - (h_{i-1}^2 + h_{i-1}h_{i-2})\Delta_i \le 0,$$

здесь $\Delta_i = 2\varepsilon_iK^{-1}$, $i = 1, 2, ...$.

Обозначим через $h_{2i-2}=\tau_{i-1}$, $h_{2i-1}=\tau_i$, $h_{2i}=\tau_i$ в функциях $\varphi_{2i}(h_{2i-2},h_{2i-1},h_{2i})$, определяемых в **Ошибка! Закладка не определена.**, и введем в рассмотрение следующие функции:

$$f_i(\tau_{i-1},\tau_i)=14\tau_i^5+12\tau_{i-1}\tau_i^4+3\tau_{i-1}^2\tau_i^3-8\Delta_i\tau_i-3\Delta_i\tau_{i-1}, \quad (6)$$

при этом $\varphi_{2i}(h_{2i-2},h_{2i-1},h_{2i})=\tau_i f_i(\tau_{i-1},\tau_i)$, $i=1,2,\ldots$.

Тогда из выполнения неравенства

$$f_i(\tau_{i-1},\tau_i)\le 0 \quad (7)$$

при $\tau_i>0$ и сделанных предположений относительно шагов интегрирования будет следовать выполнение соотношения (5).

Стратегия интегрирования и её реализация

Определим процедуру выбора шагов интегрирования конечно-разностной формулы (2), на отрезке $[x_0,x_0+z]$, $z>0$.

Пусть процесс интегрирования с использованием формулы (2) начинается с узла x_0, тогда при известном значении τ_{j-1} значение τ_j находим таким образом, чтобы выполнялось неравенство (7) при $i=j$, и полагаем $h_{2j-1}=\tau_j$, $h_{2j}=\tau_j$, где $h_{2j-2}=\tau_{j-1}$, а $x_{2j-1}=x_{2j-2}+h_{2j-1}$, $x_{2j}=x_{2j-1}+h_{2j}$, $j=1,2,\ldots$.

Если процесс интегрирования на отрезке $[x_0,x_0+z]$ заканчивается в узле $x_{2\mu}$, $\mu\ge 1$, то вектор $X(\mu)=(h_1,h_2,\ldots,h_{2\mu-1},h_{2\mu})$, получаемый с помощью описанной процедуры, будем называть стратегией интегрирования или просто стратегией. Множество всех таких стратегий обозначим $\Omega_1(\mu)$. Обозначим через $\bar{X}(\mu)\in\Omega_1(\mu)$ стратегию, в которой на каждом шаге значении τ_i выбирается максимальным при выполнении ограничения (7).

Как было указано в [10], стратегия $\bar{X}(\mu)$ оптимальна в том смысле, что число узлов интегрирования минимально на отрезке $[x_0,x_0+z]$при соблюдении соответствующих ограничений. Для реализации стратегии $\bar{X}(\mu)$на отрезке $[x_0,x_0+z]$ при заданном значении $\bar{\tau}_0$ необходимо находить $\bar{\tau}_i$ как единственный положительный корень уравнения $f_i(\tau_{i-1},\tau_i)=0$, где $i=1,2,\ldots$, и нужно знать оценку четвёртой производной от компонент решения системы дифференциальных уравнений (1). Будем находить указанные оценки, используя в качестве аппроксимации решения интерполяционные полиномы Лагранжа четвёртой степени. Для этого нужно знать решение $Y(x_0+z)$, которое будем находить по формуле (2), где решение Y_{-3}, Y_{-2}, Y_{-1} в узлах x_{-3}, x_{-2}, x_{-1} уже найдены с помощью какого-либо одношагового метода. Заметим, что Y_0 - начальное условие в узле x_0.

В общем случае при интегрировании на отрезке $[x_0,t]$, данный отрезок разбивается на несколько отрезков длины z. Процесс интегрирования начинается на отрезке $[x_0,x_0+z]$. Переход к новому отрезку длины z осуществляется при условии выполнения неравенства $x_{2\mu+2}>x_0+z$, где в качестве x_0 выбирается значение $x_{2\mu}$, и оценка четвёртой производной на данном отрезке вычисляется также, как было описано выше для отрезка $[x_0,x_0+z]$. Дальнейший переход к новому отрезку длины z производится аналогичным образом. Описанная процедура заканчивается, когда будет выполнено условия окончания процесса интегрирования.

Вычислительный эксперимент

Ниже приводятся результаты вычислительного эксперимента по тестированию процедуры численного интегрирования с использованием уравнений, решения которых имеют вид, показанный на рисунках 1, 2, 3, и которые будем называть решениями первого, второго и третьего типов соответственно.

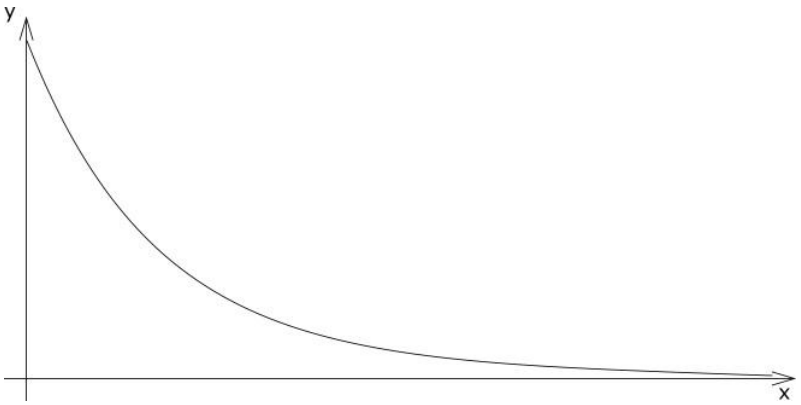


Рис.1. Решение первого типа

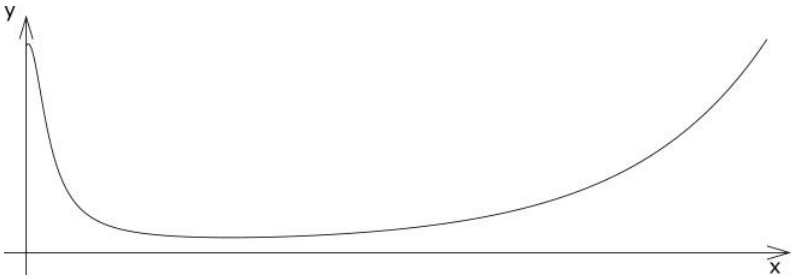


Рис. 2. Решение второго типа

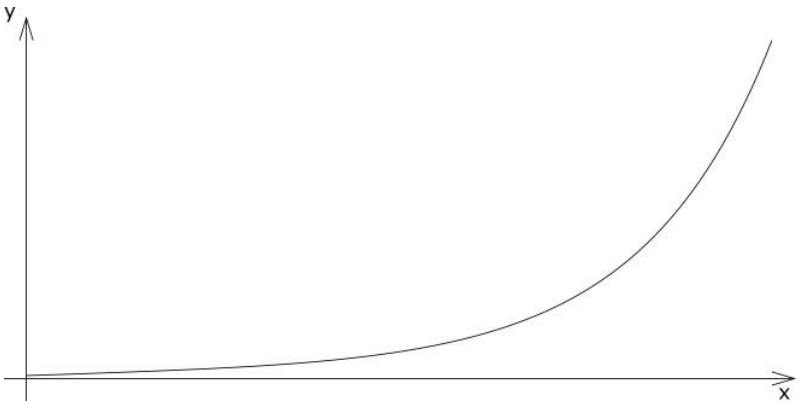


Рис. 3. Решение третьего типа

Рассмотримзадачу Коши для уравнения:

$$y' = \frac{c - 2bx}{a + bx^2} y\,,\ y(0) = \frac{1}{a}.$$

Здесь a, b, c - положительные параметры.Решением данной задачи является функция:

$$y(x) = \frac{e^{cx}}{a + bx^2}\,.$$

Варьируя значения параметров a, b и c, получаем решения первого, второго и третьего типов.

В таблицах 1, 2 и 3 приведены результаты вычислительных экспериментов, полученные для уравнений, имеющих решения первого, второго и третьего типов соответственно.Здесь h_0, h_{-1}, h_{-2}

-значения начальных шагов ($h_0 = h_{-1} = h_{-2} = \overline{\tau}_0$), $\varepsilon_i = \varepsilon$ - заданная точность, $i = 1,2,\ldots,N$ - число выполненных шагов, z - длина интервала, на котором оценивалась четвёртая производнаяот решения, σ - максимальная ошибка. Под максимальной ошибкой понимается наибольшая ошибка, полученная для решения, на всём отрезке интегрирования. Уравнение $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 0$, $i = 1,2,\ldots$, решалось с точностью 0.00001.Решения Y_{-3}, Y_{-2}, Y_{-1} найдены, используя формулу Эйлера.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента с решением $y(x) = \dfrac{e^{0.3x}}{0.2 + 1.5x^2}$

ε_i	z	N	σ
0.0001	0.1	115	0.000143
0.0001	0.3	105	0.000176
0.0001	0.5	96	0.000268
0.00001	0.1	176	0.000027
0.00001	0.3	177	0.000033
0.00001	0.5	165	0.000045
0.000001	0.1	298	0.000006
0.000001	0.3	303	0.000007
0.000001	0.5	288	0.000007

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента с решением $y(x) = \dfrac{e^{x}}{1 + 5x^2}$

ε_i	z	N	σ
0.0001	0.1	81	0.000250
0.0001	0.3	74	0.000728
0.0001	0.5	77	0.000687
0.00001	0.1	144	0.000080
0.00001	0.3	128	0.000149
0.00001	0.5	128	0.000177
0.000001	0.1	223	0.000023
0.000001	0.3	218	0.000034
0.000001	0.5	222	0.000035

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента с решением $y(x) = \dfrac{e^{x}}{10 + 6x^2}$

ε_i	z	N	σ
0.0001	0.1	51	0.000616
0.0001	0.3	37	0.000533
0.0001	0.5	34	0.001035
0.00001	0.1	71	0.000082
0.00001	0.3	62	0.000131
0.00001	0.5	60	0.000241
0.000001	0.1	117	0.000014

0.000001	0.3	104	0.000025
0.000001	0.5	100	0.000043

Отметим, что для рассматриваемой задачи Коши, с параметрами $a=1$, $b=5$, $c=1$, при интегрировании с постоянным шагом $\tau=0.008$ и максимальной ошибкой $\sigma=0.00018$, число узлов интегрирования $N=600$, а при интегрировании с использованием описанной выше стратегии для $z=0.5$, $\varepsilon=0.00001$ и $\sigma=0.000177$, согласно таблицы 2, число узлов интегрирования $N=128$.

Библиографический список

1. Коротченко А.Г. Об одном алгоритме поиска наибольшего значения одномерных функций //Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1978. Т.18 №3. С. 563-573.
2. Коротченко А.Г. О приближенно-оптимальных алгоритмах поиска экстремума в одном классе функций // Журн.вычисл. матем. и матем. физ., т. 30, № 3, 1990, С. 355-365.
3. Коротченко А.Г. Приближенно-оптимальный алгоритм поиска экстремума для одного класса функций //Журн. вычисл. матем. и матем. физ., т. 36, №5, 1996, С. 30-39.
4. Коротченко А. Г., Лапин А. В. Об одном алгоритме численного интегрирования с оптимальным выбором шага // Вестник ННГУ, сер. «Математическое моделирование и оптимальное управление», вып. 2 (24), Изд. ННГУ, Н. Новгород, 2001, С. 270-278.
5. Коротченко А. Г., Лапин А. В. О построении приближенно — оптимальных алгоритмов численного интегрирования // Вестник ННГУ, сер. «Математическое моделирование и оптимальное управление», вып. 1(26), изд. ННГУ, Н. Новгород, 2003, С. 189-195.
6. Коротченко А.Г. О задачах математического программирования, имеющих многоэтапный характер //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Математическое моделирование и оптимальное управление, вып. 1., 2011, С. 183-187.
7. Коротченко А.Г., Сморякова В.М. Об оценке погрешности алгоритмов поиска экстремума в классах функций, определяемых кусочно-линейной мажорантой //Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013, №3(1), С.
8. Коротченко А.Г., Сморякова В.М. Об одном алгоритме поиска максимума в классе функций, определяемом кусочно-линейной мажорантой //Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №4,2014, С.
9. Коротченко А.Г., Сморякова В.М. О многоэтапных задачах оптимизации // Труды X-ой Международной конференции "Дискретные модели в теории управляющих систем". М.; МАКС Пресс, 2015. С. 118-120
10. Korotchenko A.G., Smoryakova V.M. On a method of construction of numerical integration formulas // AIP Conference Proceedings. V. 1776. № 9780735414389. 2016. P. 090012-1 – 090012-4.

A.G. Korotchenko, V. M. Smoryakova

ONTESTING OF ONE NUMERICAL INTEGRATION STRATEGY

N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The article presents testing results of numerical integration strategy ofordinary systems of differential equations. Proposed integration strategy has a property of optimality, i.e. the number of integration nodes at a fixed interval is minimal under satisfaction of the conditions defined by the calculation tolerance.

Keywords: finite difference formulas, integration strategies.

УДК 004.032.26

К.М. Носков

ОБРАБОТКА МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА КОННЕКТИВИЗМА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Рассматривается проблема классификации априорных многомерных данных. Целью работы является исследование возможности применения методов машинного обучения для обработки многомерных данных. Предлагается алгоритм построения классификатора многомерных данных, основанного на принципе коннективизма. Рассмотрена нейронная сеть на радиально-базисных функциях в качестве коннективистской системы. Описан алгоритм обучения нейронной сети.

Ключевые слова: Классификация, коннективизм, многомерные данные, нейронная сеть, радиально-базисные функции.

Введение

В последнее время происходит значительный рост популярности машинного обучения, которое находит свое практическое применение во многих областях: от развлекательных приложений для смартфонов до решения специализированных бизнес задач. Машинное обучение – новое направление инженерии. Его возможности позволяют создавать совершенно новые продукты, которые ранее были невозможны.

Обработка многомерных данных – непростая задача, требующая огромное количество вычислительных ресурсов. Именно поэтому на смену классическим алгоритмы приходят новые более эффективные методы, основанные на машинном обучении.

Объект исследования

В качестве многомерных данных использованы сведения о пациентах, содержащие количественный состав различных микроорганизмов в микрофлоре кишечника, предоставленные Нижегородским научно-исследовательским институтом эпидемиологии и микробиологии имени И.Н. Блохиной. Каждый объект представлен совокупностью 29 признаков (табл. 1-4), характеризующих состояние микрофлоры желудочно-кишечного тракта по микроорганизмам 376 видов из 70 родов.[1]

Таблица 1

Безусловно положительные признаки

1.	**Количество Bifidobacterium spp.**
2.	**Количество Lactobacillus spp.**
3.	**Количество Lactococcus spp.**
4.	**Количестводругиханаэробныхмикроорганизмов**
5.	**Количество Bacteroides spp.**

Таблица 2

Ограниченно отрицательные признаки

6.	**Количество E.coli (лак+)**
7	**Количество E.coli(всего)**
8.	**Количество Enterococcus spp**

Таблица 3

Безусловно отрицательные признаки

9.	**Количество E.coli (л/д)**
10.	**Количество E.coli (лак-)**
11.	**Количество E.coli (гем+)**
12.	**Количество Enterococcus (гем+)**
13.	**Количество Staphylococcus epidermidis**
14.	**Количество Staphylococcus aureus**
15.	**Количество Klebsiella spp.**
16.	**Количество Enterobacter spp., Pantoea spp.**
17.	**Количество Citrobacter spp.**
18.	**Количество Proteus mirabilis**
19.	**Количество Morganella morganii**
20.	**Количество Proteus vulgaris**
21.	**Количество Providencia spp. и др.**
22.	**Количество Hafnia spp., Serratia spp.**
23.	**Количество Pseudomonas aeruginosa**
24.	**Количество НГОБ**
25.	**Количество Candida spp.**
26.	**Количестводрожжевыхклеток**
27.	**Количество ЭПКП**

Таблица 4

Возбудители заболеваний.

28.	**Количество Shigella spp.**
29.	**Количество Salmonella spp.**

Отдельно взятый объект представляет собой n-мерное пространство признаков, которые априорно разделены на 4 класса, соответствующие степени дисбактериоза пациентов или его отсутствию.

Задача классификации

Проанализировав входные параметры необходимо определить степень дисбактериоза каждого пациента (здоров, дисбактериоз 1-3 степени), т.е. провести классификацию.

Классификация – группировка множества объектов по некоторым классификационным признакам, отражающая степень сходства объектов между собой и принадлежность к заранее определенным классам. Необходимое условие для проведения классификации – существование заранее известных классов и характеризирующих их признаков [2].

Коннективизм в нейронных сетях

Развитие искусственных нейронных сетей вдохновляется биологией. То есть, рассматривая сетевые конфигурации и алгоритмы, исследователи мыслят в терминах организации мозговой деятельности. Разработчикам нейронных сетей приходится выходить за пределы современных биологических знаний в поисках структур, способных выполнять полезные функции. Во многих случаях это приводит к необходимости отказа от биологического правдоподобия, и создаются сети, невозможные в живой материи или требующие неправдоподобно больших допущений об анатомии и функционировании мозга [3].

Коннективизм — один из подходов в области искусственного интеллекта, когнитивной науки, нейробиологии, психологии и философии сознания.Коннективизм, моделируя ментальные или поведенческие явления процессами становления в сетях из связанных между собой простых элементов, является одним из основополагающих принципов при создании искусственных нейронных сетей.

Простым элементом в нейронных сетях является нейрон, а связи представлены весами. Искусственный нейрон имитирует свойства биологического нейрона. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, аналогичный синаптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона.[3]

Устройство нейронных сетей даёт им ряд преимуществ перед классическими методами классификации:

- Гибкая структура
- Позволяют строить нелинейные зависимости
- Параллельные вычисления
- Возможность модификации под конкретную задачу
- Работа с зашумленными данными
- Быстрые алгоритмы обучения
- Справляются с задачами, не имеющими явного решения

Структура и алгоритм обучения нейронной сети

Для классификации использована нейронная сеть на радиально-базисных функциях. Нейронные сети такого типа широко применяются при аппроксимации функций с множеством переменных и в качестве классификаторов [2]. В отличии от многослойных сетей, радиальные сети обладают свойствами, позволяющими производить более простое отображение характеристик. Радиальные функции имеют значения отличные от 0 только в некоторой ограниченной области вокруг центра радиального элемента в виде сферы в многомерном признаковом пространстве. Таким образом радиальные элементы реализуют методы, связанные с локальными отображениями данных. Это является главной особенностью сетей на радиально-базисных функциях и позволяет существенно упростить структуру сети и соответственно ускорить её обучение [4].

Структура сети содержит два слоя нейронов. Выходы первого (скрытого) слоя определяют степень близости входных значений к центрам радиально-базисных функций. Выходы нейронов второго слоя – это линейные комбинации выходов скрытого слоя.

Обучение данной нейронной сети состоит из трех основных этапов:

1. Подбор центров радиально-симметричных функций

- В качестве центров можно использовать отдельные случайные входные вектора из обучающей выборки
- Подбор наилучших центров из множества обучающих примеров, основанный на выборе максимально далеко расположенных друг от друга векторов из обучающей выборки.
- Использование различных алгоритмов кластеризации в том числе другие нейронные сети, например, сеть Кохонена.

2. Подбор радиусов радиальных элементов

Выбор радиусов определяется требуемым видом радиально-симметричной функции. При больших значениях параметра α график функции слишком острый, а это значит, что сеть не сможет корректно интерполировать данные между известными точками на достаточно большом

удалении от них, так как теряет способность к обобщению обучающих данных. Наоборот, при чрезмерно малых значениях параметра α сеть становится невосприимчивой к отдельным деталям.

3. Оптимизация весовых коэффициентов

Рассчитывается характеристическая матрица $\overline{\overline{H}}$ значений радиально-симметричных элементов всех обучающих примеров:

$$\overline{\overline{H}} = \begin{bmatrix} h_{1(x_1)} & h_{2(x_1)} & \dots & h_m(x_1) \\ h_1(x_2) & h_2(x_2) & \dots & h_m(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_1(x_n) & h_2(x_n) & \dots & h_m(x_n) \end{bmatrix}$$

Где n – количество обучающих примеров; m – количество радиальных элементов

Методами линейной алгебры рассчитывается матрица весовых коэффициентов выходного слоя нейронов $\overline{\overline{W}}$:

$$\overline{\overline{W}} = \left(\overline{\overline{H}}^T \cdot \overline{\overline{H}}\right)^{-1} \cdot \overline{\overline{H}}^T \cdot \overline{\overline{Y}}$$

Где $\overline{\overline{Y}}$ - матрица выходов обучающих примеров.

$$\overline{\overline{Y}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{21} & \dots & y_{k1} \\ y_{12} & y_{22} & \dots & y_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1n} & y_{2n} & \dots & y_{kn} \end{bmatrix}$$

n – количество обучающих примеров; k – количество выходов нейронной сети.

Результаты

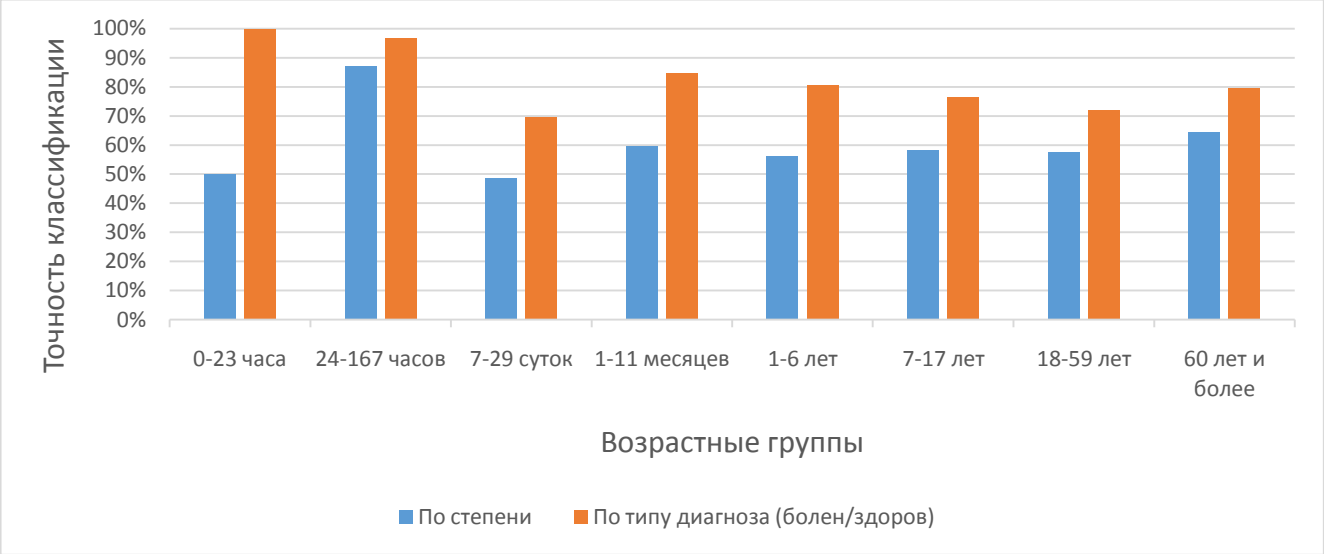


Рис. 1. Точность классификации по возрастным группам.

По результатам тестов программной реализации, точность классификации (рис. 1) различается в зависимости от возрастных групп пациентов, а также от количества обучающих примеров. Общая точность классификации по всем возрастным группам: 62.55% при классификации по степени дисбактериоза (4-х компонентный выходной вектор) и 83.69% при классификации по типу диагноза (2-х компонентный выходной вектор)

Заключение

Исследована возможность обработки многомерных данных на основе принципа коннективизма, в частности классификация медико-биологических объектов с применением нейронных сетей на радиально-базисных функциях.

Выполнена оценка точности классификатора, построенного на основе нейронной сети на радиально-базисных функциях.

Библиографический список

1. L.S. Lomakina, I.V.Solovieva, S.A. Zelentsov Expert system for biocoeno sisdiagnosis basedon Bayesi and ata analysis and fuzzy production rule system (Scopus) // The 5-th BioMedPub 26-27 aug.2017, Bandung, Indonesia, p.p.6657-6664.
2. Хливенко Л.В. Практика нейросетевого моделирования: монография / Л.В. Хливенко. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2015. -214с. ISBN 978-5-7731-0429-2
3. Ломакина Л.С., Соловьева И.В., Зеленцов С.А., Пожидаева А.С. Модели и алгоритмы диагностирования состояний биоценоза на основе априорных статистических данных // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. Казань: НИКГУ. С. 251–256.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 с.

K.M. Noskov

PROCESSING OF MULTIDIMENSIONAL DATA BASED ON THE CONNECTIONISM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Development algorithms for for classifying multidimensional objects based on connectivity. This allows increasing the speed and quality of processing multidimensional data.

Metodology : An algorithm with the use of neural networks for constructing a classifier for multidimensional objects.

Findings/Research implications: The methods described in the work can find practical application in automated systems for processing multidimensional data, in particular in decision support systems for diagnosing biocenosis.

Value: The algorithm for classifying multidimensional objects based on connectivity is considered. Described neural network training algorithm.

Keywords: Classification, connectionism, multidimensional data,neural network, radial basis functions.

УДК 004.9

И.А. Осадчая[1], К.А. Шаропин[2]

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА RISK ДЛЯ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ БЕРЕМЕННЫХ ЖЕНЩИН

[1] ФГАОУ ВО НИ ТПУ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
[2]Московский гуманитарно-экономический университет (МГЭУ)

В работе рассмотрены вопросы модификации информационной системы психологического сопровождения беременных женщин. Информационная система включает в себя базу данных, позволяющей накапливать информацию о беременных женщинах, и блока поддержки принятия решения, предназначенного для выявления групп риска и получения рекомендаций по рекомендуемым видам психологической коррекции.

Ключевые слова: DataMining, решающее правило, исход родов, группы психологического риска, базы данных.

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных проблем клинической психологии беременных женщин является изучение психологической готовности к родам. Известно, что психогенные факторы способствуют нарушению биологической готовности к родам, возникновению травм у новорожденных, а чрезмерное нервно-психическое напряжение приводит к аномалии родовой деятельности. Это приводит к снижению интеллектуального потенциала общества. Несмотря на это исследований по изучению поведенческой реакции беременных женщин и их влияния на исход родов недостаточно. Как показывает реальный опыт и анализ литературы, реализация этой исследовательской работы будет перспективна и актуальна для общества, акушерской практики и отечественной психологии.

Целью данной работы является создание новой версии информационной системы по выявлению групп риска среди беременных женщин на основе разработанных ранее сотрудниками ТПУ и СибГМУ технологий прогнозирования исхода беременности у женщин, отличающихся как физиологическими показателями, так и механизмами психологического подхода к родовой подготовке беременных женщин [1,2].

Постановка задачи

Объектом исследования являются психофизиологические особенности беременных женщин.

В настоящее время принято считать, что мать и ребенок представляют собой единый нейрогуморальный организм. Каждый из них в равной степени страдает от разного рода неблагоприятно влияющих на них факторов внешнего мира, которые записываются в долговременной памяти, оказывая воздействие на рост и развитие ребенка, и его дальнейшую жизнь. Основными тенденциями перинатальной демографии, наблюдаемые в России в течение последних лет, является рост патологии новорожденных: увеличение частоты родовой травмы как следствие аномалии родовой деятельности. В медицине подробно изучены значение нервной системы в регуляции родовой деятельности, а также нейроэндокринные механизмы формирования «гестационной доминанты», как условия физиологического течения беременности и родов. При этом подчеркивается, что стрессовые раздражители, превышающие адаптивные возможности нарушают готовность организма женщины к родам [3, 4].

На сегодняшний день ситуацию беременности в психологии рассматривают как критический период, предполагающий значительные трансформации в жизни женщины, связанные с новой ролевой идентификацией. При этом меняется не только система отношений с окружением, но и структура деятельности в зависимости от того, какое место в иерархии мотивов начинает занимать «ценности ребенка», женщина начинает строить свою жизненную перспективу, переоценивая окружающий мир и оценивая себя [3]. Резкая смена обстановки

приводит к проблемам ориентировки человека в окружающей его социальной действительности, а также невозможности осуществления точного прогноза своего будущего. В связи с этим особо актуальными становятся вопросы, связанные с функционированием, адаптацией и выработкой личностью эффективных стратегий преодоления ситуаций, связанных с неопределенностью.

В психологии процессы преодоления человеком трудных жизненных событий обозначают как совладающее, адаптивное или копинг-поведение (от англ. – преодолевать, справляться).

Копинг – когнитивные и поведенческие попытки управлять специфическими внешними и/или внутренними требованиями, которые оценены как вызывающие напряжение или чрезвычайные для ресурсов человека (согласно FolkmanS.иLazarus R.S.) [4]. Для понимания специфики психических процессов в период беременности целесообразно изучить механизмы, обеспечивающие структуру адекватных действий, связанных с вынашиванием и рождением ребенка.В женской консультации роддома №1 г. Томска было проведено психологическое исследование женщин в возрасте 23±5 лет, средний рост 164±6 см. В группу исследуемых входят первородящие, замужние (70%) женщины.

Для выявления структуры и особенностей осознаваемых стратегий копинг поведения использовалась методика E.Heim. В процессе исследования беременным было предложено на основе стратегий копинг поведения (включенных в опросник), создать модель выхода из сложных жизненных ситуаций, опираясь на свой опыт. То есть, кто предпочел в эмоциональной сфере опросника конструктивную стратегию «оптимизм», были обозначены как «оптимисты», остальных обозначили как «пессимисты». Для перевода качественных показателей в количественные ввели коэффициент дезадаптивности [4].

Представленность психической ригидности изучалась с помощью «Томского опросника ригидности Залевского», позволяющего оценить личностный уровень проявления психической ригидности по шкале сенситивной ригидности и шкале установочной ригидности, а по субшкале актуальности ригидности следует судить о склонности к широкому спектру фиксированных форм поведения. Антиципационную состоятельность изучили при помощи теста, позволяющего определить личностно-ситуативную составляющую прогнозирования жизненных событий, моторно-пространственную ловкость и хроноритмологическую (временную) прогностическую способность. Для оценки смысловой системы регуляции поведения и личностных установок у беременных женщин использовалась методика Д.А.Леонтьева. Для количественного определения уровня стресса применили проективную методику – модифицированный тест Люшера (МЦВ).Отношение женщины к предстоящим материнским обязанностям изучили с помощью «Теста отношений беременной», позволяющего определить благоприятный (оптимальный) и неблагоприятный (эйфорический, гипогестогнозический, тревожный и депрессивный) для развития плода типы психологического компонента гестационной доминанты [5].

Так как целью работы является создание информационной системы, то необходимо в первую очередь произвести отбор признаков, на основании которых эта система будет построена.

На начальном этапе психологами были предложены показатели, которые могут оказывать влияние на исход беременности, и предоставлен соответствующий экспериментальный материал [1, 4, 5]. С помощью методов Data Mining эти данные были проанализированы: получены логические закономерности и решающие правила, оценена информативность (полезность) признаков [1].

Метод решения

Система должна иметь все компоненты информационной системы, такие как:

- технология информации;
- хранение этой информации о каждой женщине;
- методы обработки;

- выдача информации;
- формирование табличных отчетов;
- визуализация данных и результатов.

Наиболее распространенными представлениями знаний в экспертных системах (ЭС) являются:

- фреймовая модель;
- логическая модель;
- продукционная модель;
- модель представления данных в виде семантической сети.

Продукционные модели являются наиболее популярными средствами представления знаний. Продукции, с одной стороны, близки к логическим моделям, что позволяет организовывать на них эффективные процедуры вывода, а с другой стороны, более наглядно отражают знания, чем классические логические модели. В них отсутствуют жесткие ограничения, характерные для логических исчислений, что дает возможность изменять интерпретацию элементов продукции.

В общем виде под продукцией понимается выражение следующего вида:

(i); Q; P; A=>B; N.

Здесь i - имя продукции, с помощью которого данная продукция выделяется из всего множества продукций. В качестве имени может выступать некоторая лексема, отражающая суть данной продукции (например, "покупка книги" или "набор кода замка"), или порядковый номер продукции в их множестве, хранящемся в памяти системы.

Элемент Q характеризует сферу применения продукции. Такие сферы легко выделяются в когнитивных структурах человека.

Основным элементом продукции является ее ядро: A=>B. Интерпретация ядра продукции может быть различной и зависит от того, что стоит слева и справа от знака секвенции =>. Обычное прочтение ядра продукции выглядит так: ЕСЛИ (условие) A, ТО (действие) B, более сложные конструкции ядра допускают в правой части альтернативный выбор, например, ЕСЛИ A, ТО B1, ИНАЧЕ B2. Возможны и другие интерпретации ядра продукции, например A описывает некоторое условие-образец, необходимое для того, чтобы можно было совершить действие B, выполняемое при успешном исходе поиска. Чаще всего вывод в такой базе знаний бывает прямой (осуществляется от данных к поиску цели) или обратный (осуществляется от цели для ее подтверждения – к данным). Данные – исходные факторы, хранящиеся в базе знаний факторов, на основании которых запускается машина вывода или интерпретатор правил, перебирающий правила из продукционной базы знаний.

Элемент P - есть условие применимости ядра продукции. Обычно P представляет собой логическое выражение (как правило, предикат). Когда P принимает значение "истина", ядро продукции активизируется. Если P ложно, то ядро продукции не может быть использовано.

Элемент N описывает постусловия продукции. Они актуализируются только в том случае, если ядро продукции реализовалось. Постусловия продукции описывают действия и процедуры, которые необходимо выполнить после реализации B. Выполнение N может происходить не сразу после реализации ядра продукции.

Простота и наглядность этого способа обусловили его применение во многих системах. Если в памяти системы хранится некоторый набор продукций, то они образуют систему продукций. В системе продукций должны быть заданы специальные процедуры управления продукциями, с помощью которых происходит актуализация продукций и выбор для выполнения той или иной продукции из числа актуализированных.

В состав продукционной системы входят: блок формирования заключений и рекомендаций (база правил), база данных и интерпретатор правил.

Блок формирования заключений и рекомендаций – это область памяти, которая содержит базу знаний (совокупность знаний, представленных в форме правил «ЕСЛИ , ТО»; базу данных (БД).

База данных – это область памяти, содержащая фактические данные о беременных женщинах. Фактически все базы данных могут быть описаны как группа данных, содержащих имена данных, атрибуты и значения атрибутов.

Блок принятия решения – своего рода механизм вывода, и он является тем компонентом системы, который формирует заключения, используя блок формирования заключений и рекомендаций.

Программная реализация

Для решения задачи наполнения базы знаний была использована система WizWhy, реализующая один из методов DataMining – пстроение прдукционных моделей с помощью метода ограниченного перебора М.Бонгарда. Основная особенность DataMining - это сочетание широкого математического инструментария. В технологии DataMining гармонично объединились строго формализованные методы и методы неформального анализа, т.е. количественный и качественный анализ данных. К методам и алгоритмам DataMining относятся следующие: искусственные нейронные сети, деревья решений, символьные правила и др. Большинство аналитических методов, используемые в технологии DataMining - это известные математические алгоритмы и методы. Большинство методов DataMining были разработаны в рамках теории искусственного интеллекта. Выбор системыWizWhy связан с тем, что она поддерживает различные форматы баз данных (ASCII, MS Access, MySQL и др.), поэтому дополнительной подготовки данных не требуется. После загрузки системы остается лишь выбрать нужный формат и загрузить данные.

Для хранения и обработки данных о беременных женщинах была создана база данных на основе СУБД MySQL (в отличии от предыдущих версий системы, использовавших MS Access [6-8].).

Анализ результатов.

Полученные решающие правила, определяющие принадлежность беременных женщин к группам риска в зависимости от исхода родов, показывают достаточно высокую точность работы.

Посредством системы WizWhy было обнаружено более 150 правил. В частности, из анализа значимости признаков сделан вывод о том, что наибольшее информативными являютя следующие показатели: эмоциональная составляющая в преодолении стрессовых ситуаций (e1, e2), наличие мужа (husband), рост женщины (Height), подготовка к родам (Podgotovka). В качестве примера выявленных закономерностей можно также указать следующие – «Если рост женщины составляет около 155 сантиметров, показатель эмоциональной составляющей в преодолении стрессовых ситуаций - 4,10, а когнитивная (мысленная) – 3,37 и она не проходила специальной обучающей подготовки, то, скорее всего, роды будут проходить посредством кесарева сечения».

Основными же показателями, влияющими на положительный исход родов (без кесарева сечения), оказались социальный статус (замужем она или нет) и ее психологические особенности. Например – «Если женщина замужем, показатель эмоциональной составляющей в преодолении стрессовых ситуаций – 2,77, а показатель поведенческой оставляющей равен единице, то, скорее всего роды пройдут без кесарева сечения».

Заключение

В результате выполнения работы была создана новая версия информационной системы RISK, состоящая из базы данных, позволяющей накапливать информацию о беременных женщинах, и блока поддержки принятия решения, предназначенного для выявления групп риска и получения рекомендаций по рекомендуемым видам психологической коррекции.

Основные преимущества новой версии системы:

1. Для автоматизации, обработки и сбора информации используется база данных в СУБД MySQL (в предыдущих версиях – MS Access).

2. Расширена база знаний системы - получены решающие правила для прогнозирования исхода беременности в виде продукционных моделей.

3. Разработан новый более удобный интерфейс пользователя и интерфейс администратора.

Несомненным достоинством информационной системы RISK является возможность не только делать прогноз относительности исхода беременности, а также накапливать необходимую информацию о беременных женщинах для дальнейших научных исследований.

Дальнейшее развитие системы предполагает расширение базы знаний и создание системы поиска.

Библиографический список

1. Берестнева О.Г., Добрянская Р.Г., Марухина О.В., Шаропин К.А., Муратова Е.А. Формирование базы знаний для экспертной системы прогнозирования исхода беременности //Труды международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (AIS-07) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2007) - Дивноморское, 3-10 сентября 2007. - Москва: Физматлит, 2007. - С. 424-429.

2. Шелехов И.Л., Берестнева О.Г., Жаркова О.С. Анализ факторов, определяющих демографическую ситуацию в современной России// Вестник Томского государственного педагогического университета. 2010. № 5. С. 135-141.

3. Вассерман Л.И., Щелкова О.Ю. Медицинская психодиагностика: Теория, практика и обучение. /СПб.: Издательский центр «Академия», 2003. – С.262-264.

4. Добрянская Р.Г. Исследование стратегий преодоления эмоционального стресса у беременных женщин./Сибирский психологический журнал. 2003. №18. С. 65-67.

5. Добрянская Р.Г, Залевский В,Г. Дифференциальная психологическая коррекция фиксированных форм поведения беременных женщин при дородовой подготовке. /Казань: Центр инновационных технологий, 2005. – С.112-119.

6. Муратова Е.А., Берестнева О.Г. Выявление скрытых закономерностей в социально-психологических исследованиях//Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 5. С. 97-102.

7. Берестнева О.Г., Марухина О.В., Добрянская Р.Г., Шаропин К.А. Опыт эксплуатации интеллектуальной системы выявления групп психологического риска среди беременных женщин //Труды Международной конференции по системам искусственного интеллекта (AIS/CAD`08) - Дивноморское, 3-10 сентября 2008. - Москва: Физматлит, 2008. - С. 246-252.

8. Берестнева О.Г., Марухина О.В., Добрянская Р.Г., Шаропин К.А. Алгоритмическое и программное обеспечение системы прогнозирования исхода беременности по результатам психофизиологического обследования. //Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2008. -т. 82 -№ 5 -С. 54-57

I.A. Osadchaya[1], K.A. Sharopin[2]

INFORMATION SYSTEM «RISK» FOR PSYCHOLOGICAL SUPPORT OF PREGNANT WOMEN

[1] Tomsk Polytechnic University
[2] Moscow University of Humanities and Economics

Purpose to this work is: become familiar with the experimental data, data entry and data processing in the DBMS MySQL, create knowledgebase, the implementation of identification of patterns between these indices and outcome of labor. The experimental material contains information about pregnant women throughoutpregnancy, as well as data on birth outcomes. For research we used the followingmethods: the rational choice theory, databases, expert systems, computerpsycho diagnostics. In the end, was designed information system, which consists of a database to store information about pregnant women, and decision supportunit, designed to identify risk groups and advice on recommended types ofpsychological treatment.

Keywords: Data Mining, decision rule, birth outcomes, a group of psychological risk, and databases.

УДК 681.518.3

В.И. Протасов

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ КОЛЛЕКТИВНОГО СОГЛАСОВАНИЯ РЕШЕНИЙ

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Поставлена проблема создания теории систем коллективного интеллекта для эффективного решения трудных задач сертифицированными группами экспертов. Приведено описание метода эволюционного согласования решений, основанного на применении генетических алгоритмов. Введены и обоснованы единицы измерения цены решения задачи и ценности специалистов. Найдены условия, при выполнении которых группа специалистов или искусственных интеллектуальных агентов получает практически безошибочные решения задач произвольной трудности или отказывается от их решения при невозможности решить их правильно.

Ключевые слова: коллективный интеллект, метод эволюционного согласования, генетические алгоритмы, метрология, цена задачи, ценность специалиста, групповая работа.

В настоящее время в промышленности, науке и в сфере управления предприятиями возникают сложные задачи, которые за приемлемое время не находят решения прежними методами. В связи с этим на промышленных предприятиях и в сфере отраслевого управления промышленностью все шире стали применяться технологии коллективной (групповой) работы.

Однако, сетевые коммуникационные технологии коллективной работы, использующие новые возможности сетевого общения в виде краудсорсинга [1] и всевозможных вики-технологий [2], возникали стихийно в виде разработок и развития отдельных эвристических идей и догадок. В развивающейся цифровой экономикене определены такие базовые величины, как цена задачи и ценность специалиста. Отсутствие объективной системы измерений этих величин не позволяет сравнивать и прогнозировать результаты работы различных систем коллективного интеллекта и оценивать изменения, вносимые в процедуры функционирования этих систем для повышения их эффективности. Неизвестным до сих пор является вопрос, можно ли построить систему принятия коллективных решений и найти условия, при выполнении которых вероятность неправильного решения задачи произвольной трудности была бы исчезающе мала?

В настоящее время существует проблема построения теории систем коллективного интеллекта и разработки на ее основе новых методов решения трудных задач, которые могут быть решены имеющимися в наличии специалистами и программными интеллектуальными системами.

В настоящей работе приводится описание метода эволюционного согласования решений (МЭС)[3], представляющего собой сетевую технологию, в которой координаторами групповой работы выступают генетические алгоритмы (ГА). Базовым понятием является понятие **актора**, который в системах коллективного интеллекта выступает в двух ролях – в роли генератора частичных решений либо в роли оценивателя чужих решений, также вводится понятие **группового актора** – группы акторов, работающих над проектом с заданной целью. Акторами могут являться как люди, так и искусственные интеллектуальные агенты.

Проект разбивается на отдельные слоты, подлежащие заполнению. Акторы в соответствии со своими компетенциями заполняют слоты правильными или неправильными ответами, либо, если они не знают ответ, оставляют их не заполненными. Правила по

организации работы акторов и их взаимодействия введены по аналогии с соответствующими операторами генетических алгоритмов.

Вероятность правильного решения задачи с использованием МЭС на стадии генерации решений определяется математической моделью, связанной с теоремой Кондорсе о присяжных [4]. В соответствии с этой теоремой вероятностьK_0правильного решения группой из M акторов при вероятности правильного решенияG_R у одного актора, определяется формулой

$$K_0 = \sum_{i=0}^{\frac{M-1}{2}} C_M^i G_R^{M-1} (1-G_R)^i . \quad (1)$$

Из (1) следует, что $\lim_{M\to\infty} K_0 = \begin{cases} 1, & \text{если } G_R > 0.5 \\ 0.5, & \text{если } G_R = 0.5 \\ 0, & \text{если } G_R < 0.5 . \end{cases}$

Следовательно, если вероятность получения правильного решения отдельным актором $G_R < 0.5$, то групповой актор не сможет решить поставленную задачу с приемлемой вероятностью на стадии генерации решений. Иными словами для группового актора на этой стадии существует «барьер Кондорсе».

Преодоление этого барьера осуществляется группой акторов на стадиях эволюционного согласования решений, когда акторы, не заполнившие какие-либо слоты на первой стадии, заполняют их, используя чужие решения. Можно доказать, что если выполняется некоторое соотношение между вероятностями заполнения слотов проекта на стадии генерации решений G_R и G_N, и вероятности оценивания слотов E_R и E_N (индекс R относится к правильному заполнению или оценке, а N к ошибочному), то даже для малых G_Rбарьер Кондорсе может быть преодолен. То есть при увеличении числа акторов и числа итераций согласования вероятность правильного решения большинством голосов акторов стремится к единице.

Легко показать, что это соотношение выглядит следующим образом:

$$G_R + \frac{E_R(1-G_R-G_N)}{E_R+E_N} > 0.5. \quad (2)$$

Если итерация согласования одна, то это соотношение преобразуется к виду:

$$E_R \frac{1-(G_R+G_N)}{G_R+G_N} > \frac{1-2G_R}{2G_R} \quad (3)$$

Сокращение числа итераций до одной позволяет строить различные системы коллективного согласования решений в глобальных и локальных сетях.

Рассмотрим вопросы метрологического обеспечения процедуры коллективного согласования решений [5]. Для этого введем и обоснуем единицы измерения базовых величин систем коллективного интеллекта. Введем понятие идеального актора. Считается, что идеальный актор никогда не ошибается и у него может быть только два ответа на предложенный тестовый вопрос – либо правильный, либо ответ «не знаю». Примем, что проектом, подлежащим решению, считается совокупность тестовых вопросов различной трудности (слотов) с заранее известными единственными правильными ответами.

Для наших целей подходящей является однопараметрическая модель Раша[6], как наиболее простая модель, связывающая вероятность получения правильного ответа G_R испытуемого с уровнем его подготовленности (компетентности) t и трудностью задания b и

обеспечивающая независимость измерений испытуемого от трудности задания. Предполагается, что$0 \le b < \infty$ и $0 \le t < \infty$.

Вероятность G_R правильного заполнения слота трудности t определяется по формуле Раша:

$$G_R = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta}} \quad , \tag{4}$$

где $\beta = ln\, b$ и $\theta = ln\, t$.

Далее для удобства изложения подготовленностью актора называется величина θ, а трудностью задачи – β, измеряемые в специальных единицах – логитах.

Сформулируем ряд лемм и теорем, которые приведут нас к построению системы измерения трудностей задания и подготовленностей акторов и связанных с ними цены решения задачи и интеллектуальной силы (ценности)акторов.

Введем следующие обозначения:

$x = \beta - \theta$; G_R – вероятность правильного решения задачи одним актором; q – вероятность правильного решения задачи группой из М акторов;

Выполняется предположение: если хотя бы один из акторов группы правильно решил задачу, считается, что и групповой актор решил ее и вероятность q, следовательно, можно определить по формуле:

$$q = 1 - (1 - G_R)^M \quad . \tag{5}$$

M_0– число акторов, решающих задачу с вероятностью q при *x=0;*

Затраты труда, направленные на решение задачи с заданной вероятностью q, измеряются в единицах интеллектуального труда (ИНТ),

1 ИНТ – затраты интеллектуального труда одного актора, у которого подготовленность *t=1 (θ=0)* при решении задачи трудностью *b=1 (β=0);*

Z(θ) – стоимость труда актора с подготовленностью θ, измеряется в ИНТ, следовательно, по определению *Z(0)*=1 ИНТ;

S(β) – цена задачи трудности β, измеряется в ИНТ. Очевидно, если стоимость труда одного актора составляет 1 ИНТ, то стоимость труда M_0 акторов, правильно решающих задачу трудности β=0 с вероятностью q, или цена задачи составит $S(0) = M_0$;

F(x) – отношение фактических затрат на решение задачи трудности β, определяемых из суммарных затрат интеллектуального труда M акторов с подготовленностью θ, к цене задачи *S(β)*.

Лемма 1 .

Утверждается,чтоприβ = θ для правильного решения задачи с вероятностью q число акторов должно быть не меньше, чем

$M_0 = -\frac{ln(1-q)}{ln\, 2}$.

Доказательство. Подставив G_R из (4) в (5), после преобразований получим выражение для *M*: $M = -\frac{ln(1-q)}{ln(1+e^{-x})}$ (6)

При ***x=0*** получаем выражение для M_0, что и доказывает лемму.

Из этих выражений получаем М – число акторов:

$$M = M_0 \frac{ln\, 2}{ln(1+e^{-x})} . \tag{7}$$

Лемма 2.

Допустим $x \to 0$.

Утверждается, что функцию $M = M_0 \frac{ln2}{ln(1+e^{-x})}$ можно заменить показательной функцией вида

$$M = M_0 C^x, \tag{8}$$

с основанием $C = e^{\frac{1}{2ln2}} = 2.05720346\ldots$.

Доказательство.

Возьмем предел от функции $(\frac{ln2}{\ln 1+e^{-x}})^{\frac{1}{x}}$, при $x \to 0$, получаем: $lim_{x\to 0}(\frac{ln2}{\ln(1+e^{-x})})^{\frac{1}{x}} = e^{\frac{1}{2ln2}}$.

Поскольку этот предел равен константе, то в окрестностях абсциссы $x \to 0$ (7) ведет себя, как показательная функция, и ее можно заменить выражением (8), что и требовалось доказать.

Теорема 1.

Допустим, что выполняются допущения, приведенные выше.

Утверждается, что цена правильного решения задачи трудности β с заданной вероятностью q определяется из выражения:

$$S(\beta) = M_0 C^{\beta} \qquad \text{(ИНТ)} \tag{9}$$

а стоимость интеллектуального труда актора с подготовленностью θ(ценность актора) равна

$$Z(\theta) = C^{\theta} \qquad \text{(ИНТ)} \tag{10}$$

Доказательство не является сложным и здесь не приведено. Оно основано на леммах и использует принцип равной оплаты за равный труд.

Следующим важным теоретическим результатом является доказательство положения о том, что при выполнении определенных условий, вероятность неправильного решения задачи произвольной трудности групповым актором может быть как угодно малой.

Теорема 2.

Допустим, что групповой актор состоит из M одиночных акторов с подготовленностями θ_{GR}, θ_{GS}, θ_{ER} и θ_{ES}, численные значения которых лежат в интервале $[\theta - \delta, \theta + \delta]$, $\theta \in \boldsymbol{R}$ и $\delta \in \boldsymbol{R}$.

Утверждается, что при $M \to \infty$ и $\delta < \ln 2$ вероятность неправильного решения задачи произвольной трудности β групповым актором стремится к нулю.

Доказательство. Из всего множества значений подготовленностей θ_{GR}, θ_{GS}, θ_{ER} и θ_{ES} выберем такие, для которых вероятность получения неправильного решения групповым актором будет максимальной, то есть

$$\theta_{GR} = \theta - \delta, \theta_{GS} = \theta + \delta, \theta_{ER} = \theta - \delta, \theta_{ES} = \theta + \delta.$$

Согласно модели Раша для соответствующих вероятностей можно записать выражения

$$G_R = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta+\delta}}, G_S = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta-\delta}}, G_V = 1 - G_S = \frac{1}{1+e^{-\beta+\theta+\delta}},$$

$$G_N = G_S - G_R = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta-\delta}} - \frac{1}{1+e^{\beta-\theta+\delta}}. \tag{11}$$

Такие же выражения с учетом (1) можно записать соответственно для E_R, E_S и E_N, то есть

$$E_R = G_R, E_S = G_S \text{ и } E_N = G_N \quad (12)$$

Легко показать, что в конце итерационного цикла согласований при$M \to \infty$ вероятность принятия неправильного решения одного актора в составе группы будет

$$P_N = G_N + \frac{E_N}{E_S} G_V \quad . \quad (13)$$

Подставляя (11) и (12) в (13), после преобразований получим зависимость $P_N(\beta)$:

$$P_N = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta-\delta}} + \frac{1+e^{\beta-\theta-\delta}}{2+e^{-\beta+\theta+\delta}+e^{\beta-\theta-\delta}}. \quad (14)$$

Дифференцируя (14) по β и приравнивая полученное выражение к нулю, получим, что при единственном значении $\beta = \theta$ для любых δ функция (14) имеет экстремум. Поскольку при этом вторая производная от нее в этой точке отрицательна, то делаем заключение, что (14) имеет максимум в этой точке.

Очевидно, что если вероятность принятия неправильного решения одиночного актора в точке максимума меньше 0.5, то и для всего интервала изменения βот$-\infty$ до$+\infty$ эта вероятность также меньше 0.5. Следовательно, на всем интервале изменения β при $M \to \infty$ согласно теореме Кондорсе вероятность принятия неправильного решения групповым актором Q_N стремится к нулю. Максимально допустимое значение $\delta = ln2$ определяется из решения (14) при $P_N = 0.5$, что и требовалось доказать.

В [7] приводится описание системы коллективного согласования решений для группового актора, состоящего из нейронных сетей, распознающих различные объекты с ошибкой первого рода менее 0.01. Нейронные сети были применены в качестве экспертов-оценивателей чужих решений. До сих пор сети являлись лишь генераторами как правильных, так и в сложных случаях неправильных решений. Таким образом, удалось включить этих акторов в структуру МЭС и добиться поставленных целей.

Выводы

Системы коллективного интеллекта, использующие метод эволюционного согласования решений, позволяют решать сложные задачи, которые не под силу одиночным акторам.

Предложена система единиц и решена проблема измерения цены задачи и ценности специалистов при решении массовых рутинных творческих задач.

Найдены условия, при соблюдении которых группа специально подобранных акторов может гарантированнорешить задачу известной трудности.

Найдены условия, при соблюдении которых группа акторов либо решает задачу большинством голосов правильно, либо дает ответ «не знаю» при малой вероятности неправильного решения.Нерешенная задача может быть передана группе акторов с более высокой степенью подготовленности.

Можно надеяться, что применение метода эволюционного согласования для нейронных сетей глубокого обучения позволит существенно снизить ошибки, как в медицинской диагностике по изображениям, так и в других областях, где цена ошибки велика.

Библиографический список

1. JeffHowe. The Rise of Crowdsourcing. Wired. 2006, p.1—4.
2. Chawner B. WikiWikiWebs: new ways to communicate in a Web environment Inf. Technol. and Libr. – 2006. – Vol. 25, № 1. – P. 33–43.
3. Протасов В.И. Метод эволюционного согласования решений. Компьютерная и математическая модели. Горный информационно-аналитический бюллетень. – М., изд. «Горная книга», 2011, т. 1. №12. с. 360-379.
4. Condorcet, marquis Marie-Jean-Antoine-Nicolas de Caritat. Essaisurl'applicationdel'analyse à la probabilité des décisionsrendues à la pluralité des voix. Imprimerie Royale, Paris, 1785.
5. Протасов В.И. Как определить меру трудности заданий и уровень подготовленности экспертов при использовании метода эволюционного согласования решений. Педагогическая диагностика .—М:, 2015, №4, с. 40-50.
6. Rasch G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests /Expanded Edition, with Foreword and Afterword by B.D. Wright. Chicago: University of Chicago Press, 1980.
7. Протасов В.И., Шаронов А.В., Шарнин М.М., Клименко А.С. Минимизация вероятности ошибок в распознавании объектов бортовыми компьютерными системами беспилотных летательных аппаратов// Труды МАИ, 2017, № 92. http://mai.ru//upload/iblock/277/protasov_sharonov_sharnin_klimenko_rus.pdf

V. Protasdov

ACTUAL QUESTIONS OF THE THEORY OF SYSTEMS OF COLLECTIVE HARMONIZATION OF DECISIONS

Moscow Aviation Institute (National Research University)

The problem of creating a theory of collective intelligence systems for effectively solving difficult problems by certified expert groups is posed. The description of the method of evolutionary coordination of solutions based on the application of genetic algorithms is given. The units for measuring the price of solving the problem and the value of specialists have been introduced and justified. Conditions are found under which a group of specialists or artificial intellectual agents receives practically error-free solutions to problems of arbitrary difficulty or refuses to solve them if it is impossible to solve them correctly.

Key words: collective intelligence, evolutional matching method, genetic algorithms, metrology, task cost, specialist value, group work.

УДК 004.9

С.В. Романчуков, С.В. Аксёнов, Е.В. Берестнева

АГРЕГАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Данная работа посвящена проблемам агрегирования социологических данных из разных источников, порождённые низкой степенью информатизации в сфере наук об обществе. Описаны особенности структуры информационных систем, используемых для обмена данными в рамках социологических исследований федерального уровня. Предложены варианты получения требуемых данных для дальнейшей машинной обработки и указан наиболее привлекательный из них.

Ключевые слова: социальные исследования, информационная система, обмен данными, агрегирование, парсинг

Введение

В текущем состоянии российской экономики и социальной сферы крайне важны исследования, позволяющие оценить динамику развития регионов, построить описательные и прогностические модели для повышения точности прогнозирования происходящих социально-экономических процессов и, следовательно, эффективности принимаемых управленческих решений.

Значимость изысканий в данной сфере подтверждается в том числе и количеством осуществляемых на территории РФ проектов по региональной компаративистике, однако, применение для анализа полученных данных наиболее эффективных информационных и сетевых технологий в рамках любого отдельного из проектов такого рода оказывается ограничено, а зачастую и невозможно, в силу целого ряда внутренних проблем.

С одной стороны каждый отдельный проект зачастую не имеет достаточных ресурсов для построения информационно-аналитических систем, с другой же - наиболее точным описанием реальности была бы модель, использующая результаты исследований различных проектных групп одновременно. Таким образом, логично предположить, что лучших результатов позволит добиться информационная система, разрабатываемая в рамках отдельного проекта и использующая результаты полевых исследований социологов и экономическую статистику как входные данных для своей работы.

Однако, эффективность работы такой системы будет зависеть не только от выбранных алгоритмов и программных средств, но и в значительной степени от качества и полноты исходных данных. В то же время задача агрегирования большого объёма статистической информации, накопленного различными исследовательскими группами представляет собой существенную проблему.

Проблема агрегирования исходных данных

При работе с большим количеством источников данных одновременно отечественным научным коллективам приходится решать целый ряд проблем [1-3]:

- Проблема недостаточной информатизации социальных исследований;
- Проблема сопоставимости данных, полученных из различных источников;
- Проблема получения доступа к данным и доступности данных

В итоге, команда, поставившая перед собой цель создать математическую модель или информационную систему, полагающуюся на данные нескольких разных исследовательских коллективов (например, параметры социальной структуры региона от участников федеральной

программы "Социокультурный портрет региона", экономические исследования местных коллективов, показатели инновационного развития от ряда исследовательских коллективов по данной тематике и обобщённые материалы Росстата, представленные на четырёх его различных платформах - порядочное количество источников одновременно) будет вынуждено искать способ, чтобы загружать, обновлять и согласовывать между собой множество разнородных наборов данных, представленных в абсолютно различных информационных системах.

Что характерно, с подобными ограничениями встречаются бизнес-структуры, активно ведущие деятельность в сети Интернет. На настоящий момент в Интернете существует порядка сотни крупных и значимых рекламных платформ, а также множество мелких. Каждая из эти платформ при проведении рекламной кампании предоставляет пользователю набор статистических показателей (т.н. *метрик*), позволяющих оценить успешность проводимой кампании и принять те или иные управленческие решения, зачастую с использованием экспертных систем и прогностических алгоритмов. В частном секторе это привело к возникновению специализированных фирм, т.н. агрегаторов, деятельность которых заключается в сборе информации из различных источников, её стандартизации и предоставлении конечному пользователю в форме единого отчёта [4].

Однако, несмотря на близость аналогии, такие фирмы-агрегаторы находятся в значительно более выгодном положении, нежели исследовательские коллективы, пытающиеся обобщить и свести в одной модели результаты работы нескольких проектов. Этому есть несколько причин:

1. Частные проекты имеют чёткий и однозначный набор правил, требований и протоколов для обмена сырыми данными, тогда как исследовательские коллективы зачастую не уделяют этой части своей работы особого внимания.
2. Частные информационные ресурсы предоставляют возможность запросить от них данные не только через пользовательский интерфейс, но и посредством программных обращений, в то время как информационные системы научных коллективов зачастую рассчитаны только на взаимодействие с пользователем-человеком через графический интерфейс.
3. Информационные ресурсы, разработанные для нужд того или иного исследовательского проекта зачастую создаются при полном игнорировании существования окружающей сетевой инфраструктуры.
4. Информационные ресурсы научных и государственных организаций зачастую выполнены на устаревшей материально-технической базе и не используют современные достижения в IT сфере.

Всё это приводит к тому, что опыт представителей IT-бизнеса в данной сфере весьма интересен, но не существует такого готового программного продукта, который решал бы задачи агрегации данных, собранных в ходе социальных исследований. Отдельные программные продукты предлагают автоматизацию загрузки данных из таких крупных и известных источников, как сайты и базы данных Росстата [5],

Структура типовой ИС исследовательского проекта в социальной сфере

Разработка информационных систем, обеспечивающих обмен данными между исследовательскими коллективами, таких, например, как Информационная система "Модернизация" ЦИСИ ИФРАН [6], является даже для крупных коллективов одной из побочных задач и не ведёт к качественному улучшению ситуации (рис. 1)

Типовой интерфейс подобной системы состоит из одной или нескольких простых веб-страниц, вход на которые осуществляется по логину и паролю (при этом нередко все пользователи заходят под одной учётной записью, а логин и пароль не хранятся в базе данных, а прописаны прямо в тексте php-скрипта), минимальное количество управляющих элементов для настройки выдаваемой информации (как правило это кнопки и выпадающие списки, выполненные с помощью простейших тегов HTML и прямые гиперссылки).

Рис. 1. Интерфейс информационной системы "Модернизация" ЦИСИ ИФРАН

Выдача результатов осуществляется либо посредством вывода на экран простой таблицы, содержащей значения, полученные напрямую из базы данных, либо посредством скачивания на машину пользователя .xls-файла с теми же значениями. Некоторые из систем генерируют этот файл по запросу пользователя, другие же (наиболее примитивные) имеют набор заранее заготовленных администратором файлов (в таком случае база данных может отсутствовать вовсе).

Графические методы представления информации задействуются редко и представляют, как правило, простейшие диаграммы и графики. Представляемые визуальные материалы зачастую статичны. Более сложная инфографика практически не используется. Всё это, свидетельствует о том, что возможности автоматизированного получения информации с подобных сайтов крайне ограничены (они просто для этого не предназначены). Впрочем, странно ожидать наличия REST API от информационного ресурса, во многом построенного по принципам Web 1.0.

Возможные методы решения

Представляются три возможных решения данной проблемы.

Вариант 1. Разработка единого стандарта для обмена данными в сфере социальных исследований и подготовка типового программного инструментария. Набор программных средств, библиотек и инструкций, доступный для любого исследовательского коллектива и достаточный для быстрого размещения на сервере информационной системы с типовым API для обмена данными с аналогичными системами позволил бы сократить расходы и без того ограниченных ресурсов исследовательских групп на разработку своих решений для хранения и передачи данных, а также стандартизировал бы их структуру.

Однако, данный вариант малореален, как в следствии сохраняющегося отставания России в технологической сфере, так и из-за малого (несмотря на публичные декларации) интереса к развитию IT-технологий. Достаточно отметить, что большинство ГОСТ и РД [6-8], посвящённых разработке и документированию программного обеспечения, используемых в ряде бюджетных организаций (в т.ч. научных) и по сей день, были созданы в период с 1977 по 1995 год и не учитывают произошедшие изменения в IT-сфере. Кроме того, учитывая низкую степень информатизации социальных исследований в РФ, можно предположить, что сами социологи потребности в такого рода продуктах не испытывают.

Вариант 2. Обмен данными, в том виде, в котором он есть сейчас. Назначить специалиста, который будет вручную взаимодействовать с пользовательскими интерфейсами информационных систем, выгружая данные из них, форматируя полученные таблицы и подготавливая их к экспорту в программную среду, где они будут впоследствии обрабатываться и анализироваться - примитивное, но вполне допустимое решение.

Вариант 3. Простая и устаревшая структура большинства сайтов делает их особо уязвимыми для алгоритмов парсинга и автоматизированного извлечения данных. При составлении подобных сайтов подобная возможность даже не учитывается, поэтому ожидать противодействия данным алгоритмам не приходится. Кроме того, их применение не нарушает каких бы то ни было законов в случае, если владельцы данных разрешили к ним доступ (а в противном случае использование таких данных всё равно не соответствовало бы этике научного сообщества).

В общем смысле, парсинг – это сопоставление последовательности слов с правилами языка. Парсинг сайтов – последовательный синтаксический анализ информации, размещённой на интернет-страницах [9].

По сравнению с человеком, компьютерная программа-парсер:

1. работает быстрее;
2. допускает меньше ошибок;
3. эффективно преобразует данные в необходимые структуры.

Эта возможность представляется более реалистичной, чем первый вариант, и, вместе с тем, более технологичной, чем второй. К одной из сложностей ,связанных с парсингом, часто относят необходимость построения такого парсера, который реагировал бы на изменения в структуре сайта-цели, т.к. в противном случае при любом изменении целевого ресурса парсер было бы необходимо редактировать. Однако, в случае рассматриваемых интернет-ресурсов, их структура и функциональность не изменяются годами, как во время активности проекта, так и много лет после его завершения.

Таким образом, оптимальным способом загрузки исходных данных в информационную систему или модель, использующую одновременно множество источников, может служить модуль-парсер, настроенный на выгрузку интересующей информации с веб-страниц исследовательских групп, давших своё согласие на сотрудничество и обмен информацией.

Выводы

Таким образом, несмотря на низкую степень информатизации отечественных социологических исследований, собранные научными коллективами сырые данные могу быть применены и в смежных, междисциплинарных исследованиях, однако их получение и подготовка к обработке потребует дополнительных усилий. В состав информационной системы, предназначенной для моделирования социально-экономических процессов необходимо включить модуль для парсинга ресурсов социологических коллективов с целью автоматизации извлечения хранящихся там данных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00344 «Анализ и моделирование взаимосвязей параметров социального и экономического развития региона».

Библиографический список

1. Романчуков С. В. Проблема качества исходных данных в математическом моделировании социально-экономических процессов в РФ //Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов IV Международной научной конференции, 5-8 декабря 2017 г., Томск: в 2 ч. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — Ч. 1. — С. 369-371.

2. Berestneva E., Romanchukov S. Issues of Application Design for Social Studies// "The European Proceeding of Social and Behavioural Sciences" (EpSBS), Vol. VII, 2016, P. 88-94.

3. Осадчая И. А., Берестнева О.Г. Методы исследования структуры многомерных экспериментальных данных // Современные проблемы науки и образования. - 2013 - №. 1.

4. Веб-страница агрегатора маркетинговых данных improvado [Электронный ресурс] URL: http://improvado.io/
5. API-сервис обращения к порталу «Мультистат» [Электронный ресурс] URL: http://www.crosys.ru/special.html
6. Информационная система "Модернизация" ЦИСИ ИФРАН [Электронный ресурс] URL: http://mod.vscc.ac.ru/
7. Богомазов К.И. Развитие инструментария социокультурного портрета для разработки стратегии модернизации на уровне региона. Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Социокультурная эволюция Россиии ее регионов». – Вологда: ИСЭРТ РАН, 2013.
8. StandartGOST.ru - бесплатные ГОСТы и магазин документов [Электронный ресурс] URL: https://standartgost.ru/0/757-programmnoe_obespechenie
9. Парсинг html-сайтов с помощью PHP, Ruby, Python [Электронный ресурс] URL: http://parsing.valemak.com

S.V. Romanchukov, S.V. Aksyonov, E.V. Berestneva

STATISTICAL DATA AGGREGATION IN INFORMATION SYSTEMS DESIGN FOR STUDYING SOCIAL AND ECONOMIC PROCESSES

National Research Tomsk Polytechnic University

This paper is devoted to the problems of sociological data aggregation from different sources, caused by a low informatization degree in the field of social sciences. It describes features of the information systems structure used for data exchange within the framework of sociological studies at the federal level and suggests options for obtaining the required data for further machining indicating the most attractive one.

Keywords: social studies, information system, data exchange, aggregation, parsing

УДК 81.374

А.В. Синелева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АССОЦИАТИВНО-СЕМАНТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО ДАННЫМ СВОБОДНОГО И ЦЕПОЧЕЧНОГО АССОЦИАТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматриваются и сравниваются возможности использования результатов свободного и цепочечного ассоциативного эксперимента как наиболее разработанной техники психолингвистического анализа семантики. Целью эксперимента является исследование в сознании носителей языка структуры и наполнения семантических полей лексических единиц, выступающих в роли слов-стимулов, а также возможностей выделения семантического ядра и периферии. Сравнительный анализ результатов экспериментов показал, что нельзя сделать однозначный выбор в пользу свободного или цепочечного: выбор вида эксперимента зависит от цели исследования, условий проведения эксперимента, а также от объекта исследования – лексического значения и валентности слова-стимула.

Ключевые слова: ассоциативный словарь, ассоциативное поле, ассоциация, свободный ассоциативный эксперимент, семантическое поле, цепочечный ассоциативный эксперимент.

Описание языковой картины мира является одним из самых актуальных направлений современной лингвистической науки. Это связано с задачами межкультурной коммуникации, со стремлением постичь национальную ментальность, с необходимостью изучения взаимодействия языковых и культурных категорий и в этой связи вскрытием механизма накопления культурной информации в слове. Целью исследования, отдельные результаты которого представлены в статье, является сравнительный анализ возможностей свободного и цепочечного ассоциативного эксперимента в аспекте выделения ядра и периферии семантических полей и их наполнения в сознании усредненного носителя русского языка.

Ассоциативный эксперимент является наиболее разработанной техникой психолингвистического анализа семантики: результаты ассоциативного эксперимента представляют собой модель вербальной памяти человека, отражают фрагмент образа мира, закрепленного в сознании «усредненного» носителя языка того или иного этноса, его культурных стереотипов. Ассоциативные поля обозначают «культурно заданные границы понятия, в пределах которого оперирует индивидуальное сознание говорящего... если ассоциативное поле есть отображение языкового сознания носителя языка, то оно может, следовательно, указывать на форму и способы хранения образов языкового сознания» [1, с. 262].

Данные ассоциативного эксперимента благодаря своей статистической «благонадежности» легко поддаются математической обработке, являются уникальным материалом для выдвижения и проверки статистических гипотез, а также дают в очень удобной форме специфический для данного языка и культуры «ассоциативный профиль» лексических единиц и помогают «выявить» ассоциативное значение слова [2, с. 10].

Ассоциации – это связь между объектами и явлениями, основанная на личном, субъективном опыте человека. Этот опыт может совпадать с опытом той культуры, к которой мы принадлежим, но в какой-то степени этот опыт индивидуален. Ассоциации – термин, введенный английским философом Дж.Гоббсом, обозначающий связь между элементами мыслительного процесса (ощущениями, восприятиями, представлениями, идеями), заключающуюся в том, что появление при определенных условиях одного элемента влечет за собой появление другого или нескольких [3, с. 55]. Актуализация той или иной связи в не случайна: человек извлекает из сознания модели, наиболее устойчивые и частотные конструкции, соединенные различного рода отношениями, имеющими место в действительности (причинно-следственные связи, существенные признаки предметов, отношения противопоставления, сопоставления, отношения гиперонимии, гипонимии и др.) и отраженными в языке в виде различного вида парадигматических и синтагматических отношений.. Но, с другой стороны, она может зависеть от ситуации: недавних зрительных образов,

психического и физического состояния человека. Каждое слово всегда связано с одним с несколькими другими ассоциативными связями, отражающими отношения между словами в языке и речи.

Результаты ассоциативных экспериментов фиксируются в словарях, которые дают картину сочетаемости слов в живой речи носителей русского языка, наиболее частотные словосочетания, грамматические конструкции. Ассоциативные словари содержат новые сведения об образе мыслей, социальных, эстетических, этических ценностях современных людей, а также отражает связь традиций с современностью. Можно сказать, что ассоциативный словарь – это модель вербальной памяти и языкового сознания усредненного носителя русского языка.

Теоретической основой ассоциативного словаря служит обоснованное в психологии представление о том, что явления реальной действительности, воспринимаемые человеком в процессе деятельности и общения, отображаются в его сознании таким образом, что это отображение фиксирует причинные, временные, пространственные связи явлений и эмоций, вызванных восприятием этих явлений. Ассоциативный словарь – такая модель сознания, которая представляет собой набор правил оперирования знаниями о русской культуре, в результате чего у пользователя словаря формируется представление о фрагменте образа мира [4].

Существует несколько разновидностей ассоциативного эксперимента:

- свободный ассоциативный эксперимент, в котором респондентам предлагается отвечать первой активизирующейся в сознании реакцией при предъявлении слова-стимула, ничем не ограничивая ни грамматические, ни семантические особенности слова-реакции; этот вид эксперимента используется при создании ассоциативных словарей, в частности, самого авторитетного словаря под редакцией Ю.Н. Караулова;
- направленный ассоциативный эксперимент, в котором ограничивается выбор предполагаемой реакции, даются дополнительные критерии ответов или слов-стимулов (например, отвечать только прилагательными или сужение понятия слова-стимула (вода – холодная вода));
- цепочечный ассоциативный эксперимент, в котором респондентам предлагается реагировать на слово-стимул несколькими ассоциациями (как правило, 3-5 слов-реакций).

Словарная статья в ассоциативном словаре чаще всего имеет следующую структуру: заголовочное слово-стимул, выделенное шрифтом, за ним слова-ассоциаты (слова-реакции) на этот стимул, расположенные по мере убывания их частоты, которая указывается в скобках после слова-реакции, если оно одно имеет такую частоту встречаемости в ответах или указывается в конце группы слов-реакций с одинаковой частотой, при этом внутри группы реакции-ответы расположены и алфавитном порядке. В конце словарной статьи приводятся количественные показатели: первая цифра указывает на общее число реакций на слово-стимул, вторая - на число разных реакций, третья - на число отказов испытуемых и четвертая - на число единичных реакций, т.е. на число ответов с частотой 1.

Мерой семантической близости слов-стимулов и слов-реакций считается степень совпадения распределения ответов, т.е. сходство данных на них ассоциаций. Определение семантического расстояния между словами может помочь определить синонимы. Ассоциативное поле у каждого человека свое и по составу наименований, и по связи между ними. Связь между словами мотивируется не только особенностями культуры, но и социальным статусом, профессией, возрастом, полом, местом жительства, поэтому в эксперименте, как правило, участвуют респонденты различных гендерных и возрастных групп и профессий. Практика показывает, что методика свободной ассоциации хорошо выявляет стандартные ассоциативные связи. Методика цепочечного эксперимента дает намного большее количество слов-реакций при равном со свободным экспериментом количестве респондентов, а также показывает актуализацию ассоциативных связей, зафиксированных в ядре и периферии сознания не только усредненного носителя языка, но и отдельного человека.

В рамках задач нашего исследования проведем анализ возможностей использования результатов свободного и цепочечного ассоциативного эксперимента и их интерпретации для выделения ассоциативно-семантического ядра и периферийных зон в сознании носителей русского языка.

Представляем результаты свободного эксперимента, в котором участвовали 152 испытуемых, и цепочечного эксперимента, в котором приняло участие 146 респондентов, представляющих примерно равные гендерные (46% мужчин и 54% женщин) и возрастные группы (18-35 лет, 36-60 лет и более 60 лет) и разные профессиональные. В качестве слова-стимула было взята социально и культурно значимая, имеющая концептуальное значение лексема *президент*. Примеры ответов респондентов представлены в табл.1 и табл.2.

Таблица 1

Примеры ответов респондентов (свободный ассоциативный эксперимент)

Слово-стимул	Респондент	Слово-реакция
президент	респондент 1	власть
президент	респондент 2	политика
президент	респондент 3	ум
президент	респондент 4	глава
президент	респондент 5	Путин
президент	респондент 6	Путин

Таблица 2

Примеры ответов респондентов (цепочный ассоциативный эксперимент)

Слово-стимул	Слово-реакция 1	Слово-реакция 3	Слово-реакция 3	Слово-реакция 4	Слово-реакция 5
президент (респондент 1)	государство	власть	Путин	главный	демократия
президент (респондент 2)	Путин	Америка	глава	лидер	приказ
президент (респондент 3)	власть	права	Обама	монарх	умный
президент (респондент 4)	сила	власть	Путин	выборы	Кремль
президент (респондент 5)	Путин	страна	лидер	деньги	костюм

При обработке результатов свободного эксперимента подсчитывается абсолютная частота слов-реакций. Подсчет частоты слов-реакций цепочечного эксперимента проводился с учетом коэффициента ранжирования (табл.3) по приведенным ниже формулам.

A – 1(3) + 3(1)

P(A) = 5x3 + 3x1 = 18, где P(A) – частота слов-реакций A; 3- количество слов-реакций A на первом месте в ответах респондентов, 5 – коэффициент, соответствующий первому месту; 1- количество слов-реакций A на третьем месте в ответах респондентов, 3 – коэффициент, соответствующий третьему месту;

B – 2 (2)

P(B) = 4x2 = 8, где P(B) – частота слов-реакций B; 2- количество слов-реакций B на втором месте в ответах респондентов, 4– коэффициент, соответствующий второму месту;

C – 1(1) + 3(1)

P(C) = 5x1 + 3x1 = 8, где P(C) – частота слов-реакций C; 1- количество слов- реакций C на первом месте в ответах респондентов, 5 – коэффициент соответствующий первому месту; 1- количество слов- реакций C на третьем месте в ответах респондентов, 3 – коэффициент, соответствующий третьему месту;

Таблица 3

Формализованные результаты цепочного ассоциативного эксперимента

Респонденты	Слово-реакция 1 - коэф. 5	Слово-реакция 3 - коэф. 4	Слово-реакция 3 - коэф. 3	Слово-реакция 4 - коэф. 2	Слово-реакция 5 - коэф. 1
Слово-стимул (респондент 1)	A	B	C	D	E
Слово-стимул (респондент 2)	C	F	A	G	D
Слово-стимул (респондент 3)	A	B	H	I	D
Слово-стимул (респондент 4)	A	F	J	K	D

D – 4 (1) + 5 (3)

P(D) = 2x1 + 1x3 = 5, где P(D) – частота слов-реакций D; 1- количество слов-стимулов D на четвертом месте в ответах респондентов, 2 – коэффициент, соответствующий четвертому месту; 3 - количество слов-стимулов D на пятом месте в ответах респондентов, 1 – коэффициент, соответствующий пятому месту, и т.д.

Результаты свободного эксперимента выглядят следующим образом:

президент *– Путин (25), власть (15), Обама (11), государство, премьер-министр (9), Америка, права (6), глава (5), авторитет, выборы, деньги, лидер (4), политика, председатель, Россия, 0 (3), властный, главный, мужчина, ответственность, правитель, ум, шеф (2), стабильность, политик, полномочия, Госдума, ложь, ЦК КПСС, воля, пост, безысходность, встреча, выдающийся, глава государства, главный человек, демократия, депутат, должность, закон, Клинтон, костюм, корона, надежный, первый, правительство, предводитель, председатель, руководитель, серьезный, сильный, умный, усталость, Франция, Хиллари, холодная голова, чиновники* (152, 57, 3, 35).

Результаты цепочечного эксперимента:

президент *– власть (184), Путин (178), сила (71), ответственность (69), государство (65), глава (61), страна (51), политик (51), закон (27), надежность (26), глава государства, главный, умный (22), лидер (19), правитель, справедливость (18), Кремль (17), выборы, сыр (16), деньги, коррупция (15), авторитет, тоталитаризм, человек (14), гарант, он, предводитель (13), демократия, держава, зубная паста, (12), мужчина (11), ложь, лысина, новости (10), защита, конституция, народ, правительство, родина, руководитель, честность (9), Госдума, диктатор, Медведев, Москва, Обама, президиум, самодержавие (8), патриот, патриотизм, пиджак, Сирия, управление (7), вор, важный, командующий, костюм, краб, начальник, сидит на горе, срок, твердость, трудности, федерация (6), безысходность, бесправие, вера, воля, главный человек, год, громко, избранный, ломать, мир, мужественность, надежда, официальность, пост, претендент, приказ, работа, руководитель, самостоятельный, стоматология, США, управлять, хитрый, царь (5), агрессия, вице-президент, вожак, война, действие, детство, джип, директор, достоинство, главный военнокомандующий, голосование, жулик, защищенность, картошка, Крым, луковица, министерство, могущество, монарх, новый, нормально, общество, перелеты, плутократия,*

порядок, правда, правильный, править, профессионал, разум, хозяин, холодная голова, чин, чиновник (4), безнадежность, Бог, бумаги, бюллетень, выносливый, Джордж Вашингтон, достойный, Ельцин, идет, избиратель, интриги, кампания, КГБ, контроль, мерседес, микрофон, мужество, народность, неадекватность, одет, один, опора, орел, парад Победы, парламент, партия, победа, позиция, правильно, пробиваться, решение, самостоятельный, самоуверенность, серость, сильный, слово, смелый, старый, страх, терроризм, уважаемый, уважение, уверенность, хороший, часы (3), абсолют, ассоциации силовых единоборств, ассоциация стоматологов России, банан, Белый дом, богатство, броня, будущее, вождь, вседозволенность, выступление, выступления, головная боль, город, государственная машина, дипломат, дипломатичность, дороги, елка, жизнь, защитник, законность, защитник, идейный лидер, коммуникабельный, корпорация, монарх, многозадачность, мудрый, наглый, нация, настоящий, неправда, образованный, ограничения, оппозиция, основа, осуждение, полномочие, постоянство, право, правление, православие, представительность, самоуправленец, санкции, свобода, сознание, телевизор, труд, успешность, усталость, черная машина, юмористичный (2), алчность, благополучие, белый, беспредел, величие, высоко, гордость, гуманность, действовать, демагоги, Единая Россия, жадность, знает больше, чем другие, знакомый, измена, изменения, кандидатура, Крым наш, лицо, медицина, милосердие, молчание, мощь, не старый, новогоднее выступление, новый, ожидание, первое лицо государства, первый канал, переговоры, пластика, понимание, преданный, представитель, пропаганда, рамки, распущенность, решительность, реформы, рубль, Сочи, спикер, страж, строгость, телевидение, трибуна, ФСБ, чебурашка, черный (146).

Сопоставляя результаты разных видов ассоциативного эксперимента, можно заметить, что цепочечный эксперимент позволяет точнее выделить ядро ассоциативного поля: в ядро можно включить реакции *власть* (184) *и Путин* (178), имеющие количественный разрыв с последующими реакциями более 100 единиц. Граница периферийных зон семантического поля всегда определяется в достаточной степени субъективно, т.к. никаких четких критериев не существует в силу разного количества респондентов, которые могут участвовать в эксперименте (должно быть не менее 100 – это единственное условие) и различного распределения по частоте слов-реакций. Таким образом, относим к ближней периферии реакции *сила* (71)*, ответственность* (69), *государство* (65), *глава* (61), *страна* (51), *политик* (51). Можно также выделить две зоны средней периферии: первая - это реакции *закон* (27)*, надежность* (26)*, глава государства, главный, умный* (22), и вторая – слова с частотой от 19 до 6. В дальнюю периферию включаем реакции с частотой от 5 до 1, что представляется вполне логичным, т.к. частота 5 – это, например, одна первая реакция у одного человека из 146, что может быть случайным, ситуативным, или одна вторая реакция у одного респондента (предполагается, что у усредненного носителя языка вторые и последующие реакции - это не ядро семантического поля) и одна пятая реакция у одного респондента (предполагается, что это дальняя периферия), и так далее все возможные комбинации позиций и частоты слов-реакций, более слабые по ассоциативным связям со словом-стимулом, до 5 реакций респондентов на пятом месте.

Ядро семантического поля в сознании носителей языка по результатам свободного эксперимента составляет одно слово-реакция - *Путин* (25), затем можно выделить ближнюю периферию – реакции *власть* (15)*, Обама* (11), *государств, премьер-министр* (9), и среднюю - слова-реакции с частотой от 6 до 2, и, как правило, к дальней периферии относят единичные реакции.

Также можно отметить, что цепочечный эксперимент позволяет намного объемнее определить наполнение зоны дальней периферии, в отличие от свободного эксперимента при примерно одинаковом количестве респондентов. Цепочечный эксперимент позволяет более объективно выделить ядро и периферийные зоны, кроме того, выделить большее количество периферийных слоев.

Приведем в подтверждение этого предположения результаты свободного и цепочечного экспериментов на слово-стимул *мэр*:

мэр - власть (16), город (12), деньги (9), глава города (7), коррупция (6), управление (5), администрация, выборы, ответственность, правительство, чиновник (3), города, мужчина,

политика, руководитель (2), глава, глава администрации, государство, день города, департамент, депутат, дорога, есть охрана, Лужков, Мерседес, начальник, недоверие, нечестный, обещания, обязательства, ответственное лицо, площадь, порядочность, сила, тщеславие, умный, управленец, честный, 0 (102, 38, 1, 23)

Ядро ассоциативно-семантического поля лексемы *мэр* по данным свободного эксперимента - власть (16), ближняя периферия - *город* (11), *деньги* (9), *глава города* (7), *коррупция* (6), *управление* (5), средняя периферия - *администрация, выборы, ответственность), правительство, чиновник* (3), *города, мужчина, политика, руководитель* (2), и дальняя периферия – это единичные слова-реакции.

Результаты цепочечного эксперимента (приводятся не полностью):
мэр – власть (137), деньги (132), город (108), глава города (71), коррупция (70), управление (61), глава (60), администрация (46), ответственность (45), правительство (42), выборы, политика (40), взятки (35), вор (32), начальник (27), богатство (23), мужчина (22), управленец (20), Лужков (18), 2 слова-реакции (17), 2 слова-реакции (15), 2 слова-реакции (14), 3 слова-реакции (13), 3 слова-реакции (12), 2 слова-реакции (11), 5 слов-реакций (10), 5 слов-реакций (9), 6 слов-реакций (8), 8 слов-реакций (7), 9 слов-реакций (6), 30 слов-реакций (5), 44 слова-реакции (4), 48 слов-реакций (3), 55 слов-реакций (2), 59 слов-реакций (1) (118).

Ядро ассоциативно-семантического поля лексемы *мэр* по данным цепочечного эксперимента - *власть* (137), *деньги* (132), *город* (108), ближняя периферия - *глава города* (71), *коррупция* (70), *управление* (61), *глава* (60), первая зона средней периферии - *администрация* (46), *ответственность* (45), *правительство* (42), *выборы, политика* (40), вторая зона средней периферии - *взятки* (35), *вор* (32), *начальник* (27), третья зона средней периферии – слова-реакции с частотой от 23 до 6, и дальняя периферия - слова-реакции с частотой от 5 до 1.

На примере другого слова-стимула также наблюдаем возможность более объективного и бо́льшего выделения периферийных зон слов-реакций цепочечного эксперимента.

Однако, в отличие от свободного ассоциативного эксперимента, подсчет результатов цепочечного намного более трудоемкий, также не столь очевидна пользователям ассоциативных словарей приводимая статистика, тогда как абсолютная частота, указываемая по данным свободного эксперимента, интерпретируется легче, - это достаточно важно, если учесть, что пользователями ассоциативных словарей в основном являются специалисты-филологи.

Таким образом, мы видим, что нельзя сделать однозначный выбор в пользу свободного или цепочечного эксперимента: выбор зависит от цели исследования, условий проведения эксперимента (например, при проведении цепочечного эксперимента допускается Интернет-опрос), а также от объекта исследования – слова-стимула: цепочечный эксперимент практически не учитывает отказы респондентов, которые имеют место быть всегда, особенно если слово-стимул имеет очень абстрактное значение или обладает низкой валентностью в языке. Также необходимо отметить, что при анализе семантических полей больший интерес представляет ядро и ближняя и средняя периферия, и надо отметить, что данные свободного и цепочечного экспериментов, если не распределять их по зонам, очень близки.

Библиографический список

1. Караулов, Ю. Н. Русский язык и языковая личность / Ю. Н. Караулов. – М.: Наука, 1987. – 261 с.
2. Словарь ассоциативных норм русского языка; под ред. А. А. Леонтьев. – М.: МГУ, 1977. – 287 с.
3. Кондаков, Н. И. Логический словарь-справочник / Н. И. Кондаков. – М., Наука, 1975. – 717 с.
4. Русский ассоциативный словарь: в 3 ч., 6 кн. / сост. Ю. Н. Караулов и др. Кн. 1, 3, 5. Прямой словарь: от стимула к реакции. – М.: Институт русского языка РАН, Кн.1,1994. Кн. 2, 1996. Кн. 3, 1998.

A.V. Sineleva

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ASSOCIATIVE-SEMANTIC FIELDS ACCORDING FREE AND A CHAIN ASSOCIATIVE EXPERIMENT

Nizhniy Novgorod State University n. a. N.I. Lobachevsky

This article examines and compares the possibility of use of results of the free and non-free associative experiment as most of the developed techniques (methods) psycholinguistic analysis of the semantics. The purpose of the experiment is a study in consciousness of native speakers of the structure and contents of the semantic fields of the lexical units acting as word-of incentives and opportunities selection of the semantic core and the periphery. Comparative analysis of the results of the experiments shows that it is impossible to make an unambiguous choice in favor of free or chain: the choice of the type of experiment depends on the purpose of the study, the conditions of the experiment, as well as on the object of the study – the lexical meaning and valency of the word-stimulus.

Keywords: associative dictionary, associative field, Association, free associative experiment, semantic field, chain associative experiment.

УДК 004.912; 519.254

И.О. Яблоков, А.С. Мохов, В.О. Толчеев

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ТЕРМИНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЩЕНИЙ СОТРУДНИКОВ БАНКА

Национальный исследовательский институт «МЭИ», Москва

В статье приводится исследование методов выявления информативных признаков, таких как Bag of Words и Word2Vec для обработки и последующей классификации обращений сотрудников банка. Выборка для исследования формируется из БД Service Manager, особенность которой заключается в том, что каждое обращение формируется человеком, вследствие чего могут появляться ошибки, неполные описания проблемы и другие особенности, влияющие на точность классификации.

Ключевые слова: Классификация, Bag of words, Word2Vec, обработка и анализ текстовых данных.

Постановка задачи

Банк, в рамках которого проводится данное исследование, использует автоматизированную систему Service Manager для обработки заявок сотрудников, принятых из различных каналов: web-форма, электронная почта, приложение смартфона, телефонный звонок. Каждая зарегистрированная заявка относится к исполнителю, который обеспечивает выполнение заявки. В зависимости от выполняемого процесса у заявки может быть та или иная категория. От категории зависит действие, которое будет выбрано для устранения корневой причины возникновения запроса или применение обходного решения.

Сейчас классификацией заявок занимаются диспетчеры. При этом на качество классификации заявок влияют человеческие факторы: усталость, реакция, недостаточная квалификация и т.д., которые тормозят получение решения по обращениям сотрудников. Когда заявка может быть классифицирована автоматически, то отпадает необходимость нанимать диспетчера, что сокращает время выполнения заявки и затраченные на её выполнение ресурсы.

В данной работе рассматриваются методы предварительной обработки заявок, выполненных в виде русскоязычного текстового запроса. Проанализировав тему и содержание запроса, мы можем автоматически определить класс запроса, а это в свою очередь позволит нам отправить сообщение нужному исполнителю или даже отправить сотруднику автоматический ответ.

На вход модели подается обращение сотрудника, содержащее поля «Информация» и «Дополнительные параметры».

Модель вычисляет вероятность отнесения к каждому из 6 классов на основе текстовой информации обращения. При этом классы не являются взаимоисключающими. Фактически модель состоит из нескольких отдельных моделей, каждая из которых предсказывает вероятность соответствующего класса. В качестве алгоритма классификации использовался градиентный бустинг. Расстановка классов на выборках для обучения и валидации осуществлялась в ручном порядке аналитиками.

Таким образом, имеем задачу многоклассовой классификации текстовых данных. Для моделирования использовался метод градиентного бустинга [1] с отбором гиперпараметров на кросс валидации (XGB ONE vs ALL) как один из наиболее точных методов для решения подобных задач. В качестве критерия качества классификации используем полноту (Recall), точность (Precision) и f1-меру (f1-score).

Bag of Words

В задачах анализа текстов возникает потребность ставить текстам в соответствие некоторые признаки. Базовая идея заключается в том, чтобы отождествлять текст со словами, которые в него входят, т.е. представлять текст как множество слов, входящих в него с разными частотами.

В настоящее время существует несколько способов преобразования строковых данных в числовое представление, для последующего применения алгоритмов машинного обучения. Одни из наиболее известных методов: Bag of Words (Мешок слов) и Word2Vec (Векторное представление). В каждом есть свои плюсы и минусы.

В модели Bag of Words каждый термин рассматривается в качестве независимой случайно величины вне контекста и связи с другими словами текста. При этом «вес» термина определяется частотой его встречаемости [2]. Таким образом, каждому документу d из корпуса D сопоставляется вектор частот слов или вектор вхождений слов в документ. Жесткая привязка признакового описания к словам, встретившимся в корпусе, обязывает при использовании обученных на некотором корпусе алгоритмов следить за тем, чтобы признаковые описания новых документов составлялись с тем же словарем.

Рассмотрим на примере 2 заявок:

1. «Задача не назначается исполнителю. И не назначается руководителю»;
2. «Исполнителю в программе по счетам выбрана задача».

Словарь будет выглядеть следующим образом: {«исполнителю», «задача», «выбрана», «не», «назначается», «в», «по», «счетам», «программе», «руководителю», «и»}.

Теперь запишем векторные представления документов согласно словарю:

1. [1, 1, 0, 2, 2, 0, 0, 0, 0, 1, 1]
2. [1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0]

Недостатки модели:

- очень большой размер векторов;
- замедление операции сравнения векторов из-за размерности векторов;
- можно применять различные методы снижения размерности, но это приведет к потере качества.

Word2Vec

Word2Vec (W2V) – набор алгоритмов для расчёта векторных представлений слов естественного языка [3]. Алгоритмы, входящие в Word2Vec, CBOW – Continous Bag Of Words и Skip-gram – двуслойные нейронные сети прямого распространения, обученные восстанавливать лингвистический контекст для предоставленного слова. Word2Vec принимает на вход большой корпус текста и возвращает векторное пространство обычно размерностью в несколько сотен, в котором каждому слову корпуса сопоставлен определённый вектор в этом пространстве. Вектора слов в пространстве расположены таким образом, что близкие семантически слова имеют небольшое косинусное расстояние между соответствующими им векторами.

Алгоритм построения модели:

1. Составляется словарь терминов, встретившихся во всех документах. Его размер практически не ограничивается, исключаются только слова, имеющие наименьшую встречаемость.
2. Каждому термину в словаре сопоставляется частота встречаемости во всех документах
3. Для кодирования словаря строится дерево Хаффмана.
4. Производится субдискретизация частых слов (параметр задается при создании модели).
5. Для этих слов применяется один из алгоритмов CBOW (Continuous Bag-of-Words) или Skip-gram.
6. Применяется нейронная сеть прямого распространения с функцией активации иерархический softmax или негативное семплирование (negative sampling).

К недостаткам модели можно отнести необходимость наличия большой обучающей выборки.

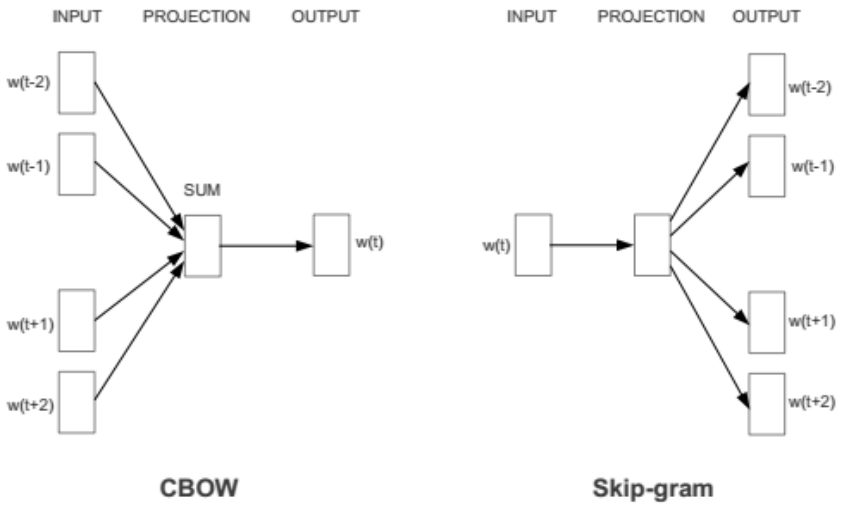


Рис. 1. Архитектура алгоритмов CBOW и Skip-gram

Формирование выборки

Заявка, которую необходимо проклассифицировать, формируется человеком, и в результате человеческого фактора в описании появляются ошибки различного рода. От таких ошибок можно частично избавиться путем замены синонимов на одно слово. Для этого список синонимов составляется вручную или при помощи алгоритмов Word2Vec.

Поле «Дополнительная информация» выгружается из БД в виде XML документа и для выделения интересующего нас текста применяем парсинг этого поля. Такая информация находится в блоках: подробное описание, комментарий, ошибка, информация, сообщение, описание процесса, конкретное наименование.

Чтобы заявка несла как можно больше информации, надо при очистке текста оставить как можно больше данных в блоках, которые помогут нам в дальнейшем классифицировать запрос. Для этого производим замену ФИО и городов на служебные слова. При помощи регулярных выражений удаляем лишнюю информацию и символы, которые не несут никакой смысловой нагрузки на запрос. Для удаления из исходного текста грамматической информации была использована нормализация слов, оставляя смысловую составляющую. Суть некоторых слов в запросе зависит от частицы «не», поэтому она прибавлена к слову, следующему за ней [4].

После обработки, информация из 2-х полей запроса складывается для формирования генеральной совокупности, на которой происходит обучение и валидация модели.

Для выявления информативных признаков была сформирована выборка из 9000 запросов сотрудников за последние 6 месяцев. Из них для обучения использовалось 6000 запросов и 3000 запросов для валидации. Разбивка генеральной совокупности на обучающую и тестовую выборку происходит при помощи метода train_test_split модуля model_selection библиотеки Scikit-learn [4].

Таблица 1
Структура запроса

Имя блока	Описание	Вид представления поля
NUMBER	Номер Инцидента. Уникальный номер запроса в БД Service Manager.	Текст
ОПИСАНИЕ	Наименование шаблона обращения. Шаблон обращения формируется автоматически или вручную при регистрации запроса через автоматизированную систему.	Текст
ИНФОРМАЦИЯ	Поле «Информация» в запросе. Содержит описание запроса сформированное инициатором автоматически или вручную при регистрации запроса через автоматизированную систему.	Текст
OPTIONS	Поле «Дополнительные параметры» в запросе. Содержит подробную структурированную информацию о запросе.	XML Document
Категория	Класс модели, проставленный аналитиком вручную.	Текст
РЕШЕНИЕ	Поле «Решение» в запросе. Содержит итоговое решение по выполнению запроса (действия, необходимые для устранения корневой причины возникновения запроса или применение обходного решения).	Текст
РГ	Поле «Рабочая группа» (РГ). РГ на которую поступил запрос. Представляет собой объединение сотрудников, обеспечивающих выполнение в рамках своих компетенций закрепленных за ними функциональных задач.	Текст
ADDED_DATE	Дата и время добавления запроса в БД.	Дата

И обучающая, и экзаменационная выборки состоят из 6 классов, размеры и наименования которых указаны в табл. 2. Пример запроса приведен в табл.3.

Таблица 2
Состав выборок

Название класса	Размер класса на обучающей выборке	Размер класса на экзаменационной выборке
CRM 1 - Отчетность	511	250
CRM 34 - Планшет	563	285
CRM 5 - Вход в АС	998	510
CRM 7 - Производительность АС	3561	1760
ИСУ	163	65
Очередь Admin	204	90

Таблица 3
Пример запроса пользователя

Информация	Дополнительная информация	Категория
Проблема со входом в CRM Розничный для менеджеров по продажам Нестандартный ЗНО	<form><text sbfield="" id="n0" label="" mandatory="false" sbcommand="" sbmodify="false" sbtask="" sbtitle="" sbmask="" sbtype="string" visible="true" multiline="false">ВАЖНО: Данное обращение не является средством ускорения выполнения запросов на доступ!Для полного анализа вложите снимок экрана с ошибкой (скриншот).</text><text sbfield="" id="t4" label="ФИО обратившегося" mandatory="false" sbcommand="setValue([getUser([FIO])],[this])" sbmodify="true" sbtask="" sbtitle="" sbmask="" sbtype="string" visible="true" multiline="false">ФИО </text><text sbfield="" id="objectid" label="Номер обращения, по которому Вы обращаетесь с жалобой:" mandatory="false" sbcommand="" sbmodify="true" sbtask="" sbtitle="" sbmask="" sbtype="" visible="true" multiline="false">SD40593296</text><select sbfield="" id="a1" label="Выберите тип обращения" mandatory="true" sbcommand="null" sbmodify="true" sbtask="null" sbtitle="" sbmask="" sbtype="" visible="true" style="combo">1<option id="a1_0" label="Проблема с доступом в АС">1</option></select><text sbfield="" id="t2" label="Контактный телефон" mandatory="false" sbcommand="setValue([getUser([phoneInner])],[this])" sbmodify="true" sbtask="null" sbtitle="" sbmask="" sbtype="string" visible="true" multiline="false">номер телефона</text><text sbfield="" id="a4" label="IP-адрес" mandatory="true" sbcommand="setValue([getUser([ipaddr])],[this])" sbmodify="true" sbtask="null" sbtitle="" sbmask="" sbtype="string" visible="true" multiline="false">адрес</text></form>	CRM 5 - Вход в АС

Результаты исследования

Классификация проводилась на экзаменационной выборке методом градиентного бустинга. Точность, полнота и f1-мера классификации приведены в табл. 4 и 5 для выявления информативных терминов методами Bag of Words и Word2Vec соответственно.

Таблица 4
Предсказания с использованием Bag of Words

Класс	precision	recall	f1-score
CRM 1 - Отчетность	0,95	0,86	0,90
CRM 34 - Планшет	0,96	0,91	0,93
CRM 5 - Вход в АС	0,92	0,93	0,93
CRM 7 - Производительность АС	0,96	0,98	0,97
ИСУ	0,76	0,79	0,78
Очередь Admin	0,93	0,86	0,89

Таблица 5
Предсказания с использованием Word2Vec

Класс	precision	recall	f1-score
CRM 1 - Отчетность	0,92	0,89	0,90
CRM 34 - Планшет	0,91	0,92	0,89
CRM 5 - Вход в АС	0,89	0,90	0,90
CRM 7 - Производительность АС	0,95	0,97	0,93
ИСУ	0,88	0,86	0,85
Очередь Admin	0,87	0,86	0,84

Как видно, результаты классификации для Bag of words несколько превосходят результаты Word2Vec практически на всех классах, как по полноте, так и по точности.

Заключение

Была исследована точность классификации методом градиентного бустинга для двух разных способов представления текстов – в векторном виде (Word2Vec) и в качестве «Мешка слов» (Bag of Words). Исследования показали, что на маленькой выборке данных метод Bag of Words дает наилучшие результаты. Причиной этому может быть то, что для правильного выявления информативных терминов с помощью Word2Vec требуется большой корпус текстовых документов, поскольку в основе этого подхода лежит нейросеть.

Библиографический список

1. Friedman J. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. — IMS 1999 Reitz Lecture.
2. Маннинг К.Д., Рагхаван П., Шютце Х. «Введение в информационный поиск». – М.: «Вильямс», 2014.
3. Tomas Mikolov, Kai Chen, Greg Corrado, and Jeffrey Dean. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // In Proceedings of Workshop at ICLR, 2013
4. Андреас Мюллер, Сара Гвидо. «Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными», 2017.

I.O. Yablokov, A.S. Mokhov, V.O. Tolcheev

THE RESEARCH OF THE METHODS OF INFORMATIVE TERMS DETECTING FOR CLASSIFICATION OF THE BANK EMPLOYEES' APPEALS

National Research Moscow Power Engineering Institute

Abstract. The article researches the methods of informative terms detecting, such as "Bag of Words" and "Word2Vec" for processing and classification of bank employees' appeals. The sample for research is formed from the Service Manager database. The peculiarity of the sample is that each appeal is formed by a person, so that errors, incomplete descriptions of the problem and other features that affect the accuracy of the classification can appear.

Purpose: Comparison methods of informative terms detecting from textual appeals for further classification.

Result: Studies have shown that on a small sample of data, the Bag of Words gives a better result than Word2Vec.

Keywords: Classification, Bag of words, Word2Vec, Text Mining.

УДК 004.023

В.А. Чеканин, А.В. Чеканин

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПЛОТНОСТИ ОРТОГОНАЛЬНОЙ УПАКОВКИ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Цель работы: Решение проблемы выбора объектов для их последующего перераспределения в контейнере с целью получения более плотной упаковки при решении задач прямоугольного раскроя и ортогональной упаковки.
Методология: Предлагаются шесть правил выбора объектов из контейнера для их удаления и последующего более рационального размещения. Правила реализуют выбор объектов, расположенных максимально далеко от начала координат контейнера, а также объектов, расположенных рядом с локальными пустотами внутри рассматриваемого контейнера.
Результаты: Приведены результаты тестирования правил выбора объектов на эталонных тестовых задачах прямоугольного раскроя. Определена последовательность применения предложенных правил при выполнении алгоритма уплотнения упаковки.
Выводы: Предложенные правила обеспечивают повышение плотности размещения объектов до 5 % и могут быть использованы в составе эвристического алгоритма уплотнения упаковки.

Ключевые слова: задача ортогональной упаковки, задача прямоугольного раскроя, оптимизация, уплотнение упаковки, вычислительный эксперимент.

Введение

Оптимизационные задачи раскроя и упаковки объединяют широкий набор задач, заключающихся в поиске способов наиболее рационального размещения объектов в контейнерах. К решению этих задач сводится решение большого числа практических задач оптимизации, в частности, задач заполнения контейнеров грузами, компоновки оборудования, прямоугольного раскроя материалов, распределения трафика, объемно-календарного планирования и многих других задач [1–6].

Все типы задач раскроя и упаковки относятся к классу NP-полных задач [7], эффективное решение которых основано на применении эвристических и метаэвристических алгоритмов оптимизации, обеспечивающих получение приближённых решений за приемлемое время [8, 9]. Качество субоптимальных решений может быть повышено за счёт применения алгоритма уплотнения упаковки, основанного на идее локального перераспределения размещённых в контейнере объектов.

Постановка задачи ортогональной упаковки

Приведём постановку D-мерной ($D = 2, 3$) задачи ортогональной упаковки (прямоугольного раскроя) объектов в один контейнер. Дан набор из n ортогональных объектов с габаритными размерами $\left\{w_i^1, w_i^2, \ldots, w_i^D\right\}, i \in \{1, \ldots, n\}$, а также единственный контейнер с габаритными размерами $\left\{W^1, W^2, \ldots, W^D\right\}$. Обозначим положение объекта i в контейнере через $\left(x_i^1; x_i^2; \ldots; x_i^D\right)$. При решении задачи упаковки необходимо наиболее плотно разместить все объекты в контейнере при выполнении всех условий корректного размещения [10]:

- ребра размещённых в контейнере ортогональных объектов параллельны ребрам этого контейнера;
- размещённые объекты не перекрывают друг друга, т.е.
$$\left(x_i^d \geq x_k^d + w_k^d\right) \vee \left(x_k^d \geq x_i^d + w_i^d\right) \quad \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \quad i, k \in \{1, \ldots, n\}, \quad i \neq k;$$
- размещённые объекты не выходят за границы контейнера, т.е.
$$\left(x_i^d \geq 0\right) \wedge \left(x_i^d + w_i^d \leq W^d\right) \quad \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \quad \forall i \in \{1, \ldots, n\}.$$

При размещении объектов запрещён их поворот.

Постановка задачи *D*-мерной ортогональной упаковки предполагает задание направления загрузки контейнера в виде приоритетного списка выбора связанных с ним координатных осей $\{L\} = \{L^1; L^2; \ldots; L^D\}$, где $L^d \in [1; D] \forall d \in \{1, \ldots, D\}$. При размещении каждого объекта поиск свободных областей заполняемого контейнера должен осуществляться в порядке, определённом в приоритетном списке $\{L\}$ [11].

Решение задачи упаковки представляет собой строку (называемую строкой размещения), содержащую последовательность выбираемых для размещения объектов. Для формирования упаковки необходимо декодировать строку размещения, при этом решается проблема выбора объектов и свободных областей контейнера.

Оценка качества размещения объектов проводится по критерию минимизации длины занятой объектами части контейнера, измеренной вдоль координатной оси $l = L^D$, т.е. минимизируемой целевой функций является величина $S = \max\left(x_i^l + w_i^l\right),\ i = 1 \ldots n$, которая определяет положение объекта, наиболее удалённого от начала координат контейнера.

Для описания содержимого контейнера будем использовать разработанную модель потенциальных контейнеров, которая описывает свободное пространство каждого контейнера в виде набора потенциальных контейнеров – ортогональных объектов с наибольшими габаритными размерами, которые потенциально могут быть в нём размещены [12]. На рис. 1 в качестве примера приведены потенциальные контейнеры (выделены пунктирными линиями) в двухмерном прямоугольном контейнере. Потенциальный контейнер *k* описывается вектором $\{p_k^1; p_k^2; \ldots; p_k^D\}$, содержащим его габаритные размеры, а также вектором $\{x_k^1; x_k^2; \ldots; x_k^D\}$, содержащим координаты положения начала его системы координат относительно системы координат контейнера.

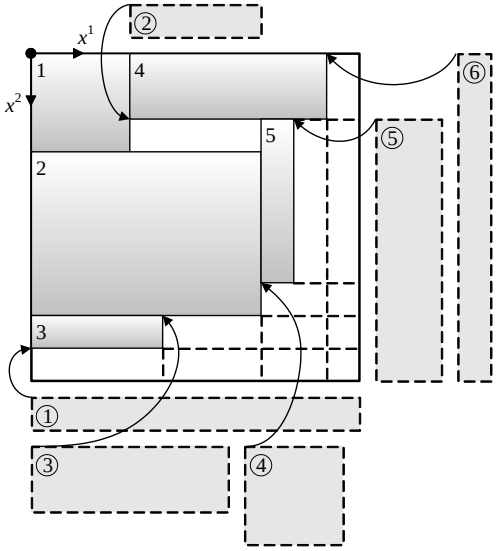


Рис. 1. Потенциальные контейнеры в задаче двухмерной упаковки

Правила выбора объектов для уплотнения упаковки

Правила выбора объектов для их последующего перераспределения основаны на использовании описанных ниже методов.

1) Метод AREA – выбор объектов, касающихся наиболее удалённой границы описывающего упаковку ортогонального объекта с габаритными размерами $V^d = W^d\ \forall d \neq l$, $V^l = \max\left(x_i^l + w_i^l\right),\ i = 1 \ldots n$ (рис. 2).

Рис. 2. Объекты, выбранные методом AREA

2) Метод LAST – выбор объектов, касающихся потенциальных контейнеров, границы которых вдоль координатной оси l совпадают с границей контейнера, т.е. потенциальных контейнеров, для которых $x_k^l + p_k^l = W^l$ (рис. 3).

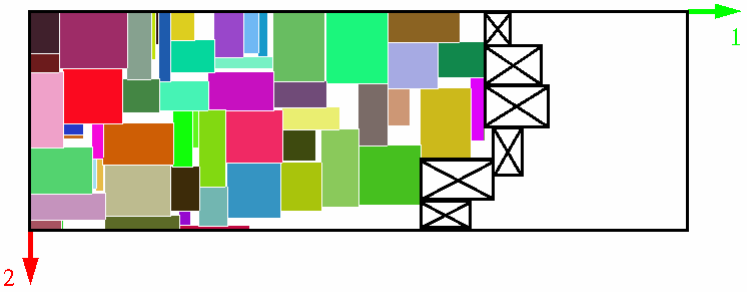


Рис. 3. Объекты, выбранные методом LAST

3) Метод MAX – выбор объектов, касающихся заключённого внутри упаковки потенциального контейнера с наибольшим объёмом (площадью), т.е. потенциального контейнера, для которого $x_k^l + p_k^l < W^l$ (на рис. 4 найденный потенциальный контейнер изображён прямоугольником без заливки).

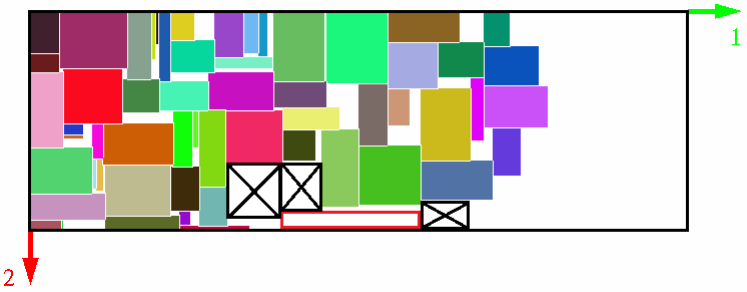


Рис. 4. Объекты, выбранные методом MAX

4) Метод DOUBLE – выбор объектов, касающихся двух заключённых внутри упаковки потенциальных контейнеров с наибольшими объёмами (площадями) (рис. 5).

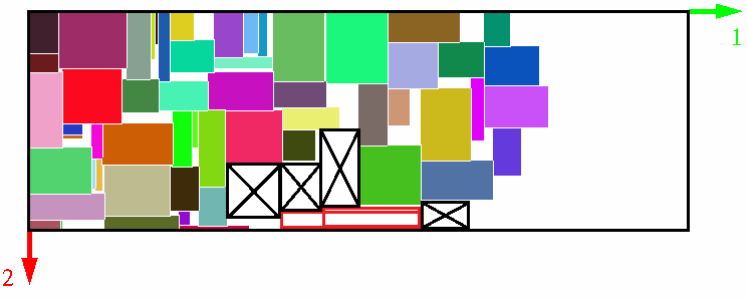


Рис. 5. Объекты, выбранные методом DOUBLE

Методы первой группы (AREA и LAST) предназначены для выбора объектов, расположенных максимально далеко от начала координат контейнера. Методы второй группы (MAX и DOUBLE) предназначены для выбора объектов, окружающих наибольшие пустоты в контейнере. На основе этих методов реализованы шесть правил выбора объектов для их локального перераспределения в контейнере (табл. 1).

Таблица 1

Правила выбора объектов для перераспределения в контейнере

№ п/п	Правило выбора объектов	Метод первой группы	Метод второй группы	Примечание
1	MAX_AREA	AREA	MAX	Одновременное применение двух методов выбора объектов
2	MAX_LAST	LAST	MAX	Одновременное применение двух методов выбора объектов
3	DOUBLE_AREA	AREA	DOUBLE	Одновременное применение двух методов выбора объектов
4	DOUBLE_LAST	LAST	DOUBLE	Одновременное применение двух методов выбора объектов
5	MAXMAX_AREA	AREA	MAX	Применение метода AREA, а также метода MAX к упаковке, полученной после удаления всех объектов, найденных методом MAX
6	MAXMAX_LAST	LAST	MAX	Применение метода LAST, а также метода MAX к упаковке, полученной после удаления всех объектов, найденных методом MAX

Для размещения удалённых из контейнера объектов применяется однопроходной эвристический алгоритм с популяцией, состоящей из 10 закодированных решений, составленных следующим образом:

- решение 1, содержащее последовательность размещения объектов в порядке их следования в исходной решаемой задаче упаковки;
- решение 2, содержащее последовательность размещения объектов, упорядоченных по убыванию их объёмов (площадей в задаче двухмерной упаковки);
- решение 3, содержащее последовательность размещения объектов, упорядоченных по возрастанию их объёмов (площадей в задаче двухмерной упаковки);
- решение 4, содержащее последовательность размещения объектов, упорядоченных по убыванию их длин, измеренных вдоль координатной оси l;
- решение 5, содержащее последовательность размещения объектов, упорядоченных по возрастанию их длин, измеренных вдоль координатной оси l;
- решения 6-10, содержащие псевдослучайные последовательности размещаемых объектов.

Если в результате применения этого эвристического алгоритма формируется упаковка с лучшим показателем заполнения контейнера (меньшим значением целевой функции), то полученное решение сохраняется, после чего осуществляется попытка уплотнения полученной упаковки. Данный процесс итеративно повторяется до тех пока, пока применение алгоритма уплотнения не обеспечит получение лучшей упаковки, либо пока не будет достигнут критерий останова, которым является достижение заданного числа итераций работы алгоритма.

Вычислительные эксперименты

Анализ эффективности применения правил выбора объектов для их перераспределения проводился на эталонных тестовых задачах рулонного раскроя. Тестовые задачи включают 10 классов задач (классы C1–C6 предложены O. Berkey и P. Wang [13], классы C7–C10 предложены S. Martello и D. Vigo [14]). В ходе вычислительных экспериментов были получены

решения 500 задач рулонного раскроя (10 классов по 50 задач). Число прямоугольных объектов в каждом классе – от 20 до 100. Максимальное число итераций алгоритма уплотнения выбрано равным 20.

Правила выбора объектов применялись к упаковкам, полученным в результате декодирования строк размещения, в которых порядок выбора объектов для размещения совпадает с порядком их следования в тестовой задаче.

В качестве показателя качества уплотнения используется повышение плотности упаковки, которое рассчитывается по формуле $\mu = (S_0 - S_1)/S_0 \times 100\%$, где S_0 – значение целевой функции до уплотнения упаковки, S_1 – значение целевой функции после уплотнения упаковки.

Для каждого правила выбора объектов была реализована серия из 10 вычислительных экспериментов, полученные усреднённые показатели повышения плотности упаковки сведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели повышения плотности упаковки, %

Правило выбора объектов	Класс задач										Среднее значение
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
MAX_AREA	0,48	2,39	0,14	2,71	0,41	1,72	0,44	1,17	0,00	0,70	1,07
MAX_LAST	0,50	4,75	0,73	3,80	0,59	3,93	0,42	1,33	0,00	0,74	1,68
DOUBLE_AREA	0,76	4,62	0,21	3,25	0,77	2,82	0,63	1,69	0,03	1,47	1,63
DOUBLE_LAST	0,85	5,03	0,79	4,75	1,04	4,34	0,67	2,10	0,03	1,62	2,12
MAXMAX_AREA	1,49	3,99	1,12	3,92	1,06	3,32	0,62	2,41	0,04	1,66	1,96
MAXMAX_LAST	1,50	5,92	1,32	5,80	1,23	4,63	0,62	3,36	0,19	1,85	2,64

Результаты проведённых вычислительных экспериментов показали, что наибольшую эффективность уплотнения обеспечивает правило MAXMAX_LAST, которое для 9 классов задач обеспечивает получение более плотных упаковок по сравнению с другими правилами, однако при использовании этого правила алгоритм уплотнения упаковки затрачивает максимальное время. Наименьшая степень уплотнения достигается при использовании правила MAX_AREA, которое для 9 классов задач обеспечивает получение упаковок с минимальными значениями показателя повышения плотности упаковки, однако это правило характеризуется наивысшей временной эффективностью.

Выводы

Предложены правила выбора объектов для их перераспределения в контейнере с целью получения более плотной упаковки. Эффективность применения описанных правил исследована на тестовых задачах двухмерного рулонного раскроя. На основе полученных результатов определён порядок применения правил выбора объектов при их использовании в составе алгоритма уплотнения упаковки (по убыванию показателя повышения плотности упаковки): MAXMAX_LAST, DOUBLE_LAST, MAXMAX_AREA, MAX_LAST, DOUBLE_AREA, MAX_AREA. Правила выбора объектов реализованы инвариантно относительно размерности решаемой задачи, что делает возможным их применение в задачах оптимизации как двухмерных, так и трёхмерных ортогональных ресурсов. Дальнейшее развитие работы связанно с разработкой эвристического алгоритма уплотнения упаковки, использующего совместно все предложенные правила выбора объектов.

Библиографический список

1. Wascher, G. An improved typology of cutting and packing problems / G. Wascher, H. Haubner, H. Schumann // European Journal of Operational Research. 2007. Vol. 183. No. 3. P. 1109–1130.
2. Капитанов, А.В. Автоматизированные управленческие системы в промышленности / А.В. Капитанов, В.И. Мишатин, Е.Г. Семячкова // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. Т. 2. № 1. С. 82–84.

3. Митрофанов, В.Г. Автоматизированное проектирование на основе «элементной» технологии / В.Г. Митрофанов, И.С. Омельченко, А.В. Капитанов // Вестник МГТУ Станкин. 2015. № 4. С. 109–112.
4. Ермолов, И.Л. Решение задачи распределения группы мобильных роботов для обеспечения работы подвижной коммуникационной сети / И.Л. Ермолов, С.А. Собольников // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 4. С. 126–129.
5. Чеканин, В.А. Эвристический алгоритм оптимизации решений задачи прямоугольного раскроя / В.А. Чеканин, А.В. Чеканин // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 4. С. 210–213.
6. 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.
7. Gary, M. Computers intractability: a guide to the theory of NP-completeness / M. Gary, D. Johnson. – San Francisco: W.H. Freeman, 1979. – 338 p.
8. Chekanin, V.A. Development of the multimethod genetic algorithm for the strip packing problem / V.A. Chekanin, A.V. Chekanin // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 598. P. 377–381.
9. Чеканин, В.А. Адаптивная настройка параметров генетического алгоритма / В.А. Чеканин, М.Ю. Куликова // Вестник МГТУ «Станкин». 2017. № 3 (42). С. 85–89.
10. Bortfeldt, A. Constraints in container loading – A state-of-the-art review / A. Bortfeldt, G. Wascher // European Journal of Operational Research. 2013. Vol. 229. No. 1. P. 1–20.
11. 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.
12. Chekanin, V.A. Algorithms for management objects in orthogonal packing problems / V.A. Chekanin, A.V. Chekanin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 13. P. 8436–8446.
13. Berkey, O. Two-dimensional finite bin-packing algorithms / O. Berkey, P. Wang // Journal of the Operational Research Society. 1987. Vol. 38. No. 5. P. 423–429.
14. Martello, S. Exact solution of the two-dimensional finite bin packing problem / S. Martello, D. Vigo // Management Science. 1998. Vol. 44. P. 388–399.

V.A. Chekanin, A.V. Chekanin

RESEARCHING THE QUESTION OF INCREASING THE DENSITY OF ORTHOGONAL PLACEMENTS

Moscow State University of Technology «STANKIN»

Purpose: Solution the problem of increasing the density of placements for the rectangular cutting and orthogonal packing problems.

Approach: Six rules for selection the objects from a container for deleting of them and subsequent more rational placing them into the freed spaces of the container are proposed. The described rules select objects located as far from the origin of the container as well objects located near the local voids inside the container.

Findings: The results of the passed computational experiments carried out on the standard test problems of rectangular cutting problems are given. The sequence of application of the proposed rules in the implementation of the packing compaction algorithm is determined.

Value: The proposed rules provide increasing the density of packings up to 5 % and they can be used as the part of the heuristic packing compaction algorithm.

Key words: orthogonal packing problem, rectangular cutting problem, optimization, algorithm, compaction of packing, computational experiment.

УДК 681.3

Д.Е. Шапошников, А.С. Лаптев

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО МНОЖЕСТВА ВАРИАНТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА СЕТИ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики – Нижний Новгород»

Цель работы: Рассматривается проблема планирования развития сети передачи данных с учетом фактора времени и различных качественных субъективных предпочтений внутри шкалы времени.
Методология: Используется подход, при котором показатели эффективности в каждый момент времени рассматриваются как отдельные независимые частные критерии и производится учет индивидуальных предпочтений по шкале времени в соответствии с желаниями лица, принимающего решение. Для планирования развития сети передачи данных во времени используется потоковая модель и осуществляется автоматический расчет весовых коэффициентов по принципу гарантированного результата.
Результаты: Предложена и обоснована методика учета предпочтений между временными интервалами для планирования развития сети передачи данных.
Выводы: Методика позволяет осуществлять обоснованный выбор графика распределения финансовых ресурсов на основе индивидуальных предпочтений лица, принимающего решение.

Ключевые слова: сеть передачи данных, многокритериальное планирование, Парето-оптимальные решения.

Введение

Телекоммуникации, информационные технологии, цифровые медиа – сфера, подверженная во всем мире стремительным, непрерывным и кардинальным изменениям. Отрасль коммуникаций и новых технологий, проникая во все сферы повседневной деятельности человека, становится одной из самых значимых по степени влияния на нашу частную и рабочую жизнь, социальную сферу, экономику, имидж и статус страны в мировом сообществе.

Для выживания в столь быстро развивающейся отрасли каждая телекоммуникационная компания (провайдер) должна быстро и обдуманно принимать стратегически важные решения касающиеся развития сети передачи данных (СПД) как основного инструмента оказания услуг. Телекоммуникационные компании стараются эффективно спланировать и разработать стратегию по расширению/увеличению покрытия информационными сетями, увеличению количества и качества оборудования для предоставления абонентам высококачественных услуг.

На данном этапе большинство компаний сталкиваются с трудностями при прогнозировании и планировании развития сети на протяжении ближайших двух-трех лет. Наличие большого числа непредсказуемых факторов таких, как необходимый минимальный уровень качества предоставляемых услуг, выгода от инвестиций, вложенных в каждый планируемый проект, предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР) по каждому проекту, в каждый период и т.д., могут поставить под сомнение реализацию важных проектов и привести к большим издержкам.

Однако на настоящий момент в литературе подходы к решению данной проблемы встречаются нечасто. Существующие модели планирования по времени не адаптированы к рассматриваемой предметной области, соответственно они не учитывают особенности современных сетей передачи данных (СПД), такие как пропускная способность, производительность каналов и узлов и др.

Предметная область и постановка задачи

Международные исследования показывают, что существует взаимосвязь между развитием инфокоммуникационных технологий (ИКТ) и экономическим благополучием. Широкомасштабное развертывание технологий высокоскоростной связи и интернет-доступа является катализатором для развития ИКТ проектов, оказывает множественный мультипликативный эффект на другие отрасли национальной экономики, способствует ускорению и масштабированию технологического прогресса и в итоге обеспечивает рост ВВП как отдельных регионов, так и страны в целом.

Более того, математические модели планирования не рассматривают временные интервалы, как частные критерии, по которым максимизируется выгода от инвестиций в тот или иной проект.

Таким образом, на данный момент существуют определенные трудности при планировании развития телекоммуникационных сетей во времени. Следовательно, данный вопрос открыт и требует внимания со стороны исследователей и разработок в этой сфере.

В рассматриваемых задачах принятия решений часто возникает необходимость в рассмотрении альтернатив с точки зрения изменения их характеристик во времени. Особенность данных задач заключается в том, что важность характеристик принятого решения может быть неодинаковой в различные периоды времени. Данный аспект позволяет сформулировать задачу принятия эффективного решения в условиях планирования во времени, как многокритериальную задачу принятия решений. При этом необходимо учитывать субъективные качественные (нечисловые) предпочтения ЛПР на множестве меток на временной шкале.

Существующие математические модели планирования зачастую не рассматривают временные интервалы, как частные критерии, по которым максимизируется выгода от инвестиций в тот или иной проект. Для телекоммуникационных компаний временной показатель является не менее важным, т.к. руководство компаний регулярно составляет план по развитию сети на ближайшие два-три года, содержащий перечень проектов по модернизации сети и строительству новых каналов связи, и бюджет, необходимый для реализации запланированных проектов. Возникает необходимость в создании многокритериальной модели, адаптированной под выбранную предметную область и содержащей полные характеристики для решения задачи планирования сети передачи данных с учетом фактора времени.

Модель принятия решения при модификации сети передачи данных

Основными составляющими для модели выступают два типа исходных данных: план по развитию сети и граф сети.

План по развитию сети подразумевает собой распределение определенного ограниченного ресурса (инвестиций) между M проектамиво времени. Такое планирование предполагает разделение времени на дискретные периоды и ввод шкалы времени: $t \in \{1, \dots, T\}$.На практике такой период может быть равен кварталу, месяцу или году.

Вектор варьируемых параметров x в данной ситуации будет обозначать способ распределения средств между проектами в каждый момент времении может изменяться в пределах множества допустимых решений D. Полагаем, что каждый вариант принятого решения xв каждый момент времени характеризуется критерием качества $Q_t(x)$, который может принимать значения из интервала $[0,1]$.

Таким образом, каждое принятое решение $x \in D$ характеризуется набором значений критерия оптимальности в разные моменты времени: $\{Q_1(x), \dots, Q_T(x)\}$. В частности, в качестве оценки предоставляемых услуг может рассматриваться пропускная способность сети.

При решении задачи анализа эффективности вложенных ресурсов применяется потоковая модель сети передачи данных[3], предусматривающая представление в виде графа$G(V, E)$, где$V = (v_1, \dots, v_n)$ – множество вершин, задающие узлы коммутации;$E \subseteq (V \times V)$

– множество дуг, которые описывают каналы связи. Каждый узел (вершина v_i) и каждый канал (и соответствующая дуга в графе) имеют ограниченную пропускную способность.

Данная потоковая модель позволяет оценить пропускную способность СПД как основу оказания услуг и

Качество каждого варианта принятого решения $x \in D_x$зависит от изменения топологии сети и величинами параметров узлов и каналов сети, в частности, величинами пропускных способностей каналов. При этом требуется оценить различные варианты использования финансовых ресурсов, применив оценку качества каждого варианта выбранными критериями эффективности.

Могут быть рассмотрены два варианта критериев:

1. Максимальное увеличение пропускной способности и минимизация «мертвого» капитала (минимизировать упущенную прибыль).
2. Каждый временной интервал считаем частным критерием и максимизация выгоды от инвестиций.

Таком образом, требуется разработка методики учета фактора времени при планировании СПД.

Общая математическая модель задачи

Пустьx–вектор варьируемых параметров модели, который характеризуется множеством допустимых решений $D : x \in D$. Область допустимых решений может формулироваться различными способами, в частности, область D может являться дискретным множеством и задаваться как множество номеров$D = \{1, \dots, M\}$.

Пусть каждый из вариантов принятого решения x можно характеризовать некоторым векторным критерием качества $Q(x)$ и лучшим будет решение, которое обеспечивает минимальное значение критерия оптимальности:

$$x^* = \arg\min_{x \in D} Q(x). \quad (1)$$

Подходы к решению данной задачи описаны в [5].

Но задача усложняется за счет того, что варианты принятого решения имеют разные значения критерия оптимальности в отличающиеся моменты времени. Можно разделить время на отдельные дискретные моменты и ввести шкалу времени: $t \in \{1, \dots, T\}$. В связи с этим, каждое из принятых решений $x \in D$ можно характеризовать набором значений критерия оптимальности в различные моменты времени: $\{Q^1(x), \dots, Q^T(x)\}$. С учетом данного аспекта, задачу планирования во времени можно рассмотреть как задачу многокритериальной оптимизации:

$$Q^1(x) \to \min, \dots, Q^T(x) \to \min. \quad (2)$$

Наиболее распространенным методом решения задачи (2) является применение обобщенного критерия оптимальности с весовыми коэффициентами важности. К примеру, при использовании аддитивного обобщенного критерия оптимальности, задачу (2) можно преобразовать в задачу следующего вида:

$$x^* = \arg\min_{x \in D} \left\{ \sum_{t=1}^{T} w_t Q_t(x) \right\}. \quad (3)$$

Здесь весовые коэффициенты $w = (w_1, \dots, w_T)$ отражают относительную важность частных критериев и выбираются из области D_w:

$$w \in D_w = \left\{ w \in R^T \middle| w_t \geq w_0 \geq 0, t = 1, \dots, T; \sum_{t=1}^{T} w_t = 1 \right\}. \quad (4)$$

Набор весовых коэффициентов важности $w \in D_w$ является выбором ЛПР и характеризует его цели для конкретной ситуации.

В [5] описан подход, который позволяет автоматически вычислить весовые коэффициенты важности при наличии дополнительной качественной информации о предпочтениях ЛПР на множестве частных критериев. В ситуации, когда ЛПР сталкивается с трудностями при назначении точных значений весовых коэффициентов, то последние можно характеризовать как неконтролируемые факторы и, применив принцип «гарантированного результата», можно вычислить «наихудшее» значение весовых коэффициентов для каждой альтернативы:

$$w^* = \arg\max_{w \in D_w} \left\{ \sum_{t=1}^{T} w_t Q_t(x) \right\}. \quad (5)$$

В итоге, задача (3) принимает следующий вид:

$$x^* = \arg\min_{x \in D} \left\{ \max_{w \in D_w} \left\{ \sum_{t=1}^{T} w_t Q_t(x) \right\} \right\}. \quad (6)$$

В данном случае, процесс поиска оптимального решения предусматривает вычисление весовых коэффициентов важности для каждой точки области допустимых решений. Описанная методика допускает, что от ЛПР поступила дополнительная качественная информация, которая устанавливает для некоторых L пар частных критериев предпочтение i-ого критерия на j-м на всем множестве D допустимых решений: $Q_i \succcurlyeq Q_j$. В соответствии с аксиоматической теорией важности частных критериев, это влечет соотношение $w_i \geq w_j$.

Также ЛПР имеет возможность уточнить информацию о численной оценке взаимной предпочтительности частных критериев, используя параметр $\xi_l \geq 1$:

$$e_l = \{Q_i \succcurlyeq Q_j\} \Leftrightarrow \langle w_i \geq \xi_l w_j \rangle_{e_l}, l = 1, \dots, L. \quad (7)$$

Установленные соотношения уменьшают область допустимых значений весовых коэффициентов Dв задаче (6):

$$D_w = \left\{ w \in R^T \middle| w_t \geq w_0 \geq 0, t = 1, \dots, T; \sum_{t=1}^{T} w_t = 1; \langle w_i \geq \xi_l w_j \rangle_{e_l}, l = 1, \dots, L \right\}. \quad (8)$$

В работе[5] приводятся аналитические выражения для решения задачи (5), с использованием качественной дополнительной информации, предоставленной ЛПР(8). Разработанная модель может усложниться, если каждый из вариантов решения x в каждый момент времени t характеризуется несколькими критериями качества: $Q_t(x) = \left(Q_1^t(x), \dots, Q_N^t(x)\right), t = 1, \dots, T$.В таком случае, необходимо найти решение x^*, которое обеспечивает минимальное значение по всем $N * T$частным критериям оптимальности.

Решение данной задачи отличается от решения задачи с векторным критерием только способом определения качественной информации о предпочтениях на множестве частных критериев[5].

1. Одноуровневый метод с учетом бинарных предпочтений.

ЛПР определяет бинарные предпочтения на всем множестве частных критериев в следующем виде:

$$e_l = \{Q_i^{t_1} \succcurlyeq Q_j^{t_2}\}. \quad (9)$$

Следовательно, задача приобретает вид:

$$x^* = \arg\min_{x \in D} \left\{ \max_{w \in D_w} \left\{ \sum_{j=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} w_{jt} Q_j^t(x) \right\} \right\}, \quad (10)$$

где

$$D_w = \left\{ w \in R^{NT} \middle| \begin{array}{c} w_{jt} \geq w_0 \geq 0, \quad j = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T; \sum_{j=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} w_{jt} = 1; \\ \langle w_{j t_1} \geq \xi_l w_{j t_2} \rangle_{e_l}, l = 1, \dots, L \end{array} \right\} \quad (11)$$

Аналитический метод к решению данной задачи (11)-(12) описан в [5].

2. Двухуровневый метод решения задачи.

В этом случае ЛПР вводит независимую качественную информацию о своих предпочтениях отдельно на уровне времени и на уровне качественных показателей.

В этом случае ЛПР может указать различные типы качественной информации:

а) о предпочтениях на уровне показателей качества: $e_l^1 = \{Q_i \succcurlyeq Q_j\}, i,j \in \{1,\dots,N\}$;

б) о предпочтениях на уровне времени: $e_l^2 = \{Q^{t_1} \succcurlyeq Q^{t_2}\}, t_1, t_2 \in \{1,\dots,T\}$.

В дальнейшем задача решается аналогичнозадаче (6)-(8).

Выводы

Рассмотрена задача построения временного плана модификации сети передачи данных. План строится на основе распределения финансовых ресурсов в течение заданной шкалы времени. Разработанная методика предусматривает учет относительной предпочтительности различных моментов времени в смысле различной важности эффекта от инвестиций или управленческих решений в разные временные интервалы.

Методика основывается на объединении временных показателей эффективности в векторный критерий оптимальности и расчете весовых коэффициентов важности с использованием принципа гарантированного результата.

Такой подход имеет обоснование и применимость в практической деятельности операторов связи.

Библиографический список

1. Анализ состояния и перспектив развития российского рынка телекоммуникационных услуг в сегментах B2C, B2B и B2G [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.json.ru/ru/poleznye_materialy/free_market_watches/analytics/razvitie_otrasli_info kommunikacionnyh_tehnologij_ikt_v_rossii/ . – Загл. с экрана.
2. Аудитория пользователей интернета в России в 2017 году[Электронный ресурс] / Режим доступа: http://mediascope.net/press/news/744498/. – Загл. с экрана.
3. Костин А.А., Шапошников Д.Е. Иерархическая потоковая модель и задачи планирования и модификации структуры сети передачи данных // Системы управления и информационные технологии, 2(60), 2014. – С. 44-50.
4. Батищев Д.И. Принятие оптимальных решений в экономических исследованиях. Горький: ГГУ, 1982. - 108с.
5. Батищев, Д. И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д. И. Батищев, Д. Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
6. Интерактивные методы решения многокритериальных задач [Электронный ресурс] / Наука и образование, 2013.– Режим доступа: http://cyberleninka.ru/article/n/interaktivnye-metody-resheniya-zadachi-mnogokriterialnoy-optimizatsii-obzor.pdf. – Загл. с экрана.
7. Летнянчик А.А., Шапошников Д.Е. Задача принятия многокритериальных решений в условиях планирования во времени. НИ НГУ им. Н.И.Лобачевского. Нижний Новгород, 1999. 276с.
8. Шапошников Д. Е., Применение принципа гарантированного результата для учёта качественной информации о предпочтениях при комплексной оценке качества функционирования телекоммуникационных сетей // Ж. Инженерный вестник Дона, №4-1/31, 2014.
9. Шапошников Д.Е., Макарычева Л.А. Использование неполной качественной информации об относительной предпочтительности вариантов при планировании модификации телекоммуникационной сети / Информационные системы и технологии ИСТ-2016. Материалы XXII Международной научно-технической конференции (ISBN 978_5_9902087_7_3). – Нижний Новгород, 2016. – С. 381.

Dmitrii Shaposhnikov, Alexander Laptev

MODELS AND METHODS FOR EFFECTIVE SET GENERATION OF CONFIGURATION VARIANTS OF DATA TRANSMISSION NETWORK WITH THE USE OF THE TIME FACTOR

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
National Research University The Higher School of Economics –Nizhniy Novgorod

Objective: The problem of planning the development of a data transmission network taking into account the time factor and various qualitative subjective preferences within the time scale is considered.
Approach: An approach is used in which performance indicators at each point in time are treated as separate independent private criteria and individual preferences are taken into account on a time scale in accordance with the wishes of the decision-maker. To plan the development of a data network in time, a flow model is used and automatic calculation of the weight coefficients is performed on the principle of guaranteed result.
Findings: The methodology for taking into account preferences between time intervals for planning the development of the data transmission network was proposed and justified.
Value: The methodology allows to make an informed choice of the schedule of allocation of financial resources on the basis of individual preferences of the decision-maker.
Keywords: Data Transmission Network, Multicriteria Planning, Pareto-effective Solutions

УДК 681.3

Д.Е. Шапошников, А.В. Сальникова

БИКРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТРЕБНОСТЕЙ АБОНЕНТОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики – Нижний Новгород»

Цель работы: Рассматривается проблема планирования работы сети передачи данных с точки зрения обеспечения технического качества оказания услуг.
Методология: Использована потоковая модель телекоммуникационной сети, на её основе строится методика оценки технического качества оказания услуг (на примере скорости входящего потока передачи данных) и рассмотрена методика определения потребностей абонентов на основе использования концепции больших данных.
Результаты: Предложена и обоснована бикритериальная схема принятия решения– поиска оптимально-компромиссного решения при выборе вариантов функционирования сети передачи данных.
Выводы: Методика позволяет осуществлять обоснованный выбор режимов функционирования сети передачи данных на основе компромисса между качеством и затратами.

Ключевые слова: сеть передачи данных, многокритериальное планирование, Парето-оптимальные решения.

Введение

Актуальность темы и практических разработок в области планирования структуры и характеристик телекоммуникационных сетей определяется как современным состоянием науки и технологий (развитие систем передачи данных и повышение мощности канального и узлового оборудования), так и современным состоянием экономики и бизнеса телекоммуникаций (широкое распространениетехнологий связи и повышение требований абонентов к качеству услуг). Повышение скоростей передачи и надежности оборудования определяет применимость сетевых потоковых моделей для оценки и планирования развития сетей передачи данных[1, 2].Однако спецификой отрасли телекоммуникаций является необходимость учета интересов каждого абонента, что определяет особенности применения данного вида моделей и трудности в формировании итоговых оценок качества, общих для организационно-технической системы провайдера, которые, в свою очередь, определяют критерии принятия решений при модификации сети и при формировании режимов ее функционирования.Основной оптимально-компромиссной схемой принятия решений провайдером является бикритериальная модельпоиска рациональных решений, предусматривающая удовлетворение потребностей абонентов, с одной стороны, и объем трафика магистральных операторов, с другой стороны.

Потоковая модель сети передачи данных

В ряде публикаций было предложено и обосновано применение сетевых потовых моделей к анализу и планированию сетей передачи данных (СПД). Данный вид моделей, в применении к телекоммуникациям,позволяет учитывать некоторые особенности СПД регионального уровня, которые не учитываются в большинстве существующих моделей.

Телекоммуникационная сеть, в соответствии с Законом о связи [3],представляет собой иерархическуюорганизационную структуру, в которой объектом планирования и анализа со стороны провайдера является региональная сеть передачи данных. В региональной сетитрафик как ресурс перемещается от магистральных сетей к абонентам через операторов связи (рис. 1).

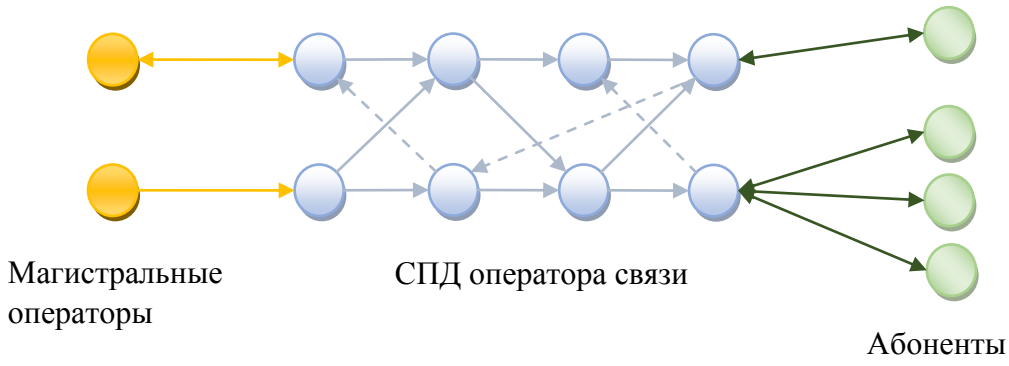


Рис. 1 Схема региональной сети передачи данных

В данной модели СПД представляется в виде графа $G(V,E)$, где $V=\{v_1,...,v_n\}$ – вершины (узлы коммутации); $E\subseteq(V\times V)$–дуги (каналы связи). Переменные – поток данных, идущий по каналам связи: $x(u,v)$ и $x(v,u)$ – поток входящих и исходящих данных между узлами u и v.

Каждый узел и канал имеет ограниченную пропускную способность. Для каждого абонентасети передачи данных известны его требуемые характеристики услуг: минимально возможная скорость передачи данных, котораяуказана в договоре, и желательный уровень скорости, определяемый индивидуально для каждого потребителя.Для полученияжелаемых характеристик СПДможно использовать методику определения потребностей абонента, основанную на анализе данных об использовании услуг и персональных данных потребителя, представленную ниже. Подробно данная модель описана в [4].

Математическая модель задачи

В связи с высоким уровнем конкуренции на рынке телекоммуникационных услуг, основная задачапровайдера–удовлетворение потребностей абонентов. В силу специфики отрасли, провайдеры связи стремятся повысить качество обслуживания каждого абонента с целью, как минимум, предотвратить его уход к конкуренту. Рассмотрим скорость потока данных у абонента как основной показатель качества оказания услуг абоненту.

Так как качество оказания услуг вообще и скорость потока как технический показатель качества в частности, являются в значительной степени субъективными, можно рассмотреть следующий подход для определения степени удовлетворенности абонента.

Каждый абонент определяет два показателя уровня качества (скорости): минимальный и желательный. Минимальный уровень соответствует договору об оказании услуг и определяет величину скорости, которая является критической с точки зрения абонента, то есть, недопустимой. Оптимальное значение скорости (оптимальный уровень) определяет скорость, по сравнению с которой большее значение абоненту уже безразлично (и считается превосходным и конкурентоспособным).

Под вектором x будем подразумевать набор оценок скорости потока, достигаемого у всех абонентов в данной конфигурации СПД. Область допустимых значений вектора x, обозначаемую через D_x, определяется потоковой моделью сети передачи данных и описана в [4].

Цель оператора связи (провайдера) заключается в наиболее полном удовлетворении потребностей всех абонентов одновременно и, следовательно, может быть выражена как

$$q_j(x) \to \max,\ j = 1,...,N. \quad (1)$$

Поскольку количество абонентов N достаточно велико, необходимо рассмотреть построение обобщенной функции (интегрального показателя) качества обслуживания абонентов.

Известно, что для построения такой интегральной характеристики, частные характеристики качества каждого абонента должны быть преобразованы в частные критерии, что означает приведение их к единому типу направления (минимизации или максимизации) и к безразмерному виду и фиксированному интервалу изменения [5, 6].

Для данного преобразования рассмотрим вариант критериальных функций, при котором оценки качества функционирования сети принимают следующие значения для случая направления максимизации предпочтений:

$q_j(x) = 0$, если j-й показатель не удовлетворяет минимальным требованиям абонента (определяемым договором или иным способом), и его значение является критически важным с точки зрения дальнейшего рассмотрения целесообразности данной конфигурации и/или варианта функционирования сети;

$q_j(x) = [1, 2]$, если j-й показатель выше по качеству минимально допустимых требований;

$q_j(x) = 2$ если j-й показатель качества выше оптимальных (желательных) требований абонента.

То есть, в данной модели принимается, что $q_j(x) = 2$ при $x \ge x'$, где x' является показателем, выше которого абонент не рассчитывает повышение услуги (например, связывая это с непомерно высокой для него ценой за данный уровень при отсутствии необходимости в данном уровне), или уровень услуги является достаточно высоким и дальнейшее ее повышение безразлично для абонента.

Таким образом, критериальную функцию оценки параметра j можно записать:

$$q_j(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0, \\ [1, 2] & x_0 \le x \le x', \\ 2 & x > x'. \end{cases} \quad (2)$$

Данный подход соответствует идеологии соглашения о минимальном уровне качества оказания услуг (ServiceLevelAgreement–SLA): если технический показатель не достигает порогового значения, то его значение в процессе принятия решения нулевое. Если технический показатель достигает порогового значения, то его вклад в итоговое решение становится ненулевым и растет до достижения желательного значения.

График функции удовлетворенности абонента качеством предоставления услуг можно представить на двумерном пространстве, где ось абсцисс представлена скоростью передачи данных, а ось ординат указывает на уровень удовлетворенности абонента. Если скорость передачи данных опускается ниже установленной в договоре, считаем, что абонент переходит к конкурентам. Также

есть определенный уровень скорости, превышение которой не имеет смысла, поскольку не несет дополнительной полезности потребителю – назовем такую скорость «желательной».

Интересны свойства таких критериальных функций с точки зрения анализа эффективностипринимаемых решений. Известно [6], что такие функции, в случае монотонного неубывания на интервале от минимального до желаемого (превосходного) уровня, являются одновременно квази-выпуклыми и квази-вогнутыми. Это определяет множество их полезных свойств, в частности в области свойств эффективных решений.

Для построения обобщенной интегральной характеристики качества обслуживания абонентов целесообразно воспользоваться принципом гарантированного результата [7] и рассмотреть функцию вида

$$F(x) = \max_{x \in D_x} \min_{1 \le j \le N} \{q_j(x)\}. \quad (3)$$

Данная функция характеризует возможности сети передачи данных по одновременному обеспечению трафиком всех абонентов при их максимальной потребности. Это определяет доход операторов связи. При рассмотрении решения данной оптимизационной задачи (являющейся по сути оценкой максимальных возможностей СПД) с использованием описанного обобщенного критерия, необходимо отметить, что размер компонент вектора потока x ограничен только возможностями сети и не учитывает вопросы бизнеса: трафик закупается у магистральных операторов, с экономической точки зрения является затратами и желательно его снизить.

Таким образом, может быть рассмотрена бикритериальная задача поиска оптимально компромиссного решения: (1) максимизация обобщённой интегральной характеристики качества обслуживания абонентов и (2) минимизация суммарного потока сети, определяемого как суммарный поток, проходящий через интерфейсы магистральных операторов.

Для решения данной бикритериальной задачи могут быть использованы различные схемы, в частности, построение области решений, оптимальных по Парето, применение схемы лексикографического упорядочения.

Методика определения желательных характеристик СПД

Важнейшей проблемой данной методики является определение значений желательного уровня качества абонентов. Для этого могут быть использованы различные методы.

В частности, компаниями связи могут быть проведены опросы абонентов с заданной периодичностью. Однако отвечать будет один человек из домохозяйства, его оценка будет субъективной и может не соответствовать реальным показателям. Более того, известно, что значительная часть оппонентов отклоняет предложение прохождения опросов ввиду недостатка времени или отсутствия заинтересованности.

Более предпочтительно использовать различные способы определения верхнего порога оценки качества с помощью анализа имеющихся данных о домохозяйствах с использованием различных подходов и инструментов больших данных (BigData). В частности, можно отследить динамику потребления трафика каждым абонентом; при автоматизации расчета и обработке данных в режиме реального времени, рекомендательная система сможет сообщать о необходимости перераспределения трафика и изменении топологии сети.

Большие данные в телекоммуникационной отрасли – данные, которые генерируются в процессе нормальной деятельности телекоммуникационной компании: данные об объемах и временных характеристиках потребленного трафика, их тарификации, данные о качестве оказанных

услуг. Все эти данные связаны (или могут быть связаны) с персональными данными о самом абоненте (юридическом или физическом лице).

Как известно, в силу особенностей функционирования, у телекоммуникационной компании имеются,или доступны для сбора, или могут быть оценены различными способами следующие данные:

1. Данные о трафике (месторасположение, потребляемый трафик, характер использования сети, количество подключенных устройств);
2. Данные, собранные из договора обслуживания (тариф, тип пользователя, персональные данные членов домохозяйства, зарегистрированные жалобы);
3. Данные, которые можно собирать анкетированием или по результатам маркетинговых кампаний (количество человек в домохозяйстве, пол, возраст, род деятельности, пребывание дома по времени).

На основе имеющихся данных об исходящем и входящем трафике за последний месяц по часам для буднего и выходного (праздничного) дня могут быть построены различные статистические оценки потребностей в услугах СПД у различных абонентов как в индивидуальном порядке, так и по типам и признакам. Для физических лиц (домохозяйств) выделяются пять критериев:род деятельности;возрастная категория;присутствие дома;наличие жалоб;сезонность.

Таким образом, построена методика принятия рациональных (оптимально-компромиссных) решений, позволяющих оператору связи найти соотношение между удовлетворением потребностей абонентов в техническом качестве обслуживания и затратами на приобретение трафика у магистральных операторов связи. Показано, что при этом основнойэкономическойпроблемой провайдеров является оценка параметров удовлетворенности абонентов уровнем качества оказания услуг. Данная оценка может быть осуществлена как экспертным образом (например, службами маркетинга оператора), так и анализом имеющейся у провайдера информации на основе концепции больших данных.

Выводы

Формирование оптимально-компромиссного решения по бикритериальной задаче с одновременной максимизацией уровня качества оказания услуг и минимизацией затрат на обеспечение качества всегда является сложной задачей, в частности в телекоммуникациях. В силу специфики услуг сети передачи данных целесообразно применить преобразование субъективной, зачастую, неколичественной оценки качества в частный критерий, пригодный для математического анализа.Данная функция преобразования имеет специфические свойства и позволяет использовать как субъективные оценки менеджмента компаний-операторов связи, так и объективные данные о потребностях абонентов на основе больших данных о фактах оказания услуг и индивидуальных предпочтениях.

Библиографический список

1.Лазарев Е. А., Мисевич П. В., Шапошников Д. Е. Бикритериальная модель сети передачи данных. // Системы управления и информационные технологии, 3.2 (45), 2011. - 4 с. (255-258)

2.Давыдов Э. Г. Исследование операций: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 383 с.

3.Федеральный закон № 126-ФЗ «О связи» от 07.07.2003. (действующая редакция от 21.07.2014).

4.Костин А.А., Шапошников Д.Е. Иерархическая потоковая модель и задачи планирования и модификации структуры сети передачи данных // Системы управления и информационные технологии, 2(60), 2014. – С. 44-50.

5.Батищев Д. И., Шапошников Д. Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Монография. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. - 92 с.

6.Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето–оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. – 256 с.

7.Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. – М. Наука, 1971.

8.Костин А. А., Шустров А. К. Телекоммуникационная услуга как объект управления. // Информатизация и связь, № 7, 2012. – С. 34-41.

Dmitrii Shaposhnikov, AlienaSalnikova

BICRITERIAL MODEL FOR CALCULATING THE RATIONAL VARIANT OF THE MODE OF THE DATA TRANSMISSION NETWORK OPERATION BASED ON THE ANALYSIS OF THE SUBSCRIBER'S NEEDS

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
National Research University The Higher School of Economics – Nizhniy Novgorod

Objective: The problem of planning the operation of the data transmission network from the point of view of ensuring the technical quality of the provision of services is considered.

Approach: The flow model of the telecommunications network is used.Based on it, a methodology is developed for assessing the technical quality of service delivery (for example, the speed of the incoming data stream), and a methodology for determining the subscriber's needs based on the concept of large data is considered.

Findings: A bicriterial decision-making scheme is proposed and justified - searching for the optimal-compromise solution when choosing the options for the operation of the data transmission network.

Value: The methodology allows to make a reasonable choice of modes of operation of the data transmission network based on a compromise between quality and costs.

Keywords: DataTransmissionNetwork,MulticriteriaPlanning, Pareto-effective Solutions

УДК 004

А.Л. Юмашева[1], И.А. Осадчая[1], К.А. Шаропин[2]

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРМОНАЛЬНОГО СТАТУСА С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММЫ ПАРЕТО

[1] ФГАОУ ВО НИ ТПУ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
[2]Московский гуманитарно-экономический университет (МГЭУ)

В данной статье изучается информативность показателей гормонов крови с помощью диаграммы Парето.
Объект исследования: Дети с ожирением I-III степени и избытком массы тела, предмет исследования – информативность показателей гормонального статуса.
Цель исследования: Выявление информативных показателей, из общего числа измеряемых показателей гормонального статуса.
Метод исследования. В данном исследовании использовалась диаграмма Парето. Выбор метода Парето обусловлен тем, что он позволяет оценить кумулятивный вклад каждого из показателей в общее состояние. Кроме того, преимущество диаграммы Парето заключается в его достоверности, доступности, наглядности, а также сохранении исходных показателей в неизменном виде. Благодаря неизменности исходных данных можно легко и просто интерпретировать получаемый результат.
Методика: В данной статье рассматривается процентильное и клиническое определение нормы.

Ключевые слова: информативность, диаграмма Парето, норма, ожирение, избыточная масса тела, гормональный статус.

Введение

Избыточная масса тела и ожирение – это глобальная проблема, с которой человечество столкнулось в 21-м веке. В частности проблема ожирения среди детей остро стоит перед общественным здравоохранением. Ожирение находится на первом месте среди заболеваний обмена веществ, что в итоге и обусловливает актуальность исследований в этом направлении [2, 3].

По данным, представленным Всемирной организацией здравоохранения к началу XXI века избыточную массу имело порядка 30% населения планеты. Избыточный вес и различные степени ожирения неизбежно ведут к различным проблемам, таким как диабет, сердечно-сосудистые заболевания, атеросклероз и т. д. Стоит отметить, что особую актуальность представляет ожирение у детей, так как оно с ранних лет приводит к изменениям во всех внутренних органах.

Исследование биологических показателей у здоровых детей и детей с ожирением поможет определить наиболее эффективных методов лечения и реабилитации.

Информативные показатели – это показатели, вносящие наибольший вклад в характеристику состояния. Определение информативных показателей у здоровых детей и детей с ожирением может сократить время и затраты на исследования [1, 5].

В настоящее время известно несколько различных методов решения подобных задач, используемых в медицине (метод Кульбака, Шеннона и диаграмма Парето).

Диаграмма Парето

Диаграмма Парето – это столбчатая диаграмма, на которой интервалы упорядочены по нисходящей линии [5]. Диаграмма Парето является графическим отображением правила Парето. Это правило показывает, что значительное число несоответствий возникает из-за ограниченного числа причин. Коротко правило Парето формулируется как 80 на 20. Диаграмма

Парето и правило Парето позволяют отделить важные факторы от малозначимых и несущественных.

Как уже упоминалось ранее, метод Парето основан на отклонении значений показателей больного пациента от значений показателей здорового. Соответственно необходимо определить нормы показателей.

Как известно, под нормой принято считать отсутствие патологии. В современной медицине существуют клинические, эпидемиологические, статистические (гауссово, процентильное) подходы к определению нормы.

Гауссово определение нормы требует проверки выборки на нормальность. При процентильном определении нормы берется общий диапазон выборки и устанавливаются верхние и нижние перцентили.

При процентильном определении нормы берется общий диапазон выборки и произвольно устанавливаются верхние и нижние процентили. Нормой в этом случае является интервал между установленными процентилями [5].

При использовании диаграммы Парето для выявления информативных показателей применяется так называемый ABC – анализ. Его цель – определение трех групп, имеющих три уровня важности:

группа A – это наиболее важные показатели. Относительный процент в общем количестве показателей обычно составляет от 60 до 80. Показатели данной группы имеют большой приоритет;

группа B – показатели, которые в сумме имеют не более 20;

группа C – самые многочисленные, но при этом наименее значимые показатели.

На основании полученных данных строится диаграмма Парето, где по основной вертикальной оси откладываются процентные доли, по вспомогательной вертикальной оси – накопленная процентная доля и по горизонтальной – названия всех показателей.

В работе использовались данные, предоставленные специалистами детского отделения ФГБУН «ТНИИКиФ ФМБА» [4].

Было проведено клиническое исследование детей с избытком массы тела и ожирением I-III степени в возрасте 10-15 лет. Также, была обследована группа детей аналогичной возрастной группы, которые составили контрольную группу [3].

В таблице 1 представлены список измеренных показателей гормонального статуса. Подробное описание данных показателей приведено в [1].

Таблица 1

Показатели гормонального статуса до и после лечения

Т3 (1,0-2,8) дл	**АТ ТПО (до 30 у.е.) дл**
Т3 (1,0-2,8) пл	**АТ ТПО (до 30 у.е.) пл**
Т3св(4-8.6) дл	**Инсулин дл**
Т3св(4-8.6) пл	**Инсулин пл**
Т4 (53-158) дл	**Кортизол дл**
Т4 (53-158) пл	**Кортизол пл**
Т4св (10-23.2) дл	**Лептин дл**
Т4св (10-23.2) пл	**Лептин пл**
ТТГ (0,23-3,4) дл	**серотонин дл**
ТТГ (0,23-3,4) пл	**серотонин пл**

Как видно из табл.1, практически для всех показателей указаны границы нормальных значений (кроме инсулина, кортизола, лептина и серотонина). Найдем процентильное определение нормы с помощью «ящика с усами» для тех показателей, для которых они не указаны специалистами (табл. 2).

Таблица 2

Процентильное определение нормы

Показатели	Median	Lower - Quartile	Upper - Quartile	Percentile - 10	Percentile - 90
Инсулин пл	**13,4**	**9,1**	**19,7**	**5,2**	**27**
Инсулин дл	**12,8**	**8,85**	**18,95**	**5,5**	**24,62**
Кортизол дл	**413,45**	**287,625**	**519,625**	**177,85**	**832,44**
Кортизол пл	**391,4**	**300,45**	**500,75**	**194,64**	**657,34**
Лептин дл	**22,7**	**13,3**	**42,4**	**7,64**	**69,6**
Лептин пл	**19,8**	**13,75**	**38,9**	**8,8**	**64,8**
Серотонин дл	**85**	**65**	**165,2**	**43,08**	**218**
Серотонин пл	**96**	**45,6**	**148,6**	**33,32**	**251,22**

Материалы клинического исследования были подвергнуты статистической обработке, которая осуществлялась с использованием программы «Microsoft Excel XP». Методы исследования включали определение нормальности распределения признаков с применением диаграммы Парето (рис. 1).

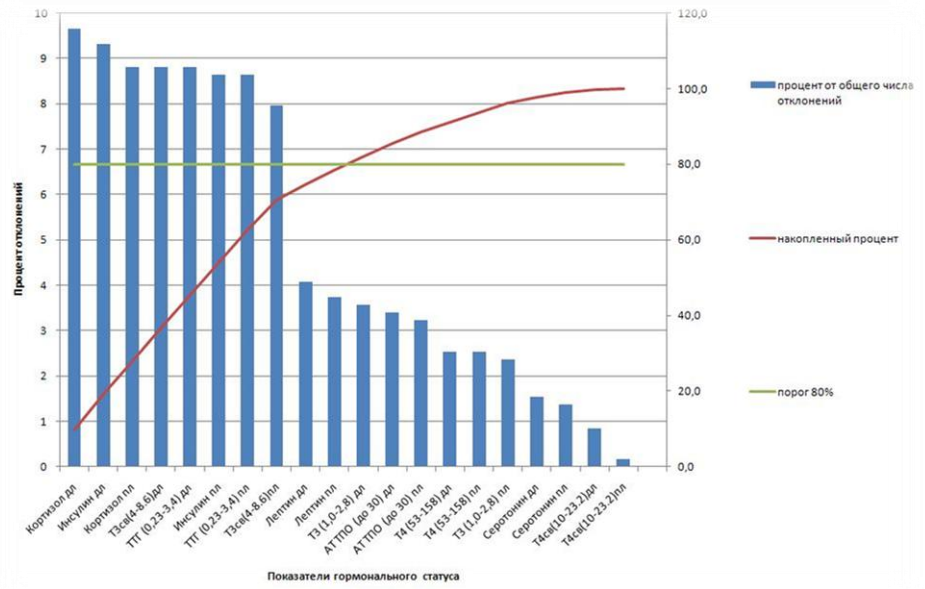


Рис. 1. Диаграмма Парето

По 80% кумулятивному вкладу определяются те параметры, которые являются информативными [5].

После анализа информативности 20 показателей было установлено, что наиболее информативными можно считать только 8 из них (кортизол до и после лечения, инсулин до и после лечения, Т3св до и после лечения и ТТГ до и после лечения), в то время как остальные имеют информативность ниже 80%.

Данный анализ намного облегчит работу специалиста и сократит длительность проведения анализов, что позволит оперативно контролировать состояние пациента во время лечения и корректировать назначенный курс лечения в зависимости от изменения его состояния.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-07-08922.

Библиографический список

1. Андреев С.Ю., Берестнева О.Г., Гергет О.М. Модели и информационные технологии в задачах лечебно-восстановительной медицины. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. –267 с.
2. Аверьянов Андрей Петрович. Ожирение у детей и подростков: клинико-метаболические особенности, лечение, прогноз и профилактика осложнений: диссертация ... доктора медицинских наук: 14.00.09 / Аверьянов Андрей Петрович; [Место защиты: ГОУВПО "Саратовский государственный медицинский университет"]. – Саратов, 2009. – 339 с.: ил.
3. Болотова, Н. В. Гормонально-метаболические нарушения у детей с ожирением и их коррекция / Н. В. Болотова, А. П. Аверьянов, С. В. Лазебникова и др. // Пробл. эндокринологии. – 2003. № 4. – С. 22-26.
4. Кондратьева Е.И. Санаторно-курортная реабилитация детей с ожирением. / Е.И. Кондратьева, Н.П. Степаненко, Г.А. Суханова, О.Б. Светлик и др. // Педиатрия. – 2010. – № 5. – С. 68-72.
5. Инструменты качества: гистограмма, диаграмма Парето. Выпуск 13, 1999. – М.: НТК «Трек», 2002. – 25 с.
6. Колесникова С.И. Методы анализа информативности разнотипных признаков. [Электронный ресурс]. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/metody-analiza-informativnosti-raznotipnyh-priznakov (дата обращения: 17.05.2017).

A.L. Yumasheva, I.A. Osadchaya, K.A. Sharopin

EVALUATION OF INFORMATIVE INDICATORS OF HORMONE STATUS WITH PARETO CHART IN THE GROUP OF CHILDREN WITH OBESITY I-III DEGREE AND EXCESS BODY WEIGHT

National Research Tomsk Polytechnic University,
Moscow University for the Humanities and Economics

This article related to the identification of the most significant indicators of hormone status to solve the problem of diagnosis of children's health. The investigation allows defining informative parameters estimated using the Pareto diagrams.

Currently, there are several different methods of solving similar problems (Kullback methods, Shannon and Pareto chart). In this study used Pareto chart. It allows estimating the cumulative contribution of each of the indicators in the general condition.

The object of the research is the group of children with obesity I-III degree and excess body weight, the subject – informativity of indicators hormone status.

In particular, informative indicators are presented in the article.

Keywords: informativity, Pareto diagrams, norm, obesity, excess body weight, hormone status.

УДК 681.518.3

Л.С. Ломакина, С.А. Зеленцов

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКИХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана модель диагностической экспертной системы для автоматизации и повышения точности процесса прогнозирования сложных систем, описываемых совокупностью многомерных статистических данных. Разработана продукционная база знаний, учитывающая вероятность консеквента нечеткого продукционного правила и его коэффициент достоверности. Описан алгоритм байесовского логического вывода на предложенной продукционной модели знаний, который учитывает субъективные оценки экспертов и условные вероятности, описывающие модель диагностируемого класса.

Ключевые слова: экспертная система; продукционные правила; диагностика; автоматизация; байесовские методы; база знаний; логический вывод; многомерные данные.

Введение

На протяжении своей истории человечество всегда стремилось к приобретению и накоплению знаний. Вследствие этого особым положением в обществе наделялись эксперты – лица, обладающие специальными знаниями в определенной области. С развитием компьютерных технологий и средств вычислительной техники активное распространение получили интеллектуальные методы анализа данных, среди которых особое место занимают экспертные системы, способные формализовать процесс принятия решения человеком. Под экспертными системами (ЭС) понимаются аппаратно-программные системы, выполняющие действия аналогичные тем, которые выполняет эксперт в некоторой предметной области, делая определенные заключения в ходе выдачи советов и консультаций.

ЭС способны решать значительное количество разнообразных задач, таких как интерпретация, прогнозирование, диагностика, проектирование, планирование, отладка, ремонт и др. Однако наибольший интерес в настоящее время вызывают диагностические ЭС, с помощью которых осуществляется мониторинг состояния объектов, и делаются выводы о нарушениях в их работе.

Изначально диагностические ЭС были ориентированы на «обычных» пользователей, которые на основании определенных данных (симптомов) пытаются узнать свое состояние (болен/здоров) и к какому специалисту следует обратиться. Однако в последнее время возникает потребность в создании диагностической ЭС, осуществляющей помощь специалисту в определении состояния объекта, что требует более сложного этапа проектирования ЭС и совершенствование информационного и алгоритмического базиса предметной области.

Целью настоящей работы является рассмотрение с единых позиций общих вопросов, связанных с подходами к моделированию и диагностированию многомерных объектов при решении разнообразных прикладных задач с использованием диагностической экспертной системы. Также важной особенностью работы является обсуждение возможностей и перспектив применения байесовских методов при анализе многомерных объектов.

Работа написана с позиций современных информационных технологий и содержит изложение различных аспектов методологии, технологии и реализации решения основных задач диагностирования многомерных объектов.

Модель представления знаний

Рассматриваемая в этой статье модель знаний экспертной системы предусматривает всестороннее описание проблемы как объекта исследования и представляет собой совокупность данных, которая может поставлять всю необходимую для решения проблемы информацию.

Обычно модель — это не только правильное и полное представление объекта, но и описание на уровне знаний об объекте, которыми располагает отдельный человек. Следовательно, модели одного исследуемого объекта различаются между собой в зависимости от уровня понимания его человеком и являются развивающимися конструкциями.

Условиями, которые делают возможным использование таких моделей, являются (1) наличие внутри машины модели объекта, к которой могут обращаться и с которой могут оперировать одновременно человек и компьютер; (2) наличие средств, обеспечивающих человеко-машинное взаимодействие; (3) наличие мощных управляющих механизмов, интегрирующих в единую, органически целостную систему модели, функции и человеко-машинный интерфейс. К этому же целесообразно отнести и (4) возможность добавления в случае необходимости вновь создаваемых функций выводов.

Рассмотрим различные формы человеко-машинного взаимодействия на рис. 1:

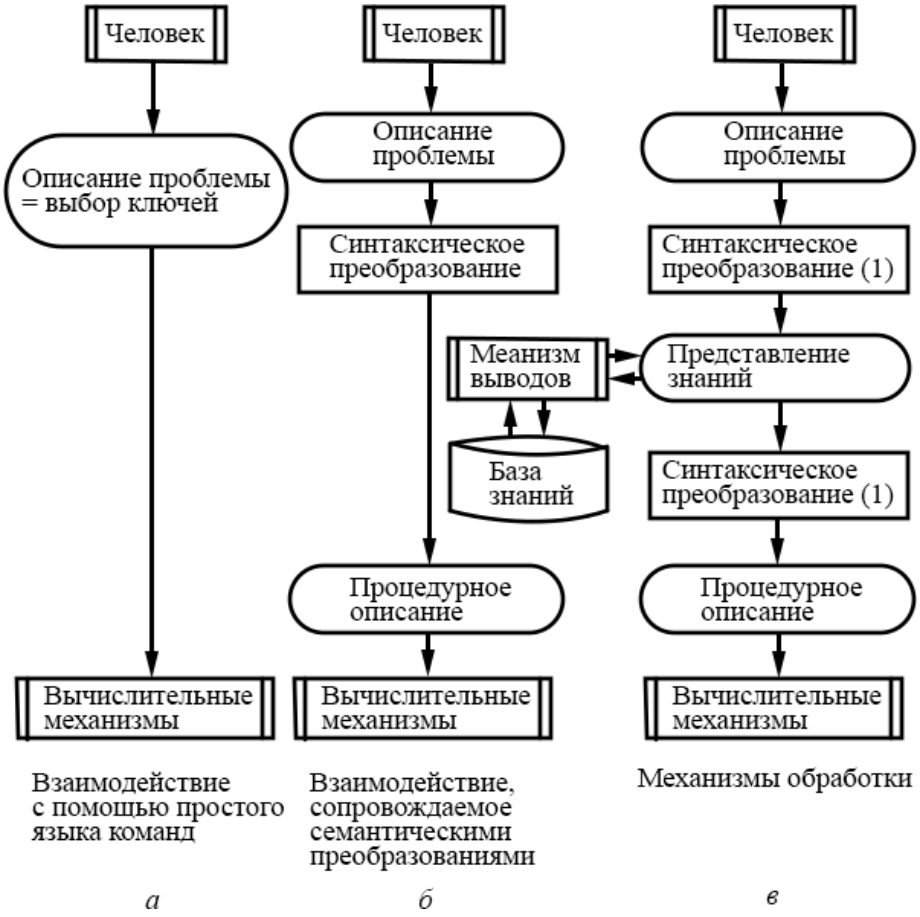


Рис. 1. Человеко-машинный интерфейс. а **— наиболее простой случай;** б **— простой случай;** в **— сложный случай.**

В наиболее простом случае функции человека в обмене данными с машиной сводятся к операциям выбора одного из нескольких предложенных вариантов (рис. 1, *а*). В несколько более развитой форме человек использует простой язык команд. Язык, который человек применяет для связи с машиной, будем называть «внешним языком». Язык команд является самой простой формой внешнего языка. Каждая команда в таком языке непосредственно транслируется в программу компьютера, которая затем исполняется. Внешний язык с более сложной структурой и высокой гибкостью имеет и более широкие описательные возможности. Идеальным вариантом внешнего языка является естественный язык и графика,

предоставляющие возможности декларативного описания. Одним из необходимых факторов с позиции достижения гибкости является допустимость различных представлений, обладающих одинаковым смысловым содержанием. Все эти синонимичные представления должны в конечном итоге преобразовываться в одну и ту же программу. Следовательно, здесь уже недостаточно метода преобразования входного текста непосредственно в программу, основанного только на синтаксических преобразованиях, как на рис. 1, *б*. В процессе этого преобразования необходим еще один механизм трансляции, который преобразовывал бы входной текст в другое эквивалентное ему представление, сохраняя при этом смысл входного текста. В такой системе трансляции можно использовать базу знаний и механизм выводов, как показано на рис. 1, *в*.

Знания, состоящие только из логических связей между фактами и не содержащие элемента сомнения, называются безусловными. Безусловное знание может быть представлено в виде «если – то» правил. В простейшем случае такие правила имеют вид:

ЕСЛИ *Антецедент* ТО *Консеквент*

где антецедент представляет собой совокупность фактов, а консеквент является новым фактом, который может быть логически выведен из исходных данных. По аналогии с базой данных, набор таких правил называют базой знаний [1].

Применим к произвольному правилу следующие обозначения для событий (соответственно для признака и гипотезы).

E = «Антецедент истинен»

H = «Консеквент истинен»

Тогда коэффициент достоверности правила определяется как

$$CF \cong \begin{cases} \dfrac{p(H \mid E) - p(H)}{1 - p(H)}, p(H) \le p(H \mid E) \\ \dfrac{p(H \mid E) - p(H)}{p(H)}, p(H) > p(H \mid E) \end{cases} \quad (1)$$

Если знание носит вероятностный характер, то степень достоверности в правиле может быть выражена через параметр, ассоциированный с правилом. Антецедент правила в таком случае представляет собой набор условий, каждое из которых является логическим выражением. Консеквентом правила является список новых фактов, которые могут быть получены из исходных данных, и каждому правилу поставлен в соответствие численный коэффициент достоверности, который может принимать значения от 0 до 1.

Байесовский логический вывод

В используемой модели логического вывода экспертной системы степень достоверности каждого из фактов базы знаний оценивается вероятностью, которая принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Вероятности исходных фактов определяются методом статистических испытаний или устанавливаются экспертом.

База знаний хранит в качестве правил преобразования между синонимичными представлениями правила трансляции, действующие в диапазоне описательных возможностей представления знаний, а механизм дедуктивных выводов выполняет семантическую трансляцию, используя все эти правила. Если при наличии такого механизма в базе знаний будут заданы не только правила интерпретации отдельных слов, но и более сложные знания, например экспертные знания для медицинской диагностики, то можно утверждать, что такая система функционирует как экспертная, т. е. вариант на рис. 1, *в* — не что иное, как система обработки знаний. На рис. 1, *в* каждый прямоугольник соответствует определенной функции обработки, а овалы описывают представления, появляющиеся в процессе трансляции.

Для рассуждений в условиях неопределенности в данной модели логического вывода используется теорема Байеса. Рассмотрим стратегию применения обратного логического

вывода. Правила, которые имеют отношение к текущей цели (определению величины конкретной переменной) извлекаются и оцениваются. Каждый антецедент, для которого не определен коэффициент достоверности приводит к созданию новой подцели, и этот процесс продолжается рекурсивно.

В общем случае, достоверно неизвестно, произошло событие E или нет, это происходит либо потому что E поддается наблюдению, но вызывает сомнения у пользователя, либо потому что E не поддается наблюдению, и выводится через другие правила. В любом случае, вероятность, что событие E произошло, зависит от события U, представляющего собой все подтверждающие свидетельства в пользу E, которые имеются у пользователя. Таким образом, вероятность $p(E|U)$ известна, и остается вычислить только $p(H|U)$:

$$p(H \mid U) = p(H, E \mid U) + p(H, \overline{E} \mid U) =$$

$$= p(H \mid E, U)\, p(E \mid U) + p(H \mid \overline{E}, U)\, p(\overline{E} \mid U)$$

Если предположить, что событие E включает в себя все подтверждающие свидетельства в пользу H, тогда:

$$p(H \mid U) = p(H \mid \overline{E}) + p(E \mid U)\left(p(H \mid E) - p(H \mid \overline{E})\right)$$

Это выражение показывает, что $p(H|U)$ может быть вычислено как линейная интерполяция между значением, которое $p(H|U)$ принимает при не наступлении события E, и значением, которое эта величина принимает при наступлении события E.

Если несколько правил k имеют один и тот же консеквент, то их подтверждающие свидетельства должны быть объединены [2].

Экспериментальная часть

Разработанная экспертная система прошла тестирование в Нижегородском научно-исследовательским институте эпидемиологии и микробиологии имени И. Н. Блохиной. Результаты тестирования приведены на рис. 2. Для оценки эффективности различных методик была использована оценка по характеристике F-меры, которая представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремится к нулю:

$$F = 2\frac{Точность \times Полнота}{Точность + Полнота}$$

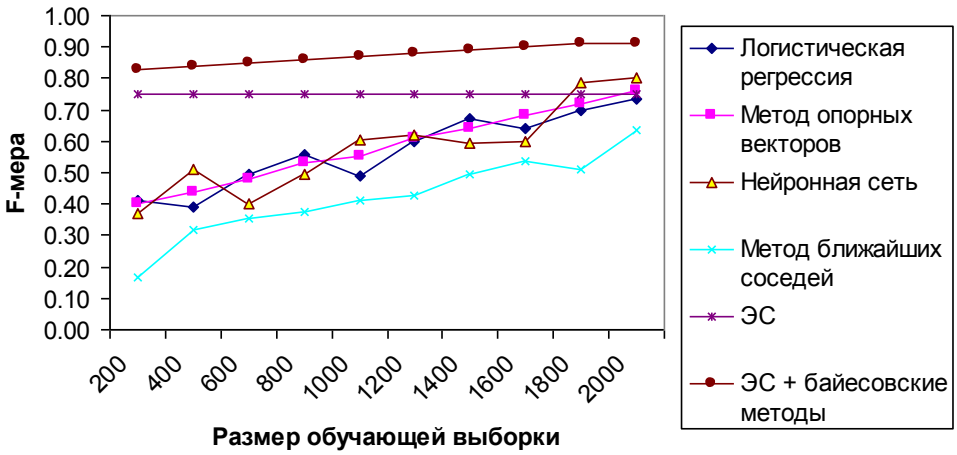


Рис. 2. Диаграмма зависимости F-меры от размера обучающей выборки для систем машинного обучения, использующих различные подходы.

Точность и полнота являются метриками которые используются при оценке большей части алгоритмов извлечения информации.

По полученным результатам можно сделать вывод, что разработанная система отличается значительным числом положительных результатов при фактическом наличии заболевания и может принять здорового человека за больного с большей вероятностью, чем здорового за больного, однако позволяет минимизировать риск пропустить заболевание. Результаты вычислительных экспериментов показали, что предложенная диагностическая экспертная система может эффективно применяться для определения состояний биоценозов.

Выводы

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в настоящей работе был проведен анализ существующих методов диагностирования многомерных объектов, выявлены их достоинства, недостатки и область применимости.

С позиции применимости для диагностирования многомерных объектов исследовалась суть обработки знаний, выделялись ее проблемы и обсуждались методы их решения. Важная роль при этом отводилась ориентации на такое использование информационных технологий, при котором компьютер принимал на себя определенную часть работ, традиционно выполняемых человеком. Следует обратить внимание на множество проблем, не вошедших в данную работу и требующих создания новых технологий и технических средств для их решения. Сюда относятся, например, проблема множественных описываемых проблемных областей, только схематично очерченная в работе, новые системы с многослойными представлениями, концептуальные структуры, лежащие в основе этих систем, и их системы управления, интеграция базы данных и базы знаний, человеко-машинный интерфейс. Необходимы методы построения систем на единых концепциях, причем с позиции обработки знаний все присущие этим системам функции, такие, как использование знаний, их передача, приобретение, должны быть связаны едиными механизмами.

Библиографический список

1. Джарратано, Д. Экспертные системы. Принципы разработки и программирование / Д. Джарратано, Г. Райли. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1152 с.
2. Джексон, П. Введение в экспертные системы / П. Джексон.– М.: Вильямс, 2001.–624 с.

L.S. Lomakina, S.A. Zelentsov

DIAGNOSTIC EXPERT SYSTEM BASED ON BAYES METHODS OF FUZZY PRODUCTIONAL RULES SYNTHESIS

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

The model of diagnostic expert system for automation and increase of accuracy of process of prediction for complex systems, described by a set of multidimensional statistical data is developed. A productional Knowledge base was developed, taking into account the probability of konsekventa fuzzy dew rule and its reliability coefficient. The algorithm of Bayesian of logical conclusion on the proposed production model of knowledge which takes into account subjective estimations of experts and conditional probabilities describing model of diagnosed class is described.

Key words: expert system; production rules; diagnostics; automation; bayesian methods; knowledge base; inference; multidimensional data.

УДК 004.724.2+004.272.43

О.И. Виноградов, Л.С. Ломакина, Н.В. Сильянов

АЛГОРИТМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ГРАФ-МОДЕЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В данной работе рассматриваются алгоритмы построения отказоустойчивой многопроцессорной системы со структурой расширенного обобщенного гиперкуба, которая позволяет построить отказоустойчивую к блокировкам пакетов в сети и масштабируемую многопроцессорную систему.

Ключевые слова: отказоустойчивость, блокировки, полный граф, квазиполный граф.

Введение

В настоящее время одним из самых актуальных вопросов при построении многопроцессорных систем является вопрос эффективного использования необходимого количества портов, используемых для коммуникаций между узлами.

Один из самых актуальных видов отказов являются блокировки пакетов данных между узлами. Это приводит к простоям процессоров в многопроцессорных сетях, что негативно сказывается на времени выполнения задачи и повышению затрат на обслуживание такой системы, поэтому данная проблема должна быть рассмотрена и решена еще на стадии проектирования данной системы.

В данной работе рассматриваются алгоритмы построения отказоустойчивой многопроцессорной системы со структурой расширенного обобщенного гиперкуба. Преимущество этого метода заключается в использовании «квазиполных» графов, которые позволяют построить отказоустойчивую и масштабируемую архитектуру, сохранив при этом маршрутные свойства.

Основные понятия

Базовым понятием в данной работе является сеть Клоза.

Сеть Клоза – вид многокаскадной неблокирующей коммутационной сети. Это означает, что в данной сети любой входной порт может быть подключен к любому свободному выходу без влияния на уже существующие соединения. Пример сети Клоза, можно увидеть на рис. 1.

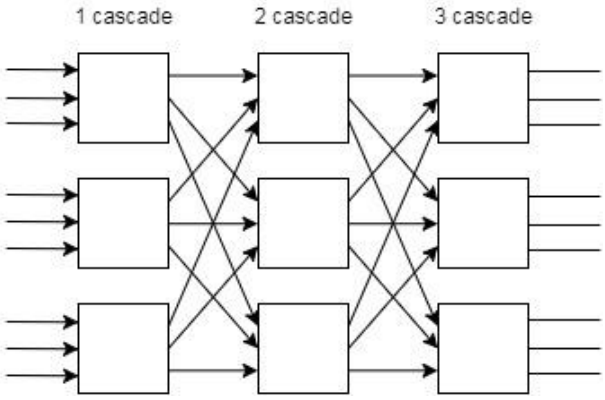


Рис.1 Сеть Клоза

Сеть Клоза имеет три каскада: входной, промежуточный и выходной. Каждый каскад состоит из перекрестных коммутаторов, носящих название «кроссбар». Каждый сигнал попадает на входной «кроссбар», после чего направляется в любой «кроссбар» промежуточного каскада,

который имеет свободную линию связи с входных и выходными «кроссбарами», после чегонаправляется на «кроссбар» выходного яруса. [1]

Моделью межсоединений в сети Клоза является полный однородный двудольный граф. Однородный двудольный граф $D(X, Y, m, r)$ – граф состоящий из двух непустых множеств вершин с одинаковой степенью, гдеX–множество «кроссбаров» первого и третьего каскадов, Y – множество «кроссбаров» второго каскада, а mи r–степень вершин Xи Y соответственно.Стоит отметить, что в данной работе рассматривается случай, когда в каждой из долей имеется одинаковое количество вершин ($X = Y = m = r$)–такие графы называют симметричными.[2] Однако, главным минусом полного графа является большое количество связей. Это можно увидеть на рис. 2а.

Поэтому возникает вопрос уменьшения количество связей между узлами. И его можно решить при помощи квазиполных графов. Однородный двудольный граф называется «минимально квазиполным», если каждый элемент множества Xсвязан со всеми остальными элементами своего множества единственным путем длины 2, который проходит через один из элементов множества Y.[2] Пример такого графа можно увидеть на рис. 2б.

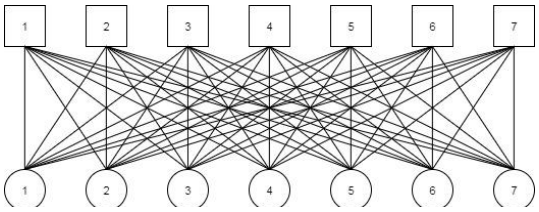


Рис. 2а Полный однородный двудольный граф с параметрами $X = Y = m = r = 7$.

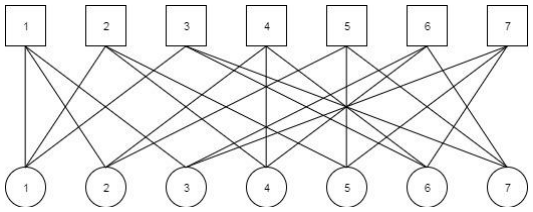


Рис. 2б Минимально квазиполный однородный двудольный графс параметрами $X = Y = 7,\ m = r = 3$.

Как видно из рисунков выше,минимальноквазиполный граф имеет намного меньше ребер.Количество вершин равно $N = X = Y = \frac{m(m-1)}{\sigma} + 1$,где $\sigma < m$ и задает число путей длины 2 между двумя различными узлами. В данном случае $\sigma = 1$.

Описанные выше структуры используются при построении связей в обобщенном гиперкубе.

Обобщенный гиперкуб представляет собой d-мерный s-ичныйгиперкуб, который имеет $V = s^d$узлов степени $d(s-1)$, размещенных в строках или столбцах по sузлов, задающих геометрические ребраd-мерного простого куба. Узлы данного обобщенного расширенного гиперкуба по столбцам и строкам будут иметь топологию полного однородного двудольного графа. Пример обобщенного гиперкуба можно увидеть на рис. 3.

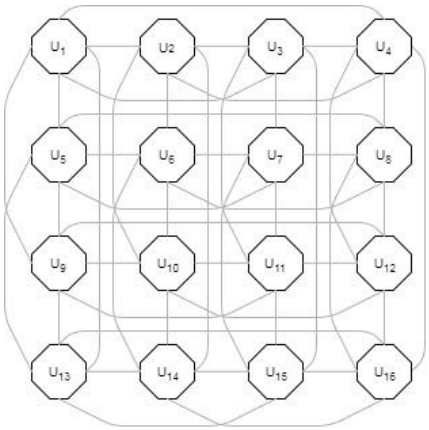


Рис. 3 Обобщенный гиперкуб с параметрами $V = 16, d = 2, s = 4$.

Для реализации системной сети с топологией обобщенного гиперкуба каждый из узлов должен иметь следующую схемную реализацию: узел U_iсодержит процессорный узел A_i,«коммутатор измерений» $g \times g$, где $g = d + \pi$и dкоммутаторов каналов $1 \times m$, где $m = s - 1$для реализации ребер полного графа в каждой строке или столбце.[3] Пример такого узла можно увидеть на рис. 4.

Как отмечалось ранее, полный граф имеет слишком большое количество связей и для решения этой проблемы необходимо перейти на структуру квазиполного графа.

Расширенный обобщенный гиперкуб является «модификацией» обобщенного гиперкуба. Для получения расширенного обобщенного гиперкуба необходимо заменить топологию связей с полного однородного двудольного графа на топологию «простейшей сети», которая в свою очередь имеет структуруквазиполного однородного двудольного графа.

«Простейшая сеть» имеет набор параметров (N, m, σ), где N- число элементов и блоков, m– число блоков, в которые входит каждый элемент и число элементов, входящих в каждый блок, а σ–задает число блоков, в которые входит каждая пара элементов.

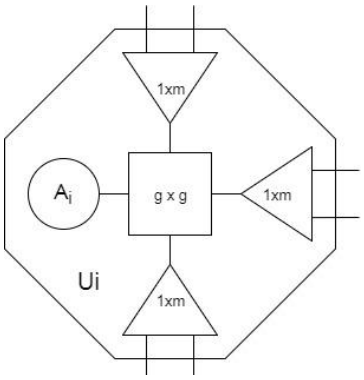


Рис. 4 Общая схемная реализация узла обобщенного гиперкуба.

Алгоритм построения системы в общем виде

В общем виде алгоритм построения будет иметь следующий вид:

1. ***Построение обобщенного гиперкуба.***

На данном этапе строится базовая модель обобщенного гиперкуба. Результат выполнения этого этапа можно увидеть на рис.3.

2. ***«Разработка» простейших сетей.***

На данном этапе происходит разработка минимально квазиполных графов и проходит она в два этапа.

2.1 Проверка возможности существованияминимальногоквазиполного графа.

На данном этапе решается вопрос существования минимальных квазиполных графов.Доказать существование минимального квазиполного графа можно при помощи теоремы Брука, Райзера и Човла о существовании симметричных блок-схем.

Теорема Брука, Райзера и Човла[4]: Если существует симметричная блок-схема с параметрами N, m, σ, то, полагая $\eta = m - \sigma$, получаем.

1) если N четно, тоη есть квадратцелого числа;

2) если N нечетно, то уравнение $z^2 = \eta x^2 + (-1)^{\frac{N-1}{2}} \sigma y^2$ имеет решение в целых числах x, y, z, не равных одновременно нулю.

В работе [5] была выведено уравнение, связывающая параметры nи s.Она имеет следующий вид: $n = s(s-1)/\sigma + 1$.

Также, в работе [6] приведены возможные параметры длясимметричых блок-схем. Они представлены в табл. 1, табл. 2.

Таблица 1

Параметры N иm при $\sigma = 1$.

$B(N,m,1)$						
m	2	3	4	5	6	8
N	3	7	13	21	31	57

Таблица 2

Параметры N иm при $\sigma = 2$.

$B(N,m,2)$						
m	2	3	4	5	6	9
N	2	4	7	11	16	37

2.2 Построение минимального квазиполного графа.

На данном этапе выполняется построение минимального квазиполного графа. Имеется несколько методов построения. Эти методы представлены в работе [2]. На рис. 5 изображены результаты выполнения этого этапа.

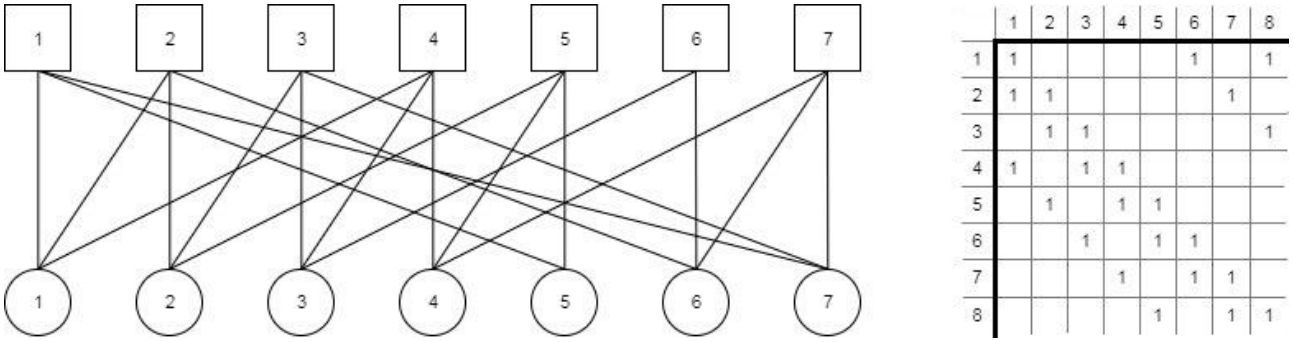


Рис. 5 Вариант с параметрами $N = 7, m = 3$, $\sigma = 1$.

В качестве примера выбранасимметричная блок-схема с параметрами и $N = 7, m = 3,\ \sigma = 1$.В результате были получены следующие данные:

1) Минимальный квазиполный граф, построенный по имеющейся матрице. Квадратами на данном рисунке будут коммутаторы размерностью $m \times x$,а кругами узлы U_i.

2) Матрица, описывающая связи между коммутаторами (строки) и узлами (столбцы) (1-существование ребра).

Получившиеся симметричные блок-схемы можно использовать для описания простейших сетей, которые являются неблокируемой самомаршрутизируемой сетью. Это означает, что перестановка пакетов данных межу абонентами может осуществляться в нем бесконфликтно по прямым (без промежуточной буферизации пакетов), причем каждый абонент, прокладывает свой канал самостоятельно[2].

В свою очередь, простейшие сети используются для построения расширенного обобщенного гиперкуба.

3. Построение расширенного обобщенного гиперкуба.

На рис. 3 представлен обобщенный гиперкуб с параметрами $\mathrm{V} = 16, \mathrm{d} = 2, \mathrm{s} = 4$. Для построения расширенного обобщенного гиперкуба заменим топологию полного графа на получившиеся на прошлом этапе простейшие сети. Поскольку число узлов в простейшей сети превосходит число имеющихся узлов, поэтому увеличим число узлов с 4 до 7, тем самым «расширив» обобщенный гиперкуб с sдо N.

В результате получается расширенный обобщенный гиперкуб, в котором узлы всех строк и столбцов связаны в σпрямыми каналами. Результат изображен на рис. 6.

Для формирования отказоустойчивой конфигурации простейшая сеть может быть заменена на 1-расширенную простейшую сеть. В такой сети малая часть узлов одной доли связаны $\sigma + 1$путями длины 2, а остальные – σ путями длины 2. Получившиеся дополнительные независимые пути позволяют формировать $(\sigma - 1)$-отказоустойчивость по каналам и коммутаторам $m \times m$ каждой простейшей сети. Следует заметить, что при $\sigma = 1$, связи не обеспечивают отказоустойчивость по связным узлам.

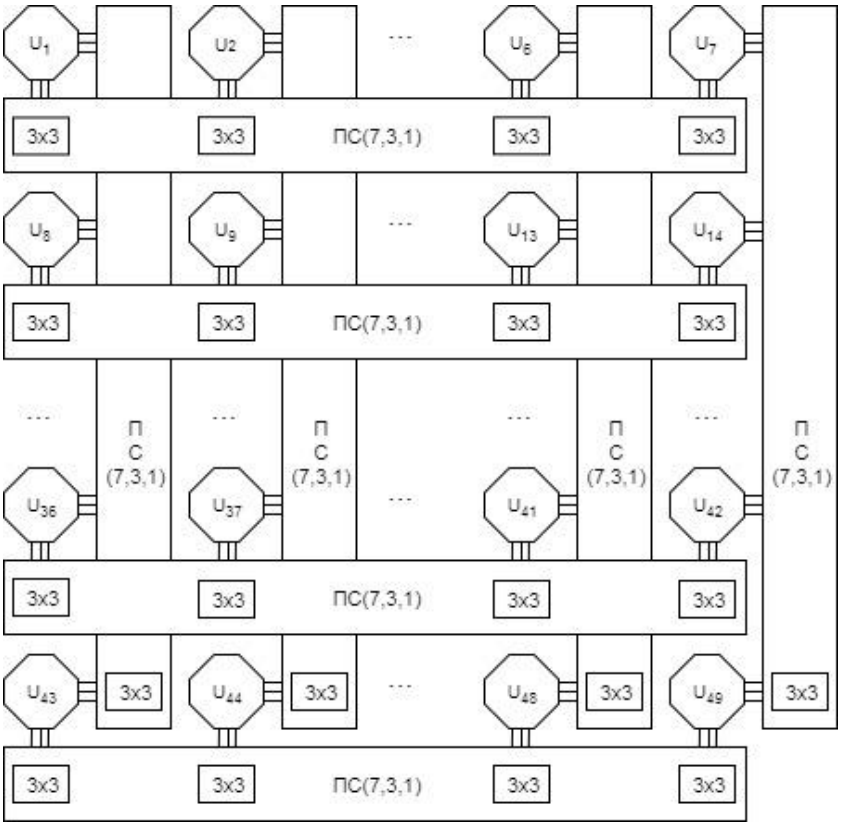


Рис. 6 Расширенный обобщенный гиперкуб с параметрами $V = 49, d = 2, s = 7$, узлы которого связаны (по столбцам и строкам) простейшими сетями с параметрами $N = 7, m = 3, \sigma = 1$.

Также для обеспечения отказоустойчивости можно использовать избыточность расширенного обобщенного гиперкуба. Для этого необходимо разбить узлы каждой строки на пары четный-нечетный. Каждая такая пара должна входить в состав строки каждого измерения. Это приведет к уменьшению числа строк всех измерений, кроме первого, в 2 раза, но обеспечит два варианта перехода между строками разных измерений. [3]

Аналогичным образом можно строить и μ-отказоустойчивые расширенные обобщенные гиперкубы. Для этого строки должны разбиваться на группы по $(\mu + 1)$узлов. Однако, в это случае будет уменьшаться пропускная способность между измерениями.

Заключение

Данная работа описывает построение расширенного обобщенного гиперкуба. Эта модель позволяет проектировать системы с увеличивающимся количеством узлов и число независимых каналов между любыми парами узлов, при сохранении числа портов. Это позволяет обеспечивать маштабируемость и решить проблему блокировок пакетов данных сети.

Библиографический список

1. А. Н. Назаров, И. А. Разживин, М. В. Симонов. АТМ: Технические решения создания сетей. - Справочное издание. Горячая Линия - Телеком, 2001 С. 376.
2. М. Ф. Каравай, П. П. Пархоменко, В. С. Подлазов. Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем), Автомат. и телемех., 2009, выпуск 2, 153-170.
3. М. Ф. Каравай, В. С. Подлазов. Расширенный обобщенный гиперкуб как отказоустойчивая системная сеть для многопроцессорных систем, УБС, 2013, выпуск 45, 344-371
4. Холл М. *Комбинаторика*. М.: Мир, 1970
5. В. С. Подлазов, В. В. Соколов. Обобщенные сети Клоза. Автомат. и телемех., 2009, выпуск 10, 158-171
6. М. Ф. Каравай, В. С. Подлазов.Топологические резервы суперкомпьютерного интерконнекта. УБС., 2013,выпуск 41, 395-423.

Vinogradov O.I., LomakinaL. S., Sil'yanovN. V.

ALGORITHMS FOR ENSURING THE FAULT TOLERANCE OF COMPUTING SYSTEMS ON GRAPH-MODELS"

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

In this paper, we consider algorithms for constructing a fail-safe multiprocessor system with an extended generalized hypercube structure that allows building fault-tolerant packet locks on the network and a scalable multiprocessor system.

Keywords: fault tolerance, locks, full graph, quasicomplete graph.

УДК 004.9

В.В. Андреев[1], Ю.С. Тарасова[2], Е.А. Мартемьянова[2]

РАЗВИТИЕ КВАЗИПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЦВЕТОВОЙ МОДЕЛИ КАК СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОФОРИЕНТАЦИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[1],
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет[2]

В данной статье рассматривается проблема осуществления профориентационной диагностики. Предлагается ее решение с помощью методики профориентационного тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» (квазипространственная модель), для которой описывается процедура тестирования, оцениваются ее достоинства и недостатки в сравнении с аналогами, рассматриваются перспективы ее внедрения и развития путем привлечения больших данных (BigData).

Ключевые слова: профориентация, методика, модель,квазипространство, алгоритмы, индивидуальный стиль деятельности, большие данные.

Профориентационная деятельность сегодня осуществляется путем применения различных методик, направленных на выявление и оценку тех или иныхкритериев и характеристик испытуемого. Критериями могут служить особенности личности человека (темперамент, воля, самодисциплина, ответственность и т. д.), предрасположенность индивида к конкретному роду деятельности (методика Голланда), интересы и склонности.

Как правило, каждый тест оценивает либо конкретную черту, сторону или особенность личности («Какова ваша воля?», «Каков ваш темперамент?»), либо склонность и предрасположенность человека к конкретному роду деятельности («Вы «гуманитарий» или «технарь»?», «Какая профессия вам подойдет?»).

Так, с помощью одного теста, индивиду зачастую не удается определиться с выбором профессии, а также оценить свои сильные и слабые стороны в соотнесение с выбранным родом деятельности. Работодатель, в свою очередь, может не располагать достаточным временным ресурсом и средствами диагностики для тестирования соискателя.

Комплексное тестирование индивида занимает продолжительное время, приводит к психологическому утомлению реципиента, содержит противоречия в результатах, полученных путем проведения ряда не взаимосвязанных тестов. Дальнейшая интерпретация результатов тестирования потребует дополнительного количества времени, выдаетнеясный результат, который,в свою очередь, может оказаться далеким от действительности и отражать субъективное мнение оценивающего. Более того, интерпретация результатов тестирования может оказаться неосуществимой ввиду отсутствия корреляции среди полученных данных.

В данной статье приводится описание инструмента осуществления профориентационной диагностики, включающего квазипространственную модель, методику«Ассоциативное цветовое пространство»©и алгоритмы тестирования.Представлено также описание его преимуществ и перспектив развития путем расширения системы информационных ресурсов и привлечения больших данных (BigData).

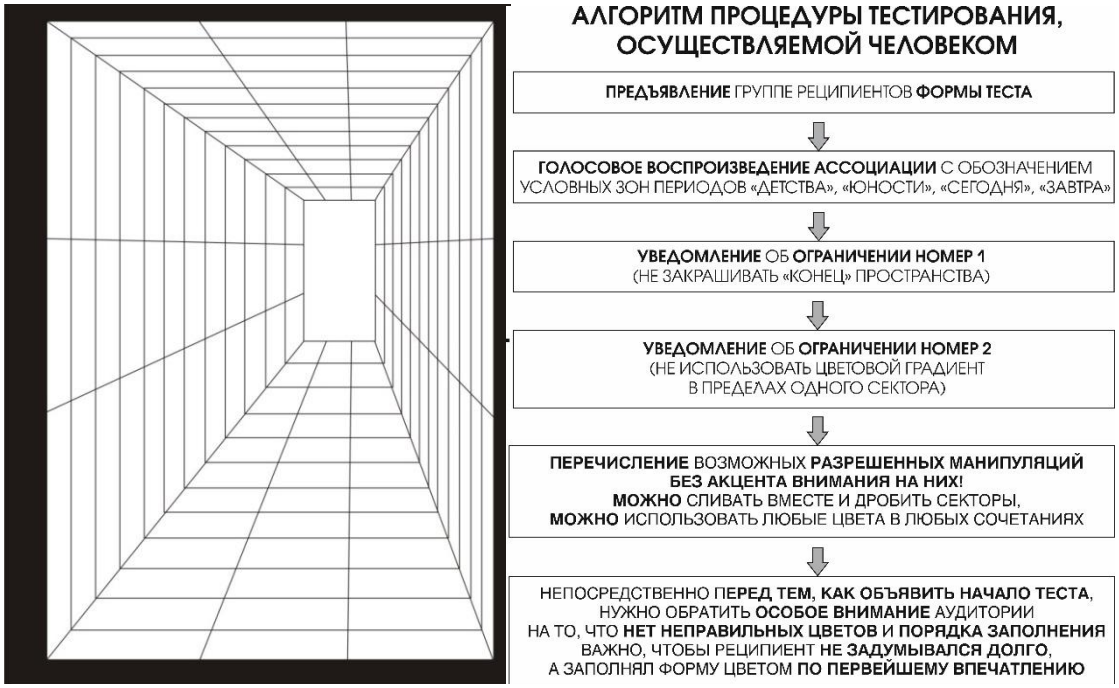
Авторы исследованияставят перед собой задачу расширения возможностейпрофориентационной методики «Ассоциативное цветовое пространство»©путем добавления различных критериев, относящихся как к индивидуальным особенностям личности, так и к стилю трудовой деятельности.

В отечественной психологии проблема стиля деятельности рассматривается с 50-х гг. XX в. в работах В. С. Мерлина, Е. А. Климова др.[1].

Индивидуальный стиль деятельности (ИСД) это система отличительных признаков деятельности конкретного человека, обусловленная его индивидуально-личностными особенностями.Проявления ИСД: повторяющие способы деятельности, особенности

организации труда, качественные особенности готового продукта,внутрисубъективные особенности ИСД(стратегии деятельности, особенности функционирования, обусловленные индивидуальными свойствами личности, присваивание компонентам деятельности разной степени значимости, уникальность форм сознательного контроля и саморегуляции). ИСД выполняет функцию адаптации к условиям осуществления выбранного вида деятельности с учетом свойств индивидуальности человека [1].

Методика тестирования «Ассоциативное цветовое пространство»© направлена, в первую очередь, на выявление вышеперечисленных особенностей ИСД индивида.



а) *б)*

Рис.1. Начало процедуры тестирования:
а – форма теста; *б* – алгоритм работы с тестом

Сучетом особенностей ИСД в творческой среде выделено пять типов индивидов: «творческий», «рациональный», «скептический», «авангардный» и «смешанный». Внутри каждого типа,исключая «смешанный»,выделено два подтипа. Для типов «творческий», «рациональный» и «скептический» это «контрастный» и «неконтрастный» подтипы, для авангардного типа - «радикальный» и «умеренный» подтипы. Также каждый тип индивида имеет степень выраженности, например, «выраженный творческий тип» обладает четко определенным набором признаков (цвет, структура, кластеры), «невыраженный творческий тип» имеет не все признаки «выраженного творческого типа» (короткие градиенты, не характерные цвета).

Данный тест позволяет предположить тип темперамента реципиента, определить экстраверт испытуемый или интроверт, сможет ли он работать на режимном предприятии и насколько исполнительным покажет себя в качестве сотрудника и др. Алгоритм методики тестирования представлен на рис. 1.

Обработка результатов ведется вручную, на данный момент осуществляется перевод квазипространственной модели в электронный вид (рис.2). Алгоритм обработки тестовой формы человеком представлен на рис. 3, машинный же алгоритм линеен и не предполагает возвращения к пройденным стадиям.

Для полноты восприятия заданной ассоциации, тестовая модель имеет квазипространственный вид (перспектива). Рассматриваются два пути представления квазипространства в компьютерной программе: двумерное рабочее пространство с возможностью редактирования(см. рис. 1) и трехмерное рабочее пространство с возможностью редактирования (рис. 4).

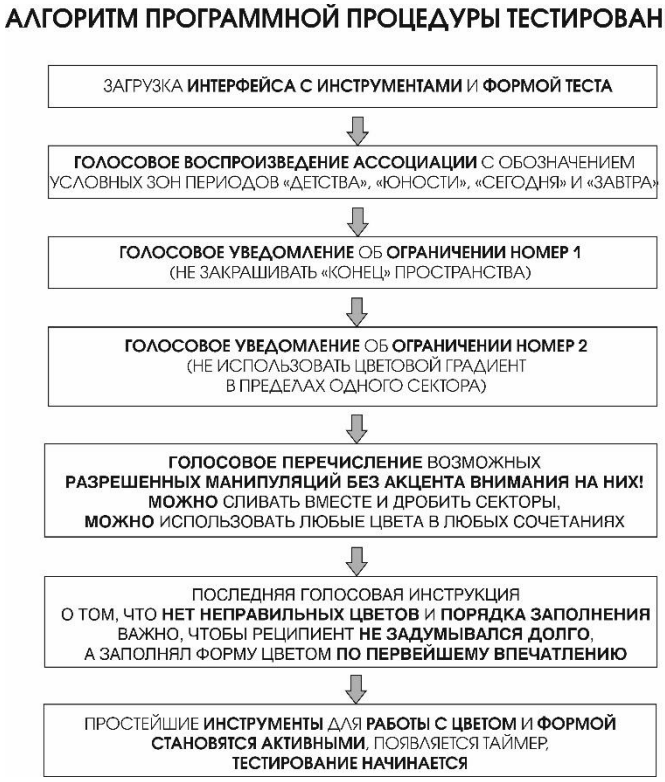


Рис. 2. Алгоритмпроцедуры тестирования, осуществляемый машиной

Рис. 3. Алгоритм обработки результатов теста человеком

Представленная методика имеет ряд преимуществ перед аналогами, в частности:

1. Возможность с помощью одного теста определить ИСД индивида, что позволяет также делать выводы о его темпераменте, характере, организованности.
2. Методика позволяет предоставить развернутую характеристику и рекомендации для реципиента.
3. Методика имеет положительную корреляцию с традиционными методами тестирования (тест Айзенка, тест Голланда).
4. Методика может быть переведена в формат компьютерной программы с возможностью установки на предприятиях и в учебных заведениях.

Недостатком методики является гипотетическая невозможность полного перевода процедуры заполнения тестовой формы в цифровой формат, так как именно ручное заполнение позволяет наиболее точно и корректно выявить особенности индивида при работе с цветом, формой и структурой.

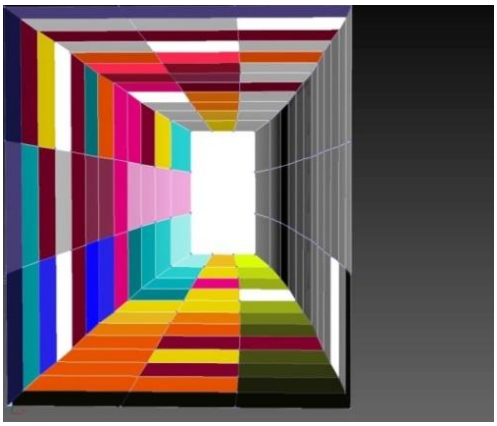


Рис. 4. Трехмерная модель цветового пространства с возможностью редактирования

Имеется возможность расширения области замеряемых критериев и характеристик путем привлечения больших данных. В частности – объединения методики тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» с классификатором типажей человеческих лиц.

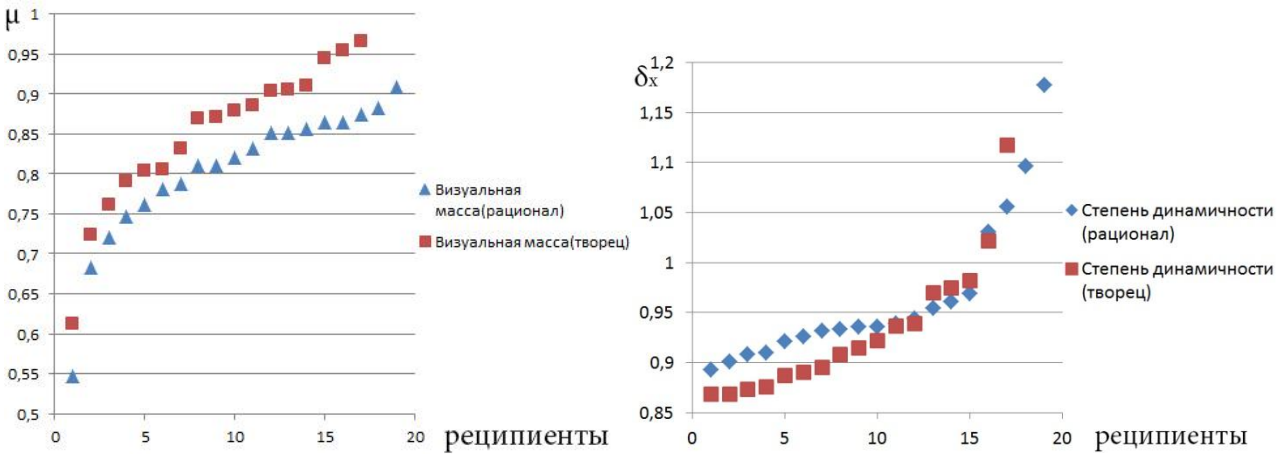
Существует множество классификацийвнешности человека, служащих определенным целям. Это могут быть конкретные пропорции, соотношения, выраженные в числовых значениях, либо характерные признаки, имеющие словесное выражение.

Исследование зрительного восприятия опирается на принципы формальной теории композиции[2]. Экспертные системы, применяемые для оценки промышленных изделий, подходят и для оценки особенностей человеческих лиц. Лицо является композицией, в упрощенном и формализованном виде оно представляет собой области визуальной массы, которые возможно измерить и зафиксировать с помощью специализированных компьютерных программ [2],[3]. Результаты будут соотнесены с существующими классификациями типажей человеческих лиц с целью оценки корреляции. В случае ее отсутствия будет произведена попытка выведения новой специальной классификации.

Путем включения в методику профориентационного тестирования «Ассоциативное цветовое пространство»© большихданных,можно создать профориентационную систему, способную единовременно сопоставить большой массив разнородных данных и вывести комплексный результат с учетом корреляции. В ходе исследованиябыло выдвинуто предположение о том, что привлечение больших данных не устранит текущий недостаток методики, связанный с необходимостью ручного заполнения форм, но позволит разработать

более короткую версию программы для профориентационной диагностики, которая в свою очередь даст возможность оценки фотографий соискателей, соотнеся их с типами индивидов. Под короткой версией подразумевается экспресс-тестирование, относящее индивида к тому или иному типу путем оценки фотографии соискателя. Как только количество соискателей будет уменьшено после экспресс-тестирования, оставшимся участникам предложат более развернутую версию, предусматривающую работу с квазипространственной моделью.

С помощью программы DesignProfessionalAnalization (DPA) (на основе программы «Классификатор»)[4] получены значения визуальной массы (μ)и степени динамичности (δ_x)для90 реципиентов.Для типов реципиентов «Творец»и «Рационал» диаграммы распределениявизуальной массы (μ) и степени динамичности (δ_x)представлены на рис.5. Выбор именно этих типов индивидов для построения диаграмм объясняется их большей численностью, в сравнении с группами других типов. Для наглядности распределения показателей визуальной массы, реципиенты расположены по горизонтальной оси следующим образом: номеру один соответствуют два человека – «творческий» с наименьшей визуальной массой в группе и «рациональный» с наименьшей визуальной массой в группе. Далее реципиенты следуют также попарно, по возрастанию показателей визуальной массы. По вертикальной оси располагаются численные значения визуальной массы(μ). Аналогичным образом построена диаграмма для показателей степени динамичности (δ_x).



а) б)

Рис. 5. Диаграммы распределения показателей а – визуальной массы(μ), б – степени динамичности (δ_x) для выборки групп «творческого» и «рационального» типов

Анализируя диаграмму, можно сделать следующие выводы:

1. Визуальная масса (μ)«Творца», имеет большие значения в сравнениис визуальной массой «Рационала», что объясняется наличием градиентов заполненной тестовой формы.

2. Степень динамичности (δ_x) тестовой формы, заполненной «Творцом», имеет, в основном, меньшее значение в сравнении со значениями степени динамичности (δ_x) «Рационала», что объясняется наличием шахматной структуры, иными словами – «пробелов» в плоскости однородной визуальной массы.

3. Имеется обратно пропорциональная зависимость между показателями визуальной массы(μ) и степени динамичности (δ_x) «Творцов» и «Рационалов».

4. Градиенты,характерные для творческого типа, «утяжеляют» коридор (увеличивают визуальную массу μ), что, в соотнесении с «не выраженными типами» («Творец+Рационал») позволяет сделать следующие выводы: «выраженный«Творец» имеет значениеμ> 0,9 , «Творец+Рационал»μ = 0,8-0,9, «выраженный«Рационал»μ< 0,8.

Показатели визуальной массы (μ)в отличие от показателей степени динамичности (δ_x)представляют собой больший интерес для исследования, так как визуальная масса является производной от многих характеристик изображения(пятна):

$$\mu = f(\rho, s, l, \lambda, \alpha, x, y) \text{ [2]},$$

где, ρ – коэффициент отражения, *s* – площадь пятна, *l* – периметр пятна, λ – доминирующая длина волны, α – угол наклона главной динамической оси пятна относительно принятых осей координат, *x*,*y* – координаты пикселей изображения.

На рис.6 представлен график зависимости визуальной массы (μ) от степени динамичности (δ_x) для «выраженных» представителей всех типов индивидов. Полученные области («условно ровная зона», «напряженная зона», «меланхоличная зона», «открытая зона») включают индивидов со схожими проявлениями внутри коллектива, обусловленными индивидуальными особенностями личности (в частности – темперамент, самооценка, конфликтность). Так, например, в зеленой области (условно ровная зона)находятся индивиды, преимущественно проявляющие себя выдержанно и спокойно, в серой (напряженная зона) – индивиды, склонные к внешним и внутренним конфликтам, в синей(меланхоличная зона) – индивиды со склонностью к занижению своих достижений, в оранжевой(открытая зона) – индивиды, легко переносящие конфликты.

Дальнейшее исследование будет посвящено уточнению числовых диапазонов для показателей визуальной массы и степени динамичности с целью повышения точности выведения в процентом соотношении преобладания признаков того или иного типа индивида, автоматизации построения цветовых карт с целью выявления цветовых предпочтений типов индивидов, расширению диапазона исчисляемых характеристик и созданию короткой версии программы для удобства проведения профориентационной диагностики больших групп соискателей.

Следует отметить универсальность разработанной методики тестирования, положительную корреляцию с классическими методиками, возможность расширения диапазона критериев путем привлечения BigDataдля создания глобальной профориентационной системы с максимально возможной автоматизацией процесса тестирования.

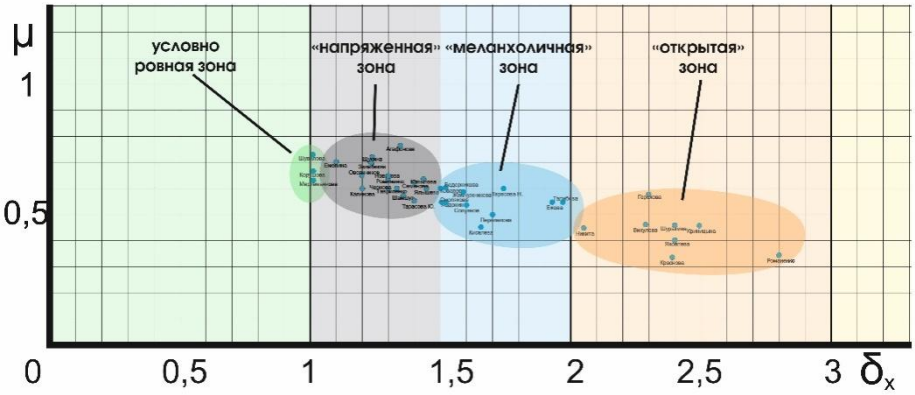


Рис. 6. Зависимость визуальной массы (μ) от степени динамичности (δ_x) для «выраженных» представителей типов индивидов

Библиографический список

1. Григорьева, М.В. Психология труда. Конспект лекций [Текст] / М.В. Григорьева. – М.: Высшее образование, 2006. – 192 с.

2. Шаповал, А.В. Отечественная экспериментальная эстетика в постиндустриальный период: монография / А.В. Шаповал. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2009. – 167 с.

3. Шаповал, А.В. Теория формальной композиции: учебное пособие для вузов/ А.В. Шаповал. – Казань: «Дизайн-квартал», 2016. – 175 с.

4. Шаповал А.В. Метод количественной оценки системой технического зрения значений интегративных признаков объектов хроматического изображения предметно-пространственной среды [Текст] / А.В. Шаповал, Е.А. Мартемьянова // Журнал «Приволжский научный журнал». – Н.Новгород. – 2017. – №1. – С. 69-75.

V.V. Andreev[1], Y.S. Tarasova[2], E.A. Martemyanova[2]

THE DEVELOPMENT OF A QUASI-SPACE COLOR MODEL AS A MEANS OF COMPUTER PROFESSIONAL TESTING BASED ON BIG DATA

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev[1],
University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU)[2]

In this article, considered the problem of implementing vocational guidance diagnostics, it is proposed to solve it using the method of vocational guidance testing «Associative color space» (quasi-spatial model). The methodology is characterized (the testing procedure is described, its advantages and disadvantages are shown in comparison with analogues), the prospects of its implementation and development are presented by attracting large data (Big Data).

Key words: vocational guidance, methodology, model, quasi-space, algorithms, individual style of activity, large data.

УДК 004.92

Н.Н. Макаров, П.С. Кулясов

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЦВЕТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Построена модель представления цвета, основанная на цветовом круге Гёте и системе CMYK, которая, благодаря введению понятия цветового расстояния и линейной зависимости цветового расстояния от номера тона, позволяет получать промежуточные цвета различной светлоты и насыщенности.

Ключевые слова: Цветовые модели, модель RGB, модель CMYK, цветовое расстояние, различимость цветовых тонов.

Создание моделей восприятия цвета глазом человека всегда интересовало исследователей в этой области. Первыми моделями были цветовые системы Ньютона и Гёте. Модель Ньютона объясняла процесс образования цвета путём восприятия человеком электромагнитных колебаний с длиной волны от 300 до 600 нм. Ньютон предложил модель в виде цветового круга из семи цветов по аналогии с семью нотами. Цвета в круге повторяли цвета в радуге от красного до фиолетового цвета. В цветовом круге Гёте три основных цвета: жёлтый, красный, синий и три дополнительных цвета: оранжевый, фиолетовый и зелёный. Дополняющие цвета по методу Гёте можно наблюдать, если смотреть на пятно одного цвета около 15 секунд, потом закрыть глаза, при этом через несколько секунд появится пятно, окрашенное дополнительным цветом. Вот пары дополняющих цветов: жёлтый-фиолетовый, оранжевый-синий, красный-зелёный.

Филипп Отто Рунге (1777-1810) разработал трёхмерную модель в виде шара, в которой использовал шесть основных цветов круга Гёте плюс белый и чёрный цвета. Модель Рунге давала возможность моделировать цветовые тона по светлоте и насыщенности. Впоследствии исследователи строили различные цветовые системы, которые в основном повторяли модель Рунге.

В настоящее время используются разные цветовые модели. Наиболее популярные модели RGB, CMYK. В этих моделях цвет определяется тремя характеристиками: цветовым тоном, светлотой, насыщенностью. Система RGB основана на трёх цветах, красный, зелёный, синий. Она используется при аддитивном смешении цветов. При аддитивном смешении цвет получается суммированием основных цветов в разных пропорциях. Как известно из теории цвета, любой цвет можно получить из трёх цветов, если любой из этих цветов не является производным от остальных двух. Аддитивное смешение используется при получении производных цветов от излучающих источников света, например в дисплеях. Однако для отраженного цвета эта система неудобна, так как некоторые цвета невозможно получить, например, жёлтый цвет. Это вызвано тем, что в отражённом цвете всегда присутствует небольшая доля серого цвета. В дисплеях жёлтый цвет получается смешением красного и зелёного. При самых качественных красителях при смешении красного и зелёного получается грязно-коричневый цвет, а не жёлтый.

Система CMYK основана на пяти цветах: жёлтый, пурпурный, голубой, черный цвет и белый цвет бумаги. Для отражающего цвета используют субтрактивный принцип получения цвета, когда цвет вычитается из белого. Так, например, если поверхность предмета поглощает жёлтый цвет, то поверхность предмета окрасится в дополнительный к жёлтому фиолетовый цвет. Система CMYK применяется в полиграфии.

В настоящей работе предложена цветовая модель из десяти цветов. Она состоит из шести цветов круга Гёте, двух цветов из системы CMYK: голубого и пурпурного и цветов чёрного и белого. Первые восемь цветов назовём основными цветами, черный и белый – промоцветами, так как они являются базовыми для получения основных цветов: чёрный цвет при аддитивной системе, белый при субтрактивной системе цветообразования.

Модель восприятия цвета по характеристикам: цветовой тон, светлота, насыщенность

Введём обозначение цветовых тонов для основных цветов и промоцветов:

X_0 – белый цвет,

X_1 – жёлтый цвет,

X_2 – оранжевый цвет,

X_3 – красный цвет,

X_4 – пурпурный цвет,

X_5 – филетовый цвет,

X_6 – синий цвет,

X_7 – голубой цвет,

X_8 – зелёный цвет,

X_9 – черный цвет.

Для получения колеров используем аддитивный способ смешения цветов, при этом получаем выражения для получения колеров с учётом характеристик: цветовой тон, светлота, насыщенность:

$X_k = \sum_1^9 k_i X_i$, где X_i – цветовой тон, кроме белого и чёрного, X_k –цветовой тон колера, полученного смешением цветов. k_i – доля цветового тона *i* в колере, при этом $\sum_1^9 k_i = 1$ (1)

$$X_c = 0{,}5 \cdot X_0 + 0{,}5 \cdot X_9, \text{ где } X_{\tilde{n}} \text{ – серый цветовой тон} \quad (2)$$

$$X_{cc} = k_0 \cdot X_0 + k_9 \cdot X_9 \text{ , где } k_0, k_9 = 0 \ldots 1, k_0 + k_9 = 0 \ldots 1 \quad (3)$$

Формула (3) определяет градации серого цвета по светлоте.

$$X_{ic} = X_i + k_c X_0 \text{ , где } k_i \text{ – уровень светлоты} \quad (4)$$

Формула (4) определяет градации цвета по светлоте.

$$X_{i\acute{i}} = X_i + k_{\acute{i}}\ X_c \text{ , где } k_{\acute{i}} \text{ – уровень насыщенности} \quad (5)$$

Формула (5) определяет градации цвета по насыщенности, чем больше серого в цвете ($k_i \to 1$), тем менее насыщенный цвет.

Математическая модель восприятия цвета по цветовому тону, светлоте и насыщенности выражается формулами:

Мтсн=(1,4,5)

Графическую модель можно представить рис. 1.

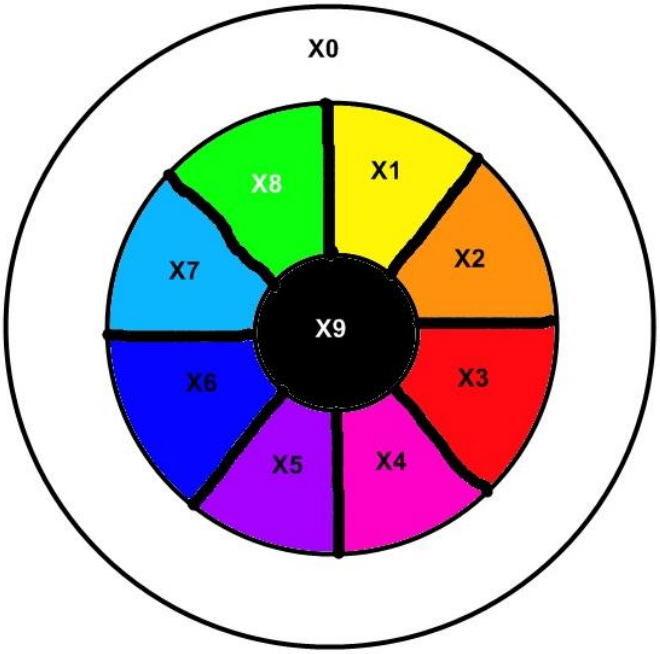


Рис.1. Графическая интерпретация цветовой модели Мтсн

Одной из важнейших характеристик цветовых тонов является их различимость. Свойство глаза различать цвета индивидуально, например, дальтоники плохо различают синие и зелёные цвета. Однако для большинства людей есть усредненные антропометрические характеристики, которые используются в колориметрической практике. Измерение степени различимости можно выполнить с помощью величины, которую назовем цветовым расстоянием L. Условно примем, что цветовые расстояния между соседними цветовыми тонами в цветовом круге равны, т.е. расстояние между цветовыми тонами X_i и X_y равно: $L_{iy} = 1$, где $/\, y - i \,/ = 1$. Данное условие означает, что цветовое расстояние L_{iy} и положение цветового тона в круге связаны линейной зависимостью. В общем случае эта зависимость может быть и не линейной (Для конкретных пигментов, используемых при производстве красителей, зависимость будет определяться цветосилой последних)

Цветовое расстояние между двумя цветовыми тонами определяется по одной из формул:

$$L_{i.j} = |i - j| \rightarrow если |i - j| \le 4 \quad (6)$$

$$L_{i.j} = |\,|i - j| - 8| \rightarrow если |i - j| > 4 \quad (7)$$

Соседние пары цветовых тонов с цветовым расстоянием $L_{iy} = 1$ назовём аналоговыми. Таких пар восемь. При смешении цветовых тонов этих пар получим ещё восемь производных цветовых тонов 1 ранга:

$X_{1,2} = 0{,}5 \cdot X_1 + 0{,}5 \cdot X_2$ – жёлто-оранжевый (золотистый);

$X_{2,3} = 0{,}5 \cdot X_2 + 0{,}5 \cdot X_3$ – оранжево-красный (кирпичный);

$X_{3,4} = 0{,}5 \cdot X_3 + 0{,}5 \cdot X_4$ – красно-пурпурный (розовый);

$X_{4,5} = 0{,}5 \cdot X_4 + 0{,}5 \cdot X_5$ – пурпурно фиолетовый (бордовый);

$X_{5,6} = 0{,}5 \cdot X_5 + 0{,}5 \cdot X_6$ – фиолетово-синий;

$X_{6,7} = 0{,}5 \cdot X_6 + 0{,}5 \cdot X_7$ – сине-голубой (небесный);

$X_{7,8} = 0{,}5 \cdot X_7 + 0{,}5 \cdot X_8$ – зелено-голубой (цвет морской волны);

$X_{1,8} = 0{,}5 \cdot X_1 + 0{,}5 \cdot X_8$ – зелёно-жёлтый (салатный);

Если смешивать два цветовых тона в равной доле, то производный тон будет иметь цветовое расстояние с основным цветовым тоном равное:

$$L_{i,i+j} = L_{i,j} \diagup 2 \quad (8)$$

При смешении двух цветов в неравной доле цветовое расстояние между производным тоном и первым основным тоном будет равно:

$$L_{i,i+j} = k_i * L_{i,j}, \quad (9)$$

а между производным и вторым основным цветовым тоном будет равно:

$$L_{j,i+j} = k_j * L_{i,j} \quad (10)$$

Основные и производные цвета, полученные смешением соседних основных тонов, образуют палитру из 16 цветовых тонов. Соседние цвета этой палитры будут иметь цветовое расстояние равное 0,5.

Дальнейшее смешение соседних цветовых тонов даст производные цветовые тоны 2 ранга и палитру из 32 цветов. Продолжая смешивание соседних цветовых тонов, получим палитры из 64, 128, 256 и т.д. цветов.

Четыре пары цветов с цветовым расстояние L=4 назовем контрастными, так как они дополняют друг друга. Это пары: жёлтый- фиолетовый, оранжевый- синий, красный- голубой, пурпурный- зелёный. При смешении этих цветов получуется грязно серые цветовые тоны, поэтому их не рекомендуется смешивать. Однако по соседству они создают цветовой контраст, который может иметь сильное эмоциональное звучание, и часто используются дизайнерами и художниками в цветовых композициях.

Определим триады цветов, которые могли бы стать основой цветовых систем. Известно, что из трёх не аналоговых и не контрастных цветов можно получить все производные цвета. Цветовые тона в триаде должны удовлетворять условиям:

$$Liy \neq 1, \quad Liy \neq 4.$$

Это следующие триады:

1 – красный, зелёный, синий;
2 – красный, жёлтый, синий;
3 – красный, зелёный, фиолетовый;
4 – жёлтый, голубой, пурпурный;
5 – жёлтый , синий, пурпурный;
6 – голубой, оранжевый, пурпурный;
7 – голубой, оранжевый, фиолетовый;
8 – фиолетовый, зелёный, оранжевый.

Первая триада используется в системе RGB, а четвёртая триада в системе CMYK.

Смешение 3 цветовых тонов из представленных выше триад позволяет получать любые цветовые тона, и можно было бы ограничить палитру дизайнера всего тремя цветовыми тонами, а в этюднике художника находилось бы всего три тюбика краски. Однако на практике дизайнеры и художники используют большее число цветовых тонов, их палитры насчитывают иногда более двух десятков цветов. Это вызвано тем, что при смешении разных цветовых тонов всегда появляется доля серого цвета, и эта доля тем больше, чем большее цветовое расстояние имеют эти цвета.

В общем случае, если считать модель линейной, доля серого цвета будет пропорциональна цветовому расстоянию. Например, при смешении двух контрастных цветов в равных долях получим полностью серый цвет, т.е. доля его в колере будет равна единице. При смешении трёх цветов, находящихся в разных четвертях цветового круга в колере также будет присутствовать большая доля серого цвета. Поэтому в палитре художника или дизайнера должно быть больше чем три разных спектральных цветовых тонов. Эти замечания верны только для линейной модели.

Представленная модель представления цвета, содержащая промоцвета, цвета круга Гёте и два цвета современной системы CMYK представляет оптимальную палитру цветов для получения различных колеров, а введение понятия цветового расстояния и линейной зависимости цветового расстояния от номера тона, позволяет с помощью простых арифметических операций получать промежуточные цвета различной светлоты и насыщенности. Данная модель может использоваться дизайнерами и художниками при создании цветовых композиций.

Библиографический список

1. Гете И.В. Избранные сочинения по естествознанию. М., Изд-во АН СССР, 1957.
2. Волков Н.Н. Цвет в живописи. М.: Искусство, 1985.
3. Зайцев А.С. Наука о цвете и живопись. М.: Искусство, 1986.
4. Базыма Б.А. Цвет и психика. Монография. Х.: ХГАК, 2001.

N.N. Makarov, P.S. Kulyasov

COLOR REPRESENTATION MODEL

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The paper deals the color representation model based on the Goethe color circle and the CMYK color model, which based on the introduction of the concept of color distance and linear dependence of color distance from the tone number and allows you to get intermediate colors of different lightness and saturation.

Key words: color models, RGB model, CMYK model, color distance, discernibility of color tones.

УДК 004.89

И. Д. Чернобаев, А. С. Суркова

ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассмотрены современные методы тематической сегментации текстовых данных для выделения частей схожей тематики, приведены области применения и ограничения основных методов. Показано, что наиболее эффективные методы тематической сегментации текстов совмещают в себе подходы из разных областей.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ текстов, тематическая сегментация, лексическая когезия, нейронные сети, скрытая марковская модель.

Введение

Тематическая сегментация [1] - задача разделения текста, аудио или видео на последовательность связанных друг с другом сегментов, называемых историями. Тематическая сегментация направлена на определение границы темы в потоке текста или речи. Эта задача является необходимым предшественником для последующих задач, таких как обнаружение и отслеживание темы (Topic Detection and Tracking, TDT) [2], обобщение, реферирование, извлечение, индексирование и поиск информации [3-5]. Тема текста – его основная мысль, то, о ком или о чем говорится в тексте или его части. Данное направление исторически изучалось через потоки естественного языка, такие как новости, телефонные разговоры и записи конференций и прочее. Для сегментации тем были разработаны различные подходы, в первую очередь основанные на лексической согласованности сегментов текста [6]. В настоящее время проблема тематической сегментации текста приобретает все больший интерес благодаря экспоненциальному росту объема мультимедийных данных, зачастую представленных текстовыми данными. Тематическая сегментация является одной из важных задач при создании систем автоматического реферирования и аннотирования текстов. Возможность предварительного выявления основных тем текста, а также определение изменения темы текста и границ частей текста, т.е. разделение текста на сегменты, приведет к модульному и гибкому процессу реферирования.

Целью работы является обзор методов тематической сегментации текстов и гипотезы относительно применимости рассмотренных методов к различным типам задач и текстов.

Теоретический анализ

Существует несколько подходов к решению задачи тематической сегментации текста. Теория лексической когезии [7] утверждает, что текстовые сегменты со схожей лексикой, скорее всего, будут найдены в одном когерентном (связном) сегменте темы. Когезия [8] – это лексические, грамматические, семантические формы связи между отдельными частями текста, определяющие переход от одного конкретно-вариативного членения текста к другому. Таким образом, определение границы темы может быть осуществлено путем обнаружения лексических изменений. Таким образом, различия между подходами могут быть определены методами моделирования когезии. Одна из стратегий лексической когезии заключается в поиске закономерности совпадения слов, с помощью лексических мер подобия. Этой стратегии соответствуют следующие подходы:

TextTiling [4] - один из наиболее ранних методов сегментации текстов по темам. В этом методе сравниваются блоки смежных предложений. Сравнение выполняется с использованием

меры подобия, основанной на модели «мешка слов» (Bag-of-Words, BOW) или частотных характеристиках (tf-idf). Блок предложений обычно определяется абзацем. Сходство блоков определяется при помощи вычисления косинусного коэффициента подобия между двумя последовательными окнами. Лексические изменения затем определяются по минимальным значениям коэффициента. Данный метод определяет границы тем путем нахождения точек, в которых мера лексической когезии значительно отличается.

Minimum Cut (MinCut) [9] – алгоритм наименьшего разреза графа, который моделирует зависимости между предложениями между документами внутри документа. Этот метод абстрагирует документ в виде графа, где узлы — это предложения в документе, а ребра имеют значение веса, соответствующее значению подобия между двумя связанными узлами. Используя указанный граф, задача метода состоит в нахождении минимального разреза графа.

В методе Lexical Cohesion Segmentation (LCSeg) [6] предполагается, что изменение темы в тексте происходит в местах, где частые повторения слов начинаются и заканчиваются, образуя цепочку. В методе цепь в которых термы повторяются больше получает более высокий балл. Также отдается предпочтение коротким цепям вместо более длинных. Косинусный коэффициент подобия здесь определяет уровень лексического сцепления между двумя лексическими цепями. LCSeg может выполнить тематическую сегментацию с заранее известным числом границ тем, или самостоятельно определять число границ тем.

Другие подходы основываются на байесовских структурах:

Bayesian Unsupervised Topic Segmentation (BayesSeg) [10] использует Байесовскую структуру для сегментации. В этом методе каждая тема рассматривается, как отдельная языковая модель. Слова же в каждом предложении рассматриваются как сгенерированные языковой моделью, связанной с сегментом темы. Задача состоит в том, чтобы найти языковые модели, которые обеспечивают максимально возможную вероятность относительно их соответствующих связанных предложений.

Probabilistic LDA (PLDA) [11] использует набор латентных распределений Дирихле для моделирования распределений тем, которые соответствуют сегментам документа. Каждому предложению присваивается двоичная переменная сдвига темы. Эта переменная указывает, совпадает ли тема соответствующих предложений с темой предыдущего предложения. Выборка этих переменных позволяет определить сегментацию текста. Эта формулировка позволяет в некоторой степени моделировать задачу сегментации в сценариях с несколькими документами. Ограничение заключается в том, что это моделирование по-прежнему предполагает, что сегментация является линейным процессом, который позволяет только исследовать хронологические зависимости между документами.

Structured Topic Model (STM) [12], использует структурированные тематические модели в непараметрическом байесовском контексте. Этот метод моделирует более сложные отношения, чем предыдущие подходы, а именно зависимости между различными подтемами в документе. Это осуществляется при помощи учета того, что документ соответствует набору сегментов, где предложения генерируются из одного и того же раздела. В свою очередь эти распределения на уровне сегмента связаны с распределением тем более высокого уровня, которое, в свою очередь, связано со всем документом.

Более поздние исследования показали, что оптимизированные методы тематической сегментации текстов, такие как динамическое программирование (Dynamic Programming - DP), либо скрытая марковская модель (Hidden Markov Model - HMM), способны улучшить производительность и показывают лучшие результаты. В методе HMM для сегментации темы скрытые состояния представляют собой некоторые неизвестные «фоновые темы». Переходные вероятности в HMM определяют поток тем, в то время как вероятности эмиссии представляют

собой вероятность предложений, порожденных разными темами. Переходы с одной скрытой темы на другую указывают на изменение темы. Ряд факторов оказывает влияние на эффективность данного метода: различное количество скрытых состояний (количество тем), удаление стоп-слов и разный размер данных для моделирования модели. В [13] показано, что HMM обеспечивает лучшие результаты в сравнении с методом LCSeg, основанным на принципах лексической когезии.

Подобно подходам, используемым в автоматическом распознавании речи (Automatic Speech Recognition - ASR), глубокие нейронные сети были объединены со скрытыми марковскими моделями HMMs (Deep Neural Network-Hidden Markov Model - DNN-HMM). И применение такого подхода к задаче сегментации истории оказалось весьма успешным и позволило существенно улучшить точность сегментации [14]. Глубокие нейронные сети также применяются для решения похожих задач, включая сегментацию диалога и определение границы предложения или оценку пунктуации. В отличие от зависящей от темы языковой модели, используемой в традиционном подходе, основанном на HMM, который является пророждающей моделью последовательности слов, здесь используется глубокая нейронная сеть (DNN) для сопоставления наблюдаемого слова с апостериорной вероятностью темы. Входные функции DNN — это «модель мешка слов», вычисленная из локального контекста каждого кандидата границы темы. Известно, что глубокая нейронная сеть в состоянии выучить значимые непрерывные признаки слов, и, следовательно, имеет лучшую дискриминационную и обобщающую способность, чем модели n-грамм [15]. DNN на самом деле представляет собой многослойный перцептрон, то есть модель нейронной сети прямого распространения, которая отображает наборы входных данных на набор выходов. Это можно рассматривать как иерархическую обучаемую функцию с нелинейным преобразованием, которая преобразует входное представление в более качественное (в данном случае это тема). В подходе используется глубокая нейронная сеть для прогнозирования апостериорной темы из вектора слов и HMM для моделирования перехода между темами. Затем при помощи алгоритма Витерби выполняется декодировние последовательности слов в последовательность тем, в которой изменение темы определяет границу сегмента текста.

Рекуррентные нейронные сети (РНС) легли в основу современных методов языкового моделирования и тематического моделирования. После применения нейронной сети прямого распространения для построения языковой модели, Томас Миколов предложил использовать РНС для языкового моделирования [16], тем самым устраняя ограничение конечного контекста для прогнозирования следующих слов. Затем было предложено моделирование языка с использованием долговременной памяти (Long-Short-Term-Memory - LSTM). В настоящее время многие современные методы языкового моделирования базируются на использовании LSTM [17, 18]. Для включения дополнительного контекста в качестве вспомогательного вклада в RNN модель языка было предложено векторное представление абзаца, и было установлено, что такой прием улучшил качество полученной модели. Иерархические модели также были предложены для тематического моделирования. В [19] РНС уровня предложения использовалась для передачи неограниченной истории предложений и каждое слово прогнозируется с помощью РНС уровня слова. Позже [20] была предложена модель LSTM с выходным вектором представления предложения. В этой работе исследователи продемонстрировали, что специально подготовленные выходные векторы являются лучшими представлениями, чем векторы абзацев. В методе тематической сегментации, основанном на иерархической РНС, каждое предложение представляется в виде вектора при помощи первого слоя РНС уровня слова, и слой двунаправленной LSTM на уровне предложения моделирует общий переход истории, основанный на этой последовательности векторов. Наконец, слой нейронной сети с прямого

распространения определяет тему передаваемого на вход предложения, а HMM обнаруживает границы темы.

Результаты

Методы тематической сегментации текста, основанные на лексической когезии, изначально были спроектированы для работы с очень большими документами, содержащими достаточный объем статистически значимой лексической информации. Такие методы хорошо справляются с задачей тематической сегментации научных текстов, но не подходят для сегментации записей встречи, например. Методы, использующие байесовские структуры, обладают способностью сочетать как лексическую связность, так и определять ключевые фразы и тем самым превосходят упомянутые ранее методы. Методы этой группы хорошо справляются с сегментацией речи и научных текстов, причем, лучше методов, основанных на лексической когезии [10]. В задаче тематической сегментации текста два современных метода - DNN-HMM, иерархическая PHC, на практике превосходят остальные рассмотренные. Метод DNN-HMM уступает иерархическим PHC по производительности [20]. Методы данной группы могут применяться в любых типах задач и для текстов любого типа, при условии наличия достаточного объема тренировочных данных. Результаты этих экспериментов показали, что модель с иерархической PHC способна эффективнее других справляться с задачей тематической сегментации. Ощутимым недостатком данных методов является необходимость предварительного обучения нейронных сетей, входящих в архитектуру моделей на больших объемах данных. Показано, что наиболее эффективные методы совмещают в себе подходы из разных областей.

Выводы

В данной работе проведен обзор и классификация известных методов тематической сегментации текстов. Можно сделать вывод, что методы, обладающие наибольшим потенциалом для эффективного использования, дальнейшего развития и модификации, являются комбинированными методами, например, совмещают в себе глубокие нейронные сети и наиболее эффективные традиционные подходы. Этим и обусловлено их успешное применение в задаче тематической сегментации. Тем не менее, обладая преимуществом от интеграции подходов из разных областей, эти методы также имеют слабые стороны, перспективной представляется дальнейшая работа по устранению недостатков современных подходов за счет объединения с эвристическими методами, такими как генетические алгоритмы.

Библиографический список

1. Mohri M., Moreno P., Weinstein E. Discriminative topic segmentation of text and speech //Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. – 2010. – С. 533-540.
2. Allan J. Introduction to topic detection and tracking //Topic detection and tracking. – Springer, Boston, MA, 2002. – С. 1-16.
3. Rau L. F., Jacobs P. S., Zernik U. Information extraction and text summarization using linguistic knowledge acquisition //Information Processing & Management. – 1989. – Т. 25. – №. 4. – С. 419-428.
4. Hearst M. A. TextTiling: Segmenting text into multi-paragraph subtopic passages //Computational linguistics. – 1997. – Т. 23. – №. 1. – С. 33-64.
5. Lee L., Chen B. Spoken document understanding and organization //IEEE Signal Processing Magazine. – 2005. – Т. 22. – №. 5. – С. 42-60.
6. Galley M. et al. Discourse segmentation of multi-party conversation //Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2003.
7. Halliday M. A. K., Hasan R. Cohesion in english. – Routledge, 2014.

8. Гришучкова И. Б. Некоторые виды когезии в речевых текстах анималистического жанра //Наука. Инновации. Технологии. – 2008. – №. 5.
9. Malioutov, Igor, and Regina Barzilay. "Minimum cut model for spoken lecture segmentation." Proceedings of the 21st International Conference on Computational Linguistics and the 44th annual meeting of the Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2006.
10. Eisenstein J., Barzilay R. Bayesian unsupervised topic segmentation //Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – Association for Computational Linguistics, 2008. – С. 334-343.
11. Purver M. et al. Unsupervised topic modelling for multi-party spoken discourse //Proceedings of the 21st International Conference on Computational Linguistics and the 44th annual meeting of the Association for Computational Linguistics. – Association for Computational Linguistics, 2006. – С. 17-24.
12. Du L., Buntine W., Johnson M. Topic segmentation with a structured topic model //Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – 2013. – С. 190-200.
13. Sherman M., Liu Y. Using hidden Markov models for topic segmentation of meeting transcripts //Spoken Language Technology Workshop, 2008. SLT 2008. IEEE. – IEEE, 2008. – С. 185-188.
14. Yu J. et al. A DNN-HMM Approach to Story Segmentation //INTERSPEECH. – 2016. – С. 1527-1531.
15. Mikolov T. et al. Distributed representations of words and phrases and their compositionality //Advances in neural information processing systems. – 2013. – С. 3111-3119.
16. Mikolov T. et al. Recurrent neural network based language model //Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association. – 2010.
17. Суркова А.С., Чернобаев И.Д. Использование модели Encoder-Decoder для реферирования текстов// Системы управления и информационные технологии, №4(70), 2017. – С. 72-76.
18. 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" (ITSMSSM 2017). Advances in Computer Science Research (ACSR). 2017. vol. 72. pp. 108-113.
19. Teh Y. W. et al. Sharing clusters among related groups: Hierarchical Dirichlet processes //Advances in neural information processing systems. – 2005. – С. 1385-1392.
20. Palangi H. et al. Deep sentence embedding using long short-term memory networks: Analysis and application to information retrieval //IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP). – 2016. – Т. 24. – №. 4. – С. 694-707.

I. D. Chernobaev, A. S. Surkova

OVERVIEW OF METHODS OF THE TOPIC SEGMENTATION OF TEXT DATA

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

The paper considers modern methods of the topic segmentation of text data for identification of the segments with similar topics, the scope and limitations of the basic methods are given. It is shown that the most effective topic segmentation methods combine approaches from different areas.

Key words: text mining, topic segmentation, lexical cohesion, neural networks, hidden Markov model.

УДК 004.934.2

А.С. Попова, А.Г. Рассадин, А.А. Пономаренко

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЭМОЦИЙ В РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОЛГОЙ КРАТКОСРОЧНОЙ ПАМЯТИ

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики – Нижний Новгород

Рассматривается задача автоматической классификации эмоций в цифровом аудио сигнале. В работе рассматривается и верифицируется подход, в котором классификация звукового фрагмента производится с помощью рекуррентной нейронной сети с долговременно-кратковременной памятью. В качестве признаков использовались мел-кепстральные коэффициенты. Произведен численный эксперимент на открытом наборе данных Ravdess, включающий 8 различных эмоций: “нейтральный”, “спокойный”, “счастливый”, “грустный”, “злой”, “испуганный”, “отвращение”, “удивление” и проведено сравнение разных наборов признаков и разных архитектур сети.

Ключевые слова: глубокое обучение, классификация, мел-кепстральные коэффициенты, рекуррентные нейронные сети, нейронные сети с долговременно-кратковременной памятью, анализ звуков, анализ речи, эмоции.

Введение

Классификация человеческих эмоций в потоке мультимедийных данных актуальная и активно разрабатываемая область компьютерных наук. Задача классификации эмоций имеет большой потенциал к использованию во многих прикладных отраслях, таких как робототехника, системы слежения и других системах в которых происходит интерактивное взаимодействия с пользователем. Решение этой задачи позволяет получить от пользователя обратную связь естественным образом, без требования со стороны пользователя каких-либо дополнительных действий, тем самым упрощая и ускоряя взаимодействия вычислительной техники и человека.

С математической точки зрения задачу классификации можно рассматривать в качестве построения функции, $y: X \to Y$, где X – это множество всевозможных описаний объектов, Y – конечное множество классов. Таким образом существует неизвестная целевая зависимость y – отображение, значения которой известны только на объектах конечной обучающей выборки $X^m = \{(x_1, y_1), ..., (x_m, y_m)\}$. Требуется построить алгоритм $A: X \to Y$, способный классифицировать произвольный объект $x \in X$. Для нашей задачи искомое отображение y, будет выглядеть как $y: R^n \to Y$, где n – в случае распознавания аудио сигнала, число сэмплов в окне распознавания.

Существуют две основные теории описания эмоций: дискретная теория [11] основывается на существовании универсальных базовых эмоций, которые могут различаются количеством и типом выделяемых базовых эмоций; пространственная теория предполагает, что эмоции раскладываются на базисы, тем самым эмоцию можно представлять как точку в векторном пространстве [12,13]. Как правило выделяют 6 основных эмоциональных состояний: нейтральное состояние, злость, страх, счастье, печаль и удивление. В данной работе мы будем придерживаться дискретной теории.

Ранее в литературе был предложен ряд методов классификации эмоций человека как отдельно для аудио или изображений [16,17], так и одновременно для видео. Большая часть этих методов связанна с явным выделением признаков, функция обнаружения которых в явном виде присутствует в алгоритме. Например, на изображениях ищут улыбку, оценивают положение и форму рта, широту глаз, угол бровей. В свою очередь в звуковом сигнале оценивают уровень энергии, средний уровень, дисперсию, изменение высоты голоса.

В данной работе мы, вдохновленные последними успехами в области рекуррентных нейронных сетей, ставим своей целью улучшить прошлый результат, полученный на основе последних разработок в области компьютерного зрения и сверточных нейронных сетей [1,2].

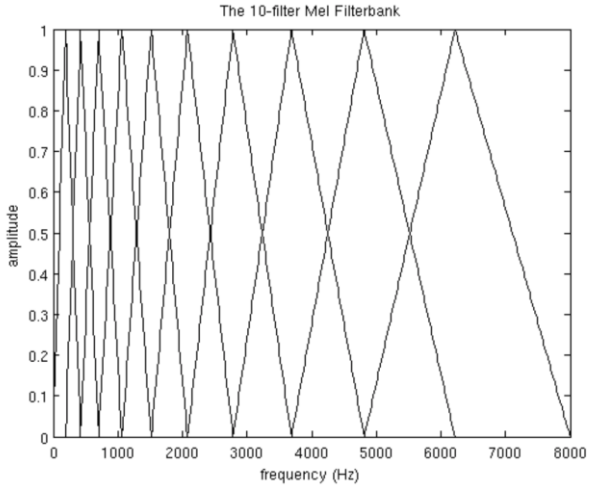


Рис 1. Визуализация мелфильтров

На сегодняшний день уже успешно решены множество задач, связанных с обработкой звука, существует множество алгоритмов работы со звуковыми файлами и методов их классификации, имеющей различную точность. Тем не менее, сравнение алгоритмов классификации звука является условным, так как во многих случаях эксперименты проводились на различных тестовых данных и с различными задачи распознавания.

Базовой техникой обработки аудио сигнала является быстрое преобразование Фурье [9][10]. Например, популярные алгоритмы J. Haitsma[8] и A. Wang [7] оба основаны на анализе частотно-временных признаков, полученных с помощью оконного преобразования Фурье.

Оба алгоритма хорошо себя проявили на задаче распознавания музыкальных треков по предъявленному фрагменту имея около 75% точности. Более того, эти методы извлечения признаков используются в мобильном приложении Яндекс.Музыка [6] в разделе «Распознавание», а так же в широко известном мобильном приложении «Shazam» поиска музыкального произведение по записанному фрагменту.

Подобный подход, на основе которого строилось визуализация быстрого преобразования Фурье и использовались сверточные нейронные сети, был опробован мной ранее и описан в статьях [1,2].

На данный момент для наилучшего результата были использованымел-кепстральные коэффициенты [3,5]и рекуррентная нейронная сеть с долгосрочной и краткосрочной памятью (LSTM) [4].

О этом поподробнее. Первым шагом в любой задаче машинного обучения является извлечение признаков. Одним из классических подходов для работы с записью человеческой речи является выделение мел-кепстральных коэффициентов. Основная идея работы с речью человека заключается в том, что звуки, генерируемые человеком, фильтруются формой голосового тракта, включая язык, зубы и т. д. Набор этиххарактеристик и можно представить с помощью мел-кепстральныхкоэффициентов .Мел — психофизическая единица высоты звука, количесвеннаяоценка звука по высоте,основанная на статистической обработке большого числа данных о субъективном восприятии человеком высоты звуковых тонов. Зависимость мела от герца логарифмическая: $\mathrm{m} = 2595\ \log_{10}(1 + \frac{\mathrm{h}}{700}) = 1127\ \ln(1 + \frac{\mathrm{h}}{700})$, где m– количество мелов, а h – количество герц.

Этапы вычисления мел-кепстральных коэффициентов:

1) Деление сигнала на короткие части (около 25мс длиной каждая)
2) Вычисление оценки периодограммы спектра мощности для каждой части (быстрое преобразование Фурье)[9,10].

3) Применениемелфильтров к спектрам мощности и суммирование энергию в каждом фильтре.Мелфильтры представляют из себя набориз 20-40 треугольных фильтров
4) Вычисление логарифма всех энергий.
5) Вычисление дискретного косинусного преобразования энергии для каждого блока фильтра.
6) Необходимы 2-13 коэффициенты этого преобразования

Поскольку традиционные нейронные сети не способны хранить информацию о предыдущих входах, а идея вынесения вердикта об эмоции в аудиофайле на основе предыдущей информации является ключевой в нашем решении, было решено перейти к рекуррентным сетям[18], а именно сетям LSTM. Для лучшего понимания РНС можно представить, как множество копий одной и той же нейронной сети, каждая из которых передает информацию последующей. Структура, имеющая вид цепочки, говорит о том, что РНС тесно связаны с последовательностями. За последние несколько лет РНС с большим успехом были использованы для решения различных задач, таких как распознавание речи, моделирование языка, перевод, создание описаний к изображениям и др. Большая часть успехов была достигнута с помощью особого типа РНС, называемого LSTM-сетью (longshort-termmemory, долговременно-кратковременная память), который при решении различных задач значительно превосходит стандартный вариант.

Одной из ключевых идей РНС является то, что они должны быть способны использовать предшествующую информацию для решения текущей задачи, например, использовать информацию о предыдущем кадре видео для обработки текущего кадра. В теории, РНС должны справляться с «долговременнымизависимостями», однако в отношении практических задач, к сожалению, реализовать это невозможно[15,16]. В рамках этих исследований были обнаружены фундаментальные причины подобного рода ограничений РНС. Однако, LSTM-сети лишены такого недостатка.

LSTM-сеть[17] – это особый тип РНС, способный обучаться долговременным зависимостям. Такие сети прекрасно справляются с решением многих задач и находят широкое применение в данное время.

LSTM-сети разработаны специально для того, чтобы решить проблему долговременных зависимостей.

Все РНС имеют форму цепочки повторяющихся модулей. Повторяющийся модуль стандартной РНС имеет очень простую структуру, например, единственный tanh-слой (функция активации – гиперболический тангенс). LSTM-сеть представляет собой аналогичную цепочку, но повторяющийся модуль имеет другую структуру. Вместо одного слоя он содержит четыре слоя, которые взаимодействуют особым образом.

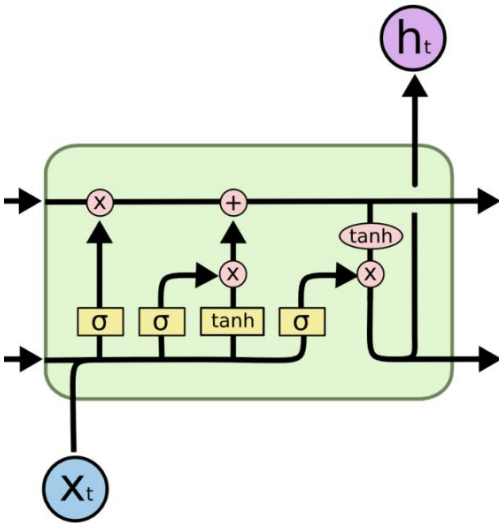


Рис 2. Слой сети LSTM

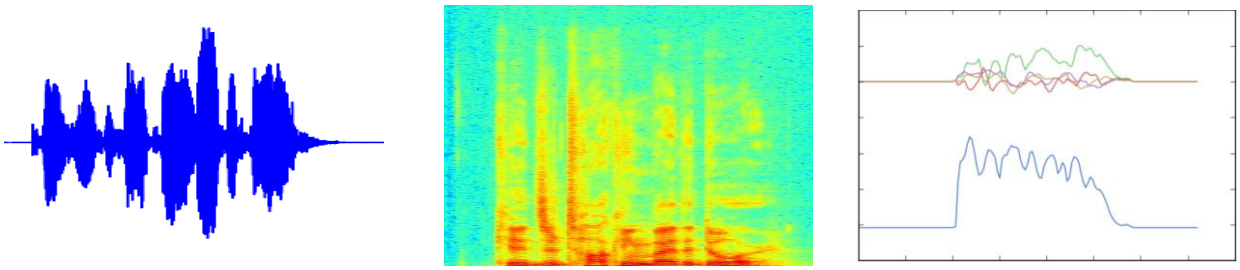


Рис. 3. Слева – осциллограмма - последовательность уровней, соответствующая колебанию мембраны микрофона, записи фразы «Kidsaretakingbythedoor» произнесенной актёром с эмоцией счастья. В середине– соответствующая ей мелспектрограмма. Справа – первые 5 мел-кепстральных коэффициентов.

Апробируемый подход

В настоящее время ряд задач стали эффективно решаться рекуррентными нейронными сетями с долгосрочной и краткосрочной памятью. С их использованием возрослокачество решений задач, где необходимо обрабатывать последовательности данных, например, работа со звуком, распознавание речи, алгоритмы, работающие с текстами и многие другие. В своей работе мы пытались улучшить точность распознавания эмоций с помощью нейронной сети LSTM.

Прежде всего все аудиофайлы должны быть предварительнообработаны. А именно, отнормирована громкость (относительно максимума), применены lowpass и highpass-фильтры (отсечены шумы с частотой ниже 30 Герц и выше 2700 Герц поскольку частота человеческого голоса лежит в диапазоне от 30 Герц до 2700 Герц) , каждый звуковой файл пропускался через VoiceActivityDetection [19] и в конце концов были получены MFCCкоэффициенты.

Данная осциллограмма в явном виде изображает последовательность значения уровней напряжения снятого с мембраны микрофона, дискретизированная через одинаковые малые промежутки времени.

Данная последовательность уровней напряжения в явном виде хранится в аудиофайлах формата wav, как последовательность двухбайтовых или трехбайтовых целых чисел, соответствующих различным 65535 либо 32 миллионам значений уровням напряжения.

Однако, как показано в работах[1,2] осциллограмма и мелспектрограма не дали очень хороших результатов классификации аудио-фрагментов на эмоции. Поэтому в этой работе мы перешли к использованию мел-кепстральных коэффициентов, которая подавались на вход классификатору. А архитектура нейронной сети была заменена на сеть LSTM, поскольку она наиболее подходит для признаков, которые представляют собой некую последовательность связанных наблюдений.

Вычислительный эксперимент.

В качестве обучающей выборки использовался открытый размеченный набор данных “RAVDESS” [14] включающий записи 24 актеров изображающих 8 эмоций: “neutral”, “calm”, “happy”, “sad”, “angry”, “fearful”, “disgust”, “surprised” (96 экземпляров для “neutral”, 120 для “surprised” и по 192 экземпляра для остальных эмоций).

Аудиозаписи прошли описанную выше предобработку, а каждый мел-кепстральный коэффициент представлялся последовательностью из 378 чисел. Для кроссвалидации выборка делилась в соотношении 70% к 30% равномерно по классам.

Наши эксперименты показали, что наиболее оптимальной является модель с двумя LSTM слоями и одним мел-кепстральным коэффициентом (№2) поскольку процесс обучения проходил наиболее равномерно, а модель достаточно простая, имеет хорошее качество и высокую скорость обучения.

Таблица 1

Точность разных классификаторов

Модель	Точность
Генератор случайных чисел	12.5%
Knn + обработанный сигнал	24%
Randomforest +	29%
Svm + обработанный	31%
Vgg11 + spectrogram	64%
Vgg16 + melspectrogram	71%

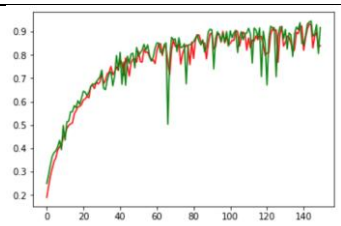
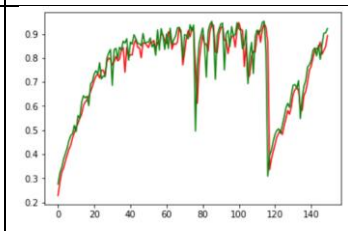
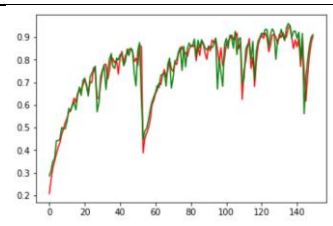
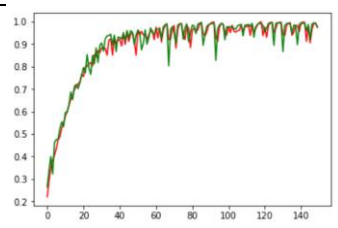
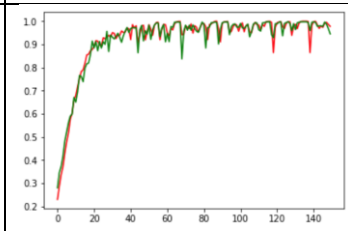
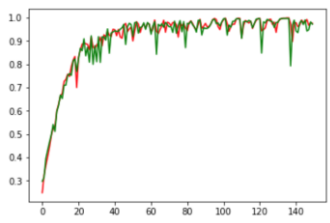
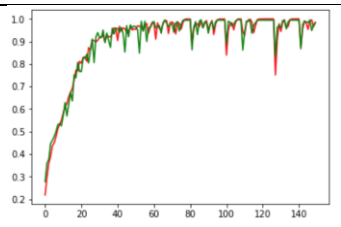
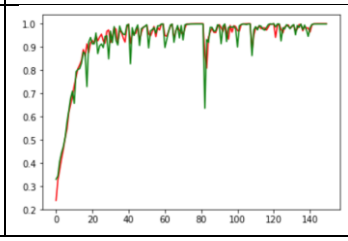
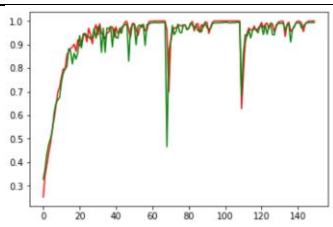
Таблица 2

Наилучшая точность классификаторов

	2 mfcc	2,3 mfcc	2,3,4 mfcc
1 lstmlayer	91.72%	92.19%	91.06%
2 lstmlayer	97.88%	94.50%	97.27%
3 lstmlayer	98.45%	99.86%	99.31%

Таблица 3

Графики зависимости точности классификации от количества эпох обучения (зеленое – обучающая выборка, красное – тестовая)

	2 mfcc	2,3 mfcc	2,3,4 mfcc
1 lstmlayer			
2 lstmlayer			
3 lstmlayer			

Заключение

В настоящей работе был предложен и апробирован подход к классификации эмоций человека в звуковом фрагменте. Проведён численный эксперимент и сравнены результаты работы различных классификаторов, сверточных сетей (VGG-11 и VGG-16) и LSTM сетей с различными наборами признаков. Данный эксперимент показал неожиданный результат – возможность классификации эмоций человека на 8 классов с точностью более 99%.

Статья подготовлена в результате проведения исследования (№ 17-05-0007) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2018 г. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации "5-100".

Библиографический список

1. А. С. Попова, А. Г. Рассадин, А. А. Пономаренко Детектирование эмоций в мультимедиа контенте//Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2017 , 2017. – С. 852-857.
2. Popova A. S., Alexandr G. Rassadin, Alexander A. Ponomarenko. EmotionRecognitioninSound, in: AdvancesinNeuralComputation, MachineLearning, andCognitiveResearch. SelectedPapersfromthe XIX InternationalConferenceonNeuroinformatics, October 2-6, 2017, Moscow, RussiaVol. 736. Cham : SpringerInternationalPublishing, 2017. P. 117-124.
3. Muda, Lindasalwa, MumtajBegam, andIrraivanElamvazuthi. "Voicerecognitionalgorithmsusingmelfrequencycepstralcoefficient (MFCC) anddynamictimewarping (DTW) techniques." arXivpreprint arXiv:1003.4083 (2010).
4. Karpathy, Andrej. "Theunreasonableeffectiveessofrecurrentneuralnetworks." AndrejKarpathyblog (2015).
5. Zheng, Fang, GuoliangZhang, andZhanjiangSong. "Comparisonofdifferentimplementationsof MFCC." JournalofComputerScienceandTechnology 16.6 (2001): 582-589.
6. Евгений Крофто «Как Яндекс распознает музыку с микрофона» //Доклад в рамках конференции «YetanotherConference 2013»
7. Wang A. et al. An Industrial Strength Audio Search Algorithm //ISMIR. – 2003. – Т. 2003. – С. 7-13.
8. Haitsma J., Kalker T. A highly robust audio fingerprinting system with an efficient search strategy //Journal of New Music Research. – 2003. – Т. 32. – №. 2. – С. 211-221. \
9. Oppenheim, Alan V. "SpeechspectrogramsusingthefastFouriertransform." IEEE spectrum 7.8 (1970): 57-62.
10. Cooley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series //Mathematics of computation. – 1965. – Т. 19. – №. 90. – С. 297-301. Ortony A., Turner
11. T. J. What's basic about basic emotions? //Psychological review. – 1990. – Т. 97. – №. 3. – С. 315.
12. Scherer K. R. What are emotions? And how can they be measured? //Social science information. – 2005. – Т. 44. – №. 4. – С. 695-729.
13. Russell J. A., Ward L. M., Pratt G. Affective quality attributed to environments: A factor analytic study //Environment and behavior. – 1981. – Т. 13. – №. 3. – С. 259-288.
14. Livingstone S. R., Peck K., Russo F. A. Ravdess: The ryerson audio-visual database of emotional speech and song //Annual Meeting of the Canadian Society for Brain, Behaviour and Cognitive Science. – 2012.
15. Hochreiter, Sepp, J. urgenSchmidhuber, andCorsoElvezia. "LONG SHORT-TERM MEMORY."
16. Bengio, Yoshua, PatriceSimard, and PaoloFrasconi. "Learning long-termdependencieswithgradientdescentisdifficult." IEEE transactionsonneuralnetworks 5.2 (1994): 157-166.
17. Hochreiter, Sepp, andJürgenSchmidhuber. "LSTM cansolvehardlongtimelagproblems." Advancesinneuralinformationprocessingsystems. 1997.
18. Graves, Alex, andNavdeepJaitly. "Towardsend-to-endspeechrecognitionwithrecurrentneuralnetworks." InternationalConferenceonMachineLearning. 2014.

19. Sohn J., Kim N. S., Sung W. A statisticalmodel-basedvoiceactivitydetection //IEEE signalprocessingletters. – 1999. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-3.

A.S. Popova, A.G.Rassadin, A.A. Ponomarenko

EMOTION RECOGNITION IN MULTIMEDIA CONTENT

National Research University Higher School of Economics – Nizhniy Novgorod

In this paper we consider the automatic emotions recognition problem, especially the case of digital audio signal processing. We consider and verify an approach in which the classification of a sound fragment can be solved using longshort-termmemoryneuralnetwork. The computational experiment was done based on Ravdess open dataset including 8 different emotions: "neutral", "calm", "happy," "sad," "angry," "scared", "disgust", "surprised". The best accuracy result was 99%, which was produced by using LSTM network and MFCC.

Key words: deep learning, classification,MFCC,recurrent neural networks,LongShortTermMemorynetworks (LSTM), audio recognition, emotion recognition, speech recognition, emotions

УДК 004.932.72

А.С. Орлов

ОБНАРУЖЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Исследование подходов к использованию методов теории активного восприятия к задаче выделения автомобилей на кадрах видеопоследовательностей
Методология: Разрабатываемая система базируется на методах теории активного восприятия, что обеспечивает возможность обнаружения автомобилей на кадрах видеопоследовательностей на фоне изображения дорожного полотна.
Результаты: Создан алгоритм, использующий набор фильтров U-преобразования для обнаружения транспортных средств в видеопоследовательности.
Выводы: Подтверждена перспективность использования фильтров U-преобразования для решения задачи обнаружения транспортных средств.

Ключевые слова: теория активного восприятия, видеопоследовательность, распознавание образов, дорожное движение, система видеонаблюдения.

Обоснование необходимости

Контроль за дорожным движением в настоящее время всё чаще осуществляется с помощью автоматических средств фото- и видеофиксации, позволяющих осуществлять мониторинг за движением транспорта и соблюдения Правил дорожного движения их водителями в круглосуточном режиме с возможностью формирования различной отчетности (статистика, штрафы и т. д.) без участия человека [4].

Для решения этой задачи используются различные вычислительные методы и алгоритмы различной степени сложности, такие как сопоставление с образцом, нейросетевые подходы. Несмотря на большое количество предложенных подходов, рассматриваемая задача остается нетривиальной, поскольку функционирование системы распознавания в условиях реального мира сталкивается с различными проблемами, такими как погодные условия, возможное появление на дороге посторонних предметов, людей, нестандартных транспортных средств и т. д. Всё это является основанием для дальнейшего исследования и разработки подходов к решению этой проблемы [5].

Цель работы

Целью данной работы является разработка подхода к распознаванию транспортных средств в видеопоследовательности, полученной с камеры наблюдения за дорожным движением на основе теории активного восприятия (ТАВ) [1].

Теоретический анализ

Рассмотрение задачи о распознавании объектов реального мира возможно выполнить с позиций анализа физического взаимодействия света с поверхностью этих объектов.

Как известно из физики взаимодействия света с веществом, сцена предмета формируется в результате взаимодействия света с заряженными частицами среды [2], при этом характер этого взаимодействия ввиду сложности структуры предметов и их поверхностей на микроуровне зачастую крайне нетривиален.

Так, металлический блеск металлов (использующийся, например, для создания зеркал), обусловлен плотным электронным газом внутри атомной решетки металла, не позволяющим фотонам видимого спектра проходить сквозь неё и поглощаться им, приводя их к отражению.

Прозрачность воды и стекла обусловлена тем, что фотоны света не могут поглотиться электронным газом в (стекловидной) атомной решётке стекла или воды, однако плотность этого газа достаточна для того, чтобы они могли проходить через тело и выходить с противоположной

поверхности стекла.

Более сложным случаем является диффузное отражение, характеризуемое законом Ламберта [3]:

$$I = I_0 \cos(\alpha) \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность отраженного света вдоль вектора нормали к поверхности, α – угол между произвольным вектором направления, исходящим из точки поверхности, и вектором нормали, I – интенсивность отраженного света в данном направлении.

Ввиду широкой распространенности диффузного отражения, характер которого описывается уравнением (1), его анализ на изображении может дать важную информацию о трехмерной конфигурации сцены, экспериментальное подтверждение чего будет рассмотрено далее.

Для решения поставленной задачи кроме физического процесса формирования изображения на матрице видеоустройства также необходимо рассмотреть характеристики исследуемой сцены, задаваемой специфическими условиями эксплуатации системы наблюдения за дорожным движением. Одно из главных преимуществ видеопоследовательностей, получаемых с камеры наблюдения за дорожным движением, состоит в том, что фон остается практически неизменным, за исключением различного освещения из-за смены времени суток и погодных условий. Это позволяет заранее (с помощью тех или иных методов) выбрать в кадре область дороги и сопоставить ей глубину, что, в свою очередь, приведет к экономии вычислительных мощностей, поскольку не потребуется при обработке каждого кадра находить местоположении дороги и полос на ней.

Ещё одним преимуществом, возникающим в данной ситуации, является то, что автомобиль, будучи физическим объектом, вынужден в пространстве кадра двигаться по непрерывной траектории (то есть не может спонтанно «появиться» перед камерой или «исчезнуть» перед ней). Движущийся автомобиль может быть представлен моделью параллелепипеда P_a, движущегося по некоторой непрерывной траектории T в евклидовом пространстве дорожного полотна E^2, которая, как правило, является линейной в зоне обзора камеры на участке дороги. При наличии некоторого количества кадров предыстории при помощи U-преобразования [1] становится возможным формирование врожденного эталона не только для отдельных кадров или их подобластей, но и для последовательности кадров. Основными ситуациями в данном случае являются две: случай, когда область дорожного полотна пуста и случай, когда в данной области движется автомобиль.

В разрабатываемом алгоритме предлагается определить область дорожного полотна одной полосы двумя отрезками L_1 и L_2– отрезками прямых на изображении, которые соответсвуют разграничительным линиям разметки. Установление данных отрезков возможно путём ручного ввода оператором при установке и настройке камеры наблюдения за дорожным движением. Затем целесообразно по вертикали разбить подобласть кадра, ограниченную линиями L_1,L_5, и соответствующую изображению дороги на горизонтальные полосы высотой $h_п$. Каждую полосу, в свою очередь, возможно разбить на набор квадратов, к каждому из которых применить фильтры U-преобразования, получив 16-ти мерный вектор F_{ij}[1], который будет являться врожденным эталоном данной области дорожного полотна при данных условиях освещения. Проезд же автомобиля будет характеризоваться изменением данного вектора для рассматриваемых квадратов, что позволит выделить моменты входа автомобиля в квадрат, выхода из него, и наличия в нём, с помощью чего сформировать подобласть изображения, подаваемую на выход алгоритма как искомое изображение автомобиля для дальнейшего анализа.

Экспериментальная часть

Для экспериментальной апробации разрабатываемой программной системы использовался набор кадров, получаемый с камеры слежения за дорожным движением,

охватывающий длительность в несколько десятков секунд, образец изображения представлен на рис. 1. Кадры, полученный с видеокамеры, представляет собой монохромное изображение размером 680*720 пикселей. Такой размер кадра был выбран из соображений экономии объема памяти и уменьшения требуемого объема вычислений, так как и при таком разрешении достаточно информации для обнаружения движущихся автомобилей. При необходимости различения более мелких деталей автомобиля (например, содержания номерного знака), возможно воспользоваться простым масштабированием полученной при распознавании ограничивающей рамки, содержащий обнаруженный автомобиль.

Рис. 1. Образец кадра, полученного с видеокамеры наблюдения за дорожным движением

Для проверки применимости закона Ламберта был проанализирован график яркости изображения срединной части одной из полос, представленный на рис. 2.

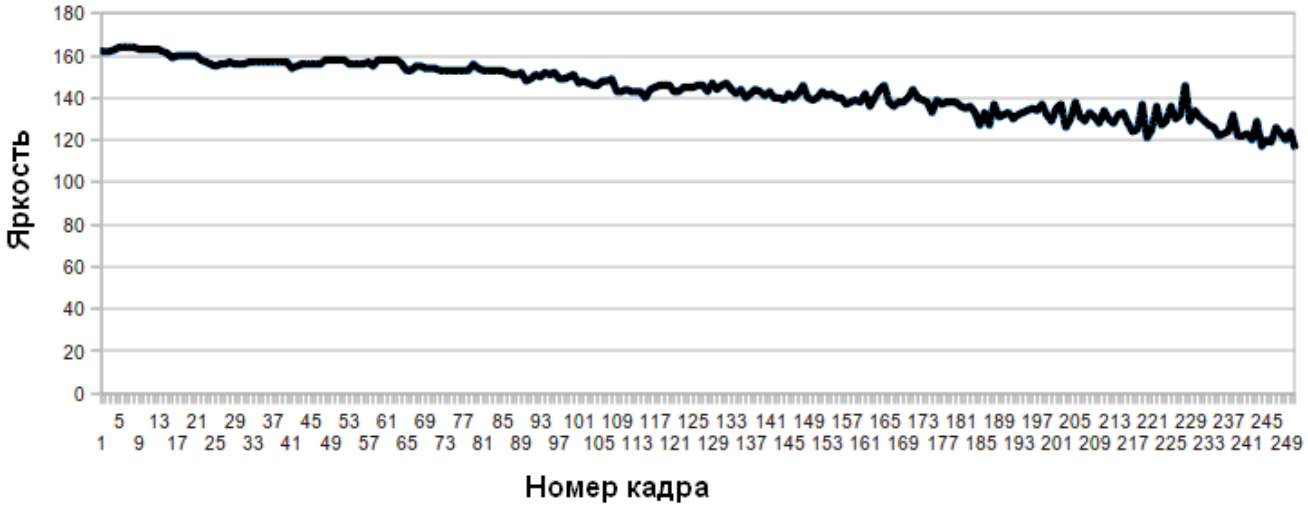


Рис. 2. Яркости точек отрезка на проекции дорожной полосы. По оси ординат отложен номер пикселя, по оси ординат – яркость точки (в диапазоне 0 – 255).

Как следует из рис. 2, яркость точек изображения дороги демонстрирует снижение при уменьшении расстояния до камеры, что соответствует выполнению закону Ламберта при больших значениях угла α и даёт отрицательный знак при использовании фильтров F_1 и F_2. Однако вблизи камеры значение яркости начинает значительно флуктуировать из-за того, что становятся различимыми мелкие детали дорожного полотна, что осложняет ситуацию, однако не является критичным.

В соответствии с предложенным в теоретическом анализе осуществляется ограничение интересующей области дорожного полотна и разбиение её на квадраты, к которым применяются фильтры U-преобразования [1] так, как показано на рис. 3

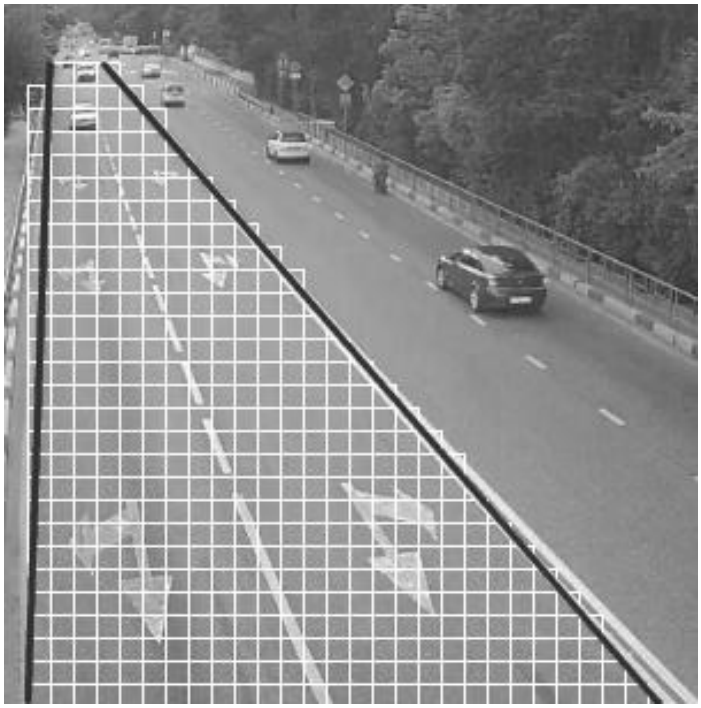


Рис. 3. Разбиение интересующей области изображения на квадраты для дальнейшего анализа

Анализируя изменение вектора F_{ij} для каждого квадрата каждого кадра видеопоследовательности, становится возможным определить моменты входа автомобиля в рассматриваемые квадраты и выхода из него.

Результаты и выводы

Разработанный алгоритм был применен к видеопоследовательности центральной части одной из полос движения на отрезке видеопоследовательности в несколько десятков секунд. Данные автомобили проезжали со значительным интервалом между собой, что позволяло избежать наложения их изображений (рис. 4).

Рис. 4. Результат работы алгоритма на подготовленной видеопоследовательности

Полученный результат позволяет сделать вывод о перспективности избранного подхода, основанного на применении фильтров U-преобразования и имеющемся потенциале для его дальнейшего развития.

Библиографический список

1. Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез: в 2 ч. учеб пособие / В. А. Утробин; Нижегород. гос. техн. уе-т им. Р.Е.Алексеева, 2-е изд, переработанное и исправленное – 2003. - 246 с.
2. Гейко, П.П. Взаимодействие оптического излучения с веществом: учеб. пособие/ П.П. Гейко. – Томск: ТУСУР, 2007. – 164 с.
3. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций.– СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. - 167 с.
4. Занина Т. М., Четверикова А. И. Организационно-правовые аспекты применения средств фотовидеофиксации в системе контроля за безопасностью дорожного движения //Вестник Воронежского института МВД России. – 2013. – №. 1.
5. Загидулина А.Д., Николаева Р.В. Системы наблюдения за дорожным движением с автоматической фиксацией ДТП //Техника и технология транспорта. 2017. № 2 (3). С. 11.

A. S. Orlov

DETECTION OF VEHICLES IN VIDEO SEQUENCE

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

Purpose: Study of approaches for using of methods of the theory of active perception to the task of allocating cars on frames of video sequences.
Methodology: The system under development is based on the methods of the theory of active perception, which makes it possible to detect cars on the frames of video sequences in the background of the image of the roadway.
Results: An algorithm that uses a set of U-transform filters to detect vehicles in the video sequence was developed.
Conclusions: The prospects of using U-conversion filters for solving the problem of vehicle detection have been confirmed.

Key words: theory of active perception, video sequence, pattern recognition, traffic, video surveillance system.

УДК 004.931

В. Е. Гай, А. П. Густякова

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВРЕДОНОСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КАМЕРУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена алгоритму детектирования вредоносного воздействия на камеру. Актуальность этой темы возникает из - за роста необходимости автоматизации систем видеонаблюдения. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы на основе теории активного восприятия.

Ключевые слова: теория активного восприятия, детектирование вредоносного воздействия на камеру

Описание задачи детектирования вредоносного воздействия на камеру

Места скопления людей, такие как торговые центры, аэропорты, общественный транспорт, зачастую оснащены большим количеством камер наблюдения.

Одновременное наблюдение за изображениями с этих камер в течение длительного времени является достаточно сложной задачей, даже для наиболее опытного персонала службы безопасности. Поэтому, очевидно, что введение автоматизации в данный процесс может значительно улучшить эффективность системы наблюдения. Одной из основных проблем здесь является проблема обнаружения вредоносного воздействия на камеру. В данном случае под вредоносным воздействием понимается любое событие, которое резко изменяет изображение, получаемое с камеры. Некоторые примеры вредоносного воздействия: человек, держащий руку перед камерой, распыление спрея на камеру или ее поворот на другую область обзора. Важно понимать, что вмешательство в работу камеры не всегда преднамеренное. Если рассматривать преднамеренное вмешательство, то, как правило, оно предполагает подозрительную деятельность, для наблюдения за которой должен быть предупрежден персонал службы безопасности. Однако обнаружение непреднамеренное вмешательства может производиться с целью отслеживания работоспособность камеры.

Детектированиевредоносного воздействия на камеру должно производиться своевременно, чтобы его можно было успеть обнаружить.

Настоящая работа посвящена применению теории активного восприятия (ТАВ) к решению задачи детектирования вредоносного воздействия на камеру.

Обзор подходов к детектированию вредоносного воздействия на камеру

Различные исследования проводились в отношении выявления вредоносного воздействия на камеру. Например, работы [1,6] и [7] посвящены технике «водяных знаков» для обнаружения искажений на изображениях. Техника «водяных знаков» заключается в выявлении искажающих изменений, проявившихся при обработке изображений, с помощью сравнения коррелированных значений из областей изображения. Данные работы рассматривают важные аспекты обнаружения дефектов на изображениях, однако они не являются напрямую связанными с проблемой фальсификации данных камеры, так как целью исследования является создания системы, контролирующей данные с камеры в реальном времени.

Некоторые работы посвящены оценке движения на видео. Так, в работе [8] используется метод факторизации используется для оценки структуры движения. В работе [9] для этой же цели используется метод наименьших квадратов. Эти работы являются наиболее значимыми в этой области. Данные методы и аналогичные им полезны при выявлении фальсификации данных в тех случаях, когда человек изменяет направление камеры на другой угол обзора. Однако обе работы не рассчитаны на применение в условиях изменчивости среды. Также, в задаче детектирования негативного влияния не так важна оценка движения на видео, сколько фиксирование события вмешательства в работу камер.

Для того чтобы выявить иные способы влияния на достоверность данных видеонаблюдения, такие как, например, попытка чем-либо закрыть объектив камеры или подмена изображения существует несколько алгоритмов.

Например, в работе [5] особое внимание уделяется рассмотрению переходов в видеоизображении с помощью интерполяцией B-сплайнами. Однако здесь подход рассчитан на медленные переходы в видеоряде, что не всегда будет иметь отношение к фальсификации.

В работе [2] авторы моделируют каждый снимок как набор граней на изображении, и отслеживают их изменения, делая снимок при резком изменении граней. Этот метод также недостаточно точен в определении вредоносного влияния, так как, например затемнение/загораживание объектива может происходить постепенно, без резких смен границ.

В работе [10] авторы пытаются определить изменения в изображениях видеоряда с камеры с помощью использования алгоритма, основанного на анализе цветовых гистограмм для выявления значительных изменений картины.Аналогичным способом в работе [3] используются цветовые гистограммы вместе со значениями пикселей изображения для нахождения различий между изображениями. Методы, основанные на использовании гистограмм, хорошо подходят для обнаружения фальсификации данных с камер, так как они предлагают глобальные измерения содержимого изображения и чувствительны к большинству типов изменений в изображении независимо от их характера или природы.

Таким образом, алгоритмы обнаружения негативного влияния на камеру должны быть чувствительны к любым значительным движениям на камере. Количество ложных обнаружений фальсификации должны быть сведено к минимуму, для того чтобы не отвлекать службы безопасности каждый раз, когда событие обнаружено. Важно отметить, что негативное воздействие на камеру является устойчивым событием, которое может происходить как быстро, так и плавно, и, следовательно, необходимо производить сложные и правильные сравнения между кадрами видео, для обнаружения фальсификации.

Подход к детектированию вредоносного воздействия на камеру с помощью TAB

В общем смысле все подходы к детектированию влияния на камеру основаны на следующих этапах:

- Предварительная обработка изображения –изображения видеоряда представляются в подходящем виде для их последующей обработки
- Построение признакового описания объекта –формируется набор признаков, позволяющий однозначно описать объект.
- Принятие решения –негативное воздействие произошло/не произошло.

В данном подходе, применяющем TAB, признаковое описание объекта производится с помощью нахождения ключевых точек. Определение этих точек позволяет представить объект в виде набора особых точек, которые свойственны данном объекту и могут быть в последствии использованы при принятии решения о воздействии.Представление изображений в виде набора ключевых точек позволяет сократить размер его описания и соответственно увеличить скорость обработки.

Схема, описанных выше этапов представлена на рис. 1:

Теория активного восприятия [11] 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. На основе полученных спектральных коэффициентов формируется набор ключевых точек. На этапе принятия решения производится сравнение ключевых точек изображений видеоряда. Для большей точности, каждое изображение разбивается на несколько областей.

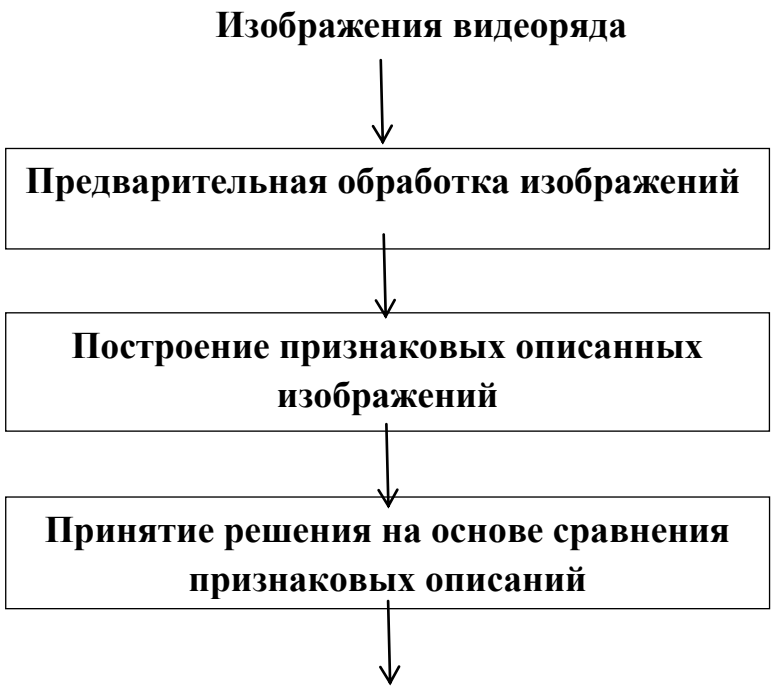


Рис. 1

Результат

Во время видеосъемки производятся следующие вычисления: все кадры проходят предварительную обработку, вычисляются их спектральные коэффициенты, формируются наборы ключевых точек. Далее производится сравнение ключевых точек по их координатам. В «идеальном» случае – когда на камеру не оказано никакого воздействия – все точки будут оставаться на своих местах на протяжении всех кадров. Однако, в случае воздействия, будет иметь место сильное различие между набором ключевых точек в момент воздействия от того набора, что имел место до этого. В момент воздействия ключевые точки могут либо пропасть вовсе (закрыли объектив, подставили изображение), резко сменить координаты (изменили угол обзора), частично поменяться (закрыли часть объектива). На основе анализа координат ключевых точек производится принятие решения о совершении воздействия на камеру.

Заключение

Таким образом, данный способ детектирования негативного воздействия на камеру позволяет производить вычисления в режиме реального времени, устойчив к определению внедрений в работу камеры разного рода, способен улавливать как быстрые, так и происходящие постепенно изменения видеоряда, подходит не только для выявления вредоносного воздействия на камеру, но также и для обнаружения помех в работе самого устройства.

Библиографическийсписок

1. Fridrich, J., “Image Watermarking for Tamper Detection”, Proc. of ICIP 1998, vol. 2, pp. 404-408, 1998.
2. Heng, W.J. and Ngan, K.N., “Integrated Shot Boundary Detection Using Object-Based Technique”, Proc. of the Int’l Conf. on Image Processing 1999, vol. 3, pp. 289-293, October 1999.
3. Huang, C.-L. and Liao, B.-Y., “A Robust Scene Change Detection Method for Video Segmentation”, IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 11, pp. 1281-1288, December 2001.
4. Muller, K.L. et al. “An Introduction to Kernel Based Learning Algorithms”, IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 12, no. 2, pp. 181-201, March 2001.

5. Nam, J. and Tewfik, A.H., "Detection of Gradual Transitions in Video Sequences Using B-Spline Interpolation", IEEE Trans. on Multimedia, vol. 7, no. 4, pp. 667-679, August 2005.
6. Roberts, D.K., "Security Camera Video Authentication", Digital Signal Processing Workshop 2002 and the Signal Processing Education Workshop 2002, pp. 125-130, October 2002.
7. Swanson, M.D. and Tewfik, A.H., "Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies", Proc. of IEEE, vol. 86, no .6, pp. 1064-1087, June
1998.
8.Tomasi, C. and Kanade, T., "Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: a Factorization Method", IJCP, vol. 9, no. 2, pp. 137- 154, 1992.
9.Weng, J. et al. "Optimal Motion and Structure Estimation", IEEE Trans. on PAMI, vol. 15, no. 9, pp. 864-884, September 1993.
10. Zhao, W. et al. "Improving Color Based Video Shot Detection", IEEE Int'l Conference on Multimedia Computing Systems, vol.2, pp.752-756, June 1999.
11. Утробин В. А. Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, Т. 174, № 10, 2004, С. 1089–1104.

Gai V.E., Gustyakova A.P.

CAMERA TAMPERING DETECTION

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

The article describes a novel technique for detection of camera tampering. The relevance of this work arises from the need of automation in video surveillance systems and real-time detecting of camera tampering. The approach is based on the theory of active perception.

*Key words:*theory of active perception, camera tampering detection.

УДК 004.931

И.М. Ефоде, В.Е. Гай

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА СОЗДАНИЯ НАБОРОВ РАЗМЕЧЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Настоящая работа работа посвящена модели разметки «сырых» данных для обучения алгоритмов компьютерного зрения, полученных с различных источников. Актуальность данной темы возникает из структуризации постоянно увеличивающихся объемов данных и последующей их автоматизированной обработкой. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы на основе теории машинного обучения и компьютерного зрения, а также анализа больших данных.

Ключевые слова: распознавание образов, алгоритмы машинного обучения и компьютерного зрения, анализ больших данных, разметка «сырых» данных.

Введение в «большие данные»

Практически каждый человек в современном мире слышал термин «Большие данные» (*англ. «Bigdata»*), но все ли действительно понимают сущность данного явления? Применяют ли данное определение правильно? Оценивают ли корректно объем информации, собирающейся из дня в день?

Сегодня под термином «Большие данные» программисты и аналитики понимают огромное количество многообразных структурированных и неструктурированных данных, обратываемых программным и аппаратным инстументарием. Но экономисты и социологи подразумевают под данным определением социально-экономический феномен, связанный с появлением технологических возможностей анализа больших массивов разнообразных данных и, как следствие, их трансформации.

В научной литературе большие данные характеризуются так называемыми 3V–объем (*англ. «Volume»*), скорость (*англ. «Velocity»*) и многообразие (*англ. «Variety»*). Многие современные источники добавляют к этому жизнеспособность (*англ. «Viability»*), ценность (*англ. «Value»*), достоверность (*англ. «Veracity»*), переменчивость (*англ. «Variability»*) и визуализацию (*англ. «Visualization»*). Но не смотря на все это, неименными и максимально употребляемыми остается именно правило 3V.

Впервые термин «Большие данные» был применен редактором журнала NatureКлиффордом Линчем 3 сентября 2008 года в статье «Как могут повлиять на будущее науки технологии, открывающие возможности работы с большими объемами данных?» к феномену взрывного роста объемов и разнообразия поступаемых на обработку данных и технологических перспективах, открывающихся в связи с появлением данного явления. Спустя всего год данное название стало широко употребляемо в прессе, а немного позже ведущие компании-разработчики, такие как Microsoft, Google, Intel, Dell, HP, IBM, Amazoni другие стали применять это определение и к своим решениям, как аппаратным, так и программным.

Действительно, если изучить статистику поступаемых на хранение данных, то любой человек, хоть немного привлеченный к математическим наукам, отследит экспоненциальную зависимость количества хранимых данных от течения времени (что отображено на рис.1). Причем, стоит отметить тенденцию к сильному увеличению поступления именно цифровых, а не аналоговых данных, поступаемых с различных источников, а также переломный момент в приросте появления такого рода информаци - как раз тот период времени, когда Линч дал название подобному явлению.

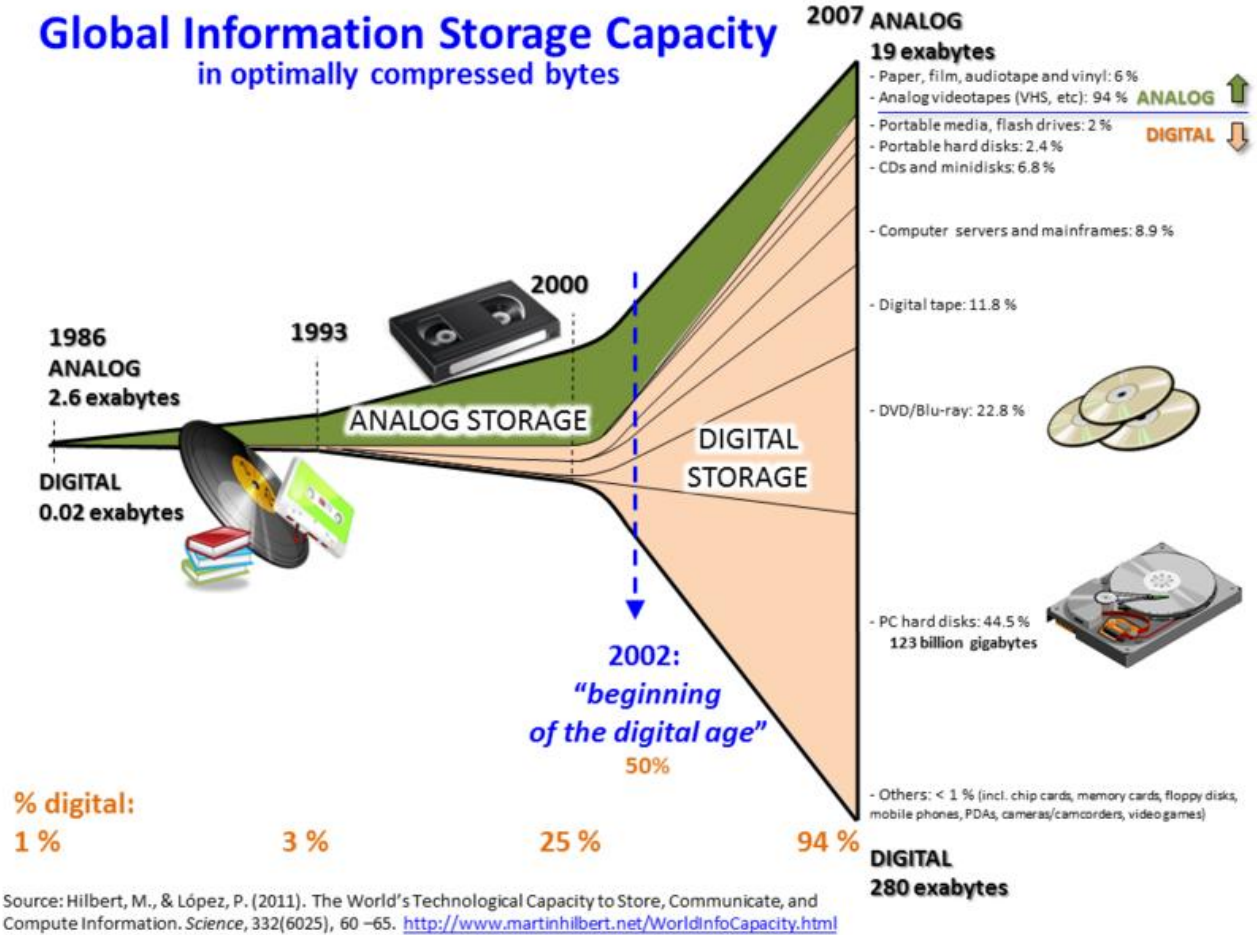


Рис.1.Рост данных, поступающих на обработку и хранение

Также в это время сильный толчок к развитию и широкому использованию отрасли получили такие отрасли информационных технологий как аналитика данных (*англ. «Datascience»*), искуственный интеллект (*англ. «Artificial Intelligence»*) (а именно искуственные нейронные сети (*англ. «Artificial neural networks»*) и компьютерное зрение (*англ. «Computervision»*)), а также имитационное моделирование и многие другие.

Сегодня основными источниками самых разнообразных данных, стекающихся в огромные центры хранения данных самых крупных игроков на рынке IT-отрасли, являются интернет вещей, телеметрия, социальные сети и медиа, а также сбор статистической информации. Почти в ста процентах случаев «сырые» данные являются неструктурированными или плохо структурированными, а значит, как следствие, требуют обработки. Именно для решения данной задачи и нужна разметка, а именно ручная разметка данных с целью последующей автоматизации стуктуризации огромных массивов данных с помощью алгоритмов машинного обучения, а зачастую и компьютерного зрения. В данной статье рассматривается именно второй случай, то есть разметка потоков изображений и видео с целью последующего распознавания образов на поступающих потоках алгоритмами компьютерного зрения.

Огромные компании уже создали или еще только проектируют свои кластеры для хранения данных, разработано множество алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения, но головной болью для разработчиков по-прежнему является создание наборов размеченных данных, способных обучить систему распознавать и классифицировать данные по заранее определенному набору признаков, поэтому тема разметки «сырых» данных так интересна для рассмотрения.

Описание задачиподготовки данных для машинного обучения алгоритмов компьютерного зрения

В последнее время транснациональные корпорации такие как Яндекс (Яндекс Toloca, DataFactoryи другие), Microsoft (MicrosoftAzure), Google (GoogleCloud), Intel (GoSDK) и многие другие, заинтересованы в создании целых программных комплексов, включающих в себя полный набор компонентов для алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения – от сбора данных и преобразования их в форматы, доступные для разметки, и до программ, позволяющих распознавать данные с помощью уже обученного алгоритма.

Прежде всего для любого алгоритма необходим некоторый набор входных данных. В случае алгоритмов машинного обучения с учителем, а чаще всего применяется именно этот случай, нам необходимы данные, из которых нужно выделить необходимую информацию, а также, собственно ответы – то есть уже размеченные данные, которые помогают установить коэфициенты связи между нейронами в искуственной нейронной сети, то есть собственно структурировать и классифицировать данные.

Вообще говоря, можно выделить несколько этапов подготовки данных для алгоритмов машинного обучения:

- Сбор данных –автоматизированное коллекционирование «сырых» данных, полученных с различных источников (например, изображения с камер; набор трехмерных точек, характеризующих окружающее пространство, с внешнх сенсоров; данные о погоде и так далее). Кроме реального сбора данных для алготмов машинного обучения также можно воспользоваться готовыми дата-сетами, собрать данные из сети Интернет, а также симулировать данные при помощи специализированного программного обеспечения, которые помогают создавать данные полностью идентичные тем, которые могут быть получены в реальных условиях;
- Разметка данных – классификация данных, полученных на этапе сбора. Данный этап будет рассмотрен в данной статье чуть позже;
- Доступ к данным и их хранение – аккумулирование размеченных данных в дата-центрахс использованием специализированных баз данных в виде пар типа – исходное изображение в формате JPEG\размеченные данные в спецализированном формате типа JSON, XML и другие;
- Подготовка данных для обучения конкретного алгоритма–накопление, просмотр размеченных данных с целью корректировки, а также их отбор для алгоритмов (например, чтобы избежать переобучение алгоритма), а также адаптация данных для конкретного алгоритма;
- Визуализация данных – отображение вручную (но может быть и автоматически) размеченных данных с использованием специального программного обечечения.

Отсюда можно сделать вывод, что для автоматизации обработки больших данных прежде всего необходимо разметить аналогичные данные. Рассмотрим данный вопрос подробнее.

Задача разметки данных для обучения алгоритмов компьютерного зрения

Для разметки данных прежде всего аналитику (или программисту) необходимо определить некоторый набор правил, отображающих объекты (или фич), подлежащие разметке, а также формат хранения размеченных даных.

Этап определения спецификации объектов включает в себя не только регистрацию самого типа объекта, но и определения его аттрибутов и их аттрибутов, в том числе фигуры (например, полигон, прямоугольник, точка, параллелепипед и так далее), которой объект на изображении будет размечен, если это разметка данных с целью обучения алгоритмов компьютерного зрения. Приведем пример такого рода спецификации:

```
    “Face” : {
        “Description” : “Is area of image contain human face”,
        “Attributes”: { [
            “Age” : {
                “ValueType”: “NUMBER”
            },
            “Box_2d”: {
                “ValueType”: “BOX_2D”
            },
            “Sex” : {
                “ValueType”: “STRING”
            },
            “VISIBLE”: {
                “ValueType”: “BOOLEAN”
            }
        ] }
    }
```

Опишемданныйпример. В данном случае был описан объект «Лицо», у которого есть аттрибуты: возраст (тип - число), пол (тип - строка), видимость (тип - логический), а также фигура для отображения метки на изображении (тип - прямоугольник). Стоит отметить, что приведенный пример описан в формате JSON, который чаще всего применяется для алгоритмов машинного обучения.

Теперь рассмотрим пример размеченных данных, также в формате JSON-файла:

```
“ImageName”: “women_191082.jpeg”,
“Labels”: [
    {
        “ObjectId”: “2”,
        “ObjectAttributes” : {
            “Age”: “18”,
            “Box_2d”: {
                “x” : “12”,
                “y” : “15”,
                “h” : “58”,
                “w” : “67”
            },
            “Sex”: “Woman”,
            “Visible”: “TRUE”
        }
    }
]
```

Опишем пример: на изображении “women_19082.jpeg” была отмечена женщина 18 лет, идентификатор объекта после разметки стал равен 2, а также мы можем увидеть прямоугольник, выделяющий область лица на исходном изображении, у которого задан один из углов, а также ширина и высота.

В принципе, алгоритмы разметки это многократное тегирование объектов в исходных данных. Этот принцип отображен на рис.2.

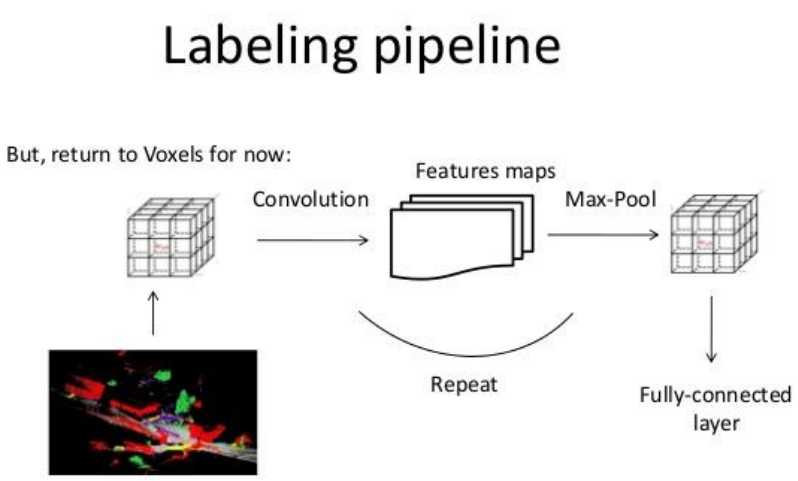


Рис.2.Алгоритмы разметки данных для алгоритмов машинного обучения

Разработка программной среды для разметки изображений

Для разработки программного обеспечения для разметки данных прежде всего необходимо разработать архитектуру приложения, а также определить характер взаимодействия компанент, количество которых процианально функциональности, предоставляемой данным приложением. Для своего проекта я реализовала архитектуктуру, представленную на рис.3

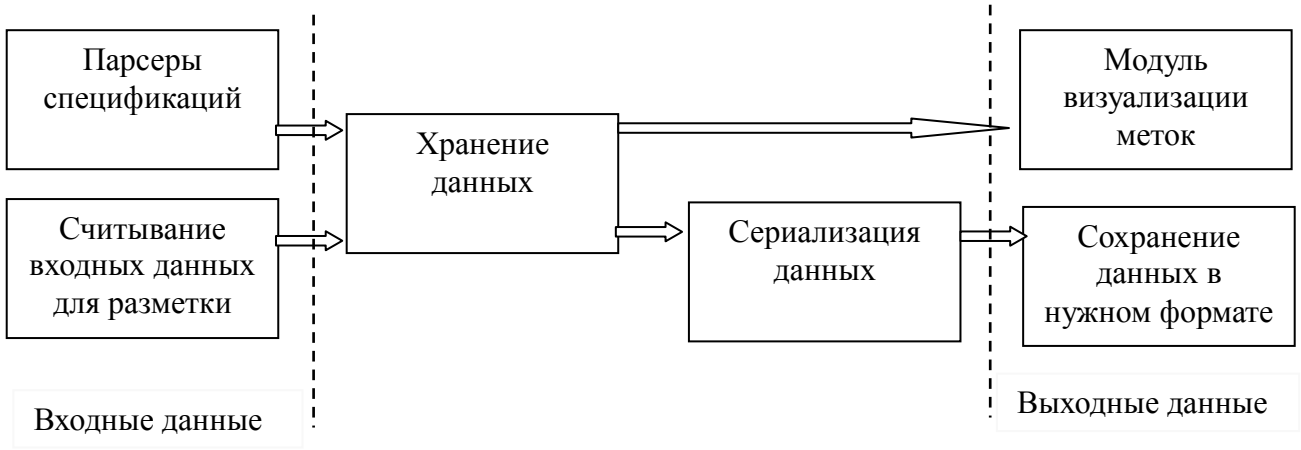


Рис.3. Архитектура простейшего приложения для разметки данных

Ядром системы является модуль, отвечающий за хранение данных и именно он связан с практически всеми основными компанентами.

Заключение

Результатом работы является создание теоретической модели системы разметки «сырых» данных с целью создания сетов размеченных данных для алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения. В данной статье был рассмотрен основной подход к решению данной задачи, а также приведены реальные примеры. Также, как результат работы, стоит отметить создание десктопного приложения для разметки фотографий.

Библиографический список

1. MinChen, ShiwenMao, YinZhang, VictorC.M. Leung. Big Data. Related Technologies, Challenges, and Future Prospects. —Spinger, 2014. — 100 p.

2.Алан Моррисон и др. Большие Данные: как извлечь из них информацию (рус.). Технологический прогноз. Ежеквартальный журнал, российское издание, 2010 выпуск

3. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. — Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999

4. Флах П. Машинное обучение. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 400 с.

5. I. H. Witten, E. Frank Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Second Edition). — Morgan Kaufmann, 2005.

Gai V.E., Efode I.M.

PROGRAM SYSTEM FOR CREATING SETS OF LABELED DATA FOR TRAINING COMPUTER VISION ALGORITHMS

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

The present work is devoted to a model for labeling of "raw" data obtained from various sources for the training of computer vision algorithms. The relevance of this topic is related to the structuring of constantly growing amounts of data and their subsequent automatic processing. The article will consider the approach to resolving this problem on the basis of the theory of machine learning and computer vision, as well as analysis of large data.

Key words: recognition of images, algorithms for machine learning and computer vision, analysis of large data, labeling of "raw" data.

УДК 528.854

М.О.Дербасов, В.Е. Гай

АЛГОРИТМ ПОИСКА ЗВУКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В БАЗАХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Данная статья посвящена описанию алгоритма поиска звуковых последовательностей, основанном на теории активного восприятия. Проводится вычислительный эксперимент для проверки возможностей данного алгоритма.

Ключевые слова: теория активного восприятия, поиск звуковых сигналов, база данных

Введение

Современный мир накладывает всё более высокие требования к технологиям обработки информации. С момента появления в 1994 году системы WebCrawler, первой позволявшей делать полнотекстовый поиск, до современных поисковых систем, понимающих смысловую нагрузку запросов, технологии поиска по текстовым документам шагнули далеко вперед, однако методы и способы поиска по базам звуковых записей еще находятся в “начале своего пути”. Одной из проблем, препятствующих их развитию, является сложность построения системы признаков. Звуковой сигнал куда более сложно свести к описательной форме на основе эффективной в использование системы признаков, нежели изображение, которое, например, может быть сжато до пары сотен пикселей и их всё равно может быть различимым. Одним из подходов к получению системы признаков являются преобразование Фурье, мел-частотные кепстральные коэффициенты и теорию активного восприятия.

Информационная модель

В основе нашей системы лежит метод условного рекурсивного спуска по звуковому сегменту для получения его отпечатка.

Первым этапом которого является подготовка. Она включает в себя ресемплинга и нормирования к диапазону [0, 1] и разделение сигнала на сегменты определенной длины (см. рис. 1). На этом подготовка входных данных заканчивается.

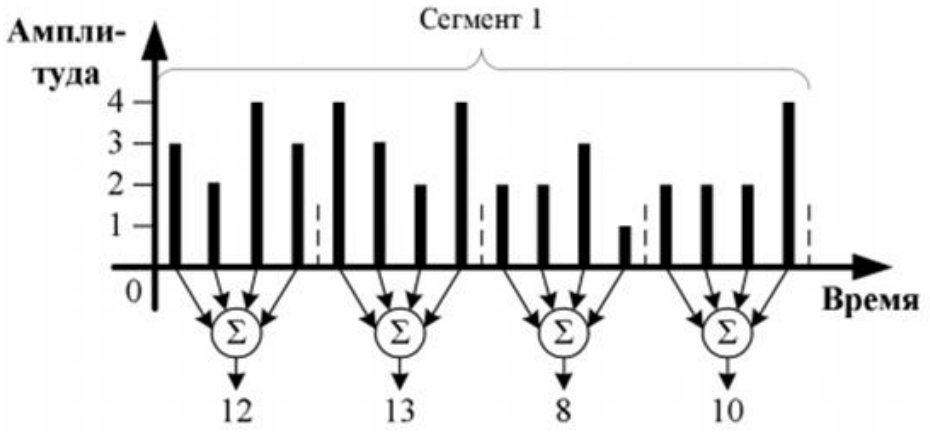


Рис. 1. Предварительная обработка сигнала

Для применения U-преобразования, каждый сегмент делится на 16 частей и каждая из них суммируется [1,2]. После чего к полученному вектору сумм применяется U-преобразование, реализуемое с помощью фильтров (см. рис. 2).

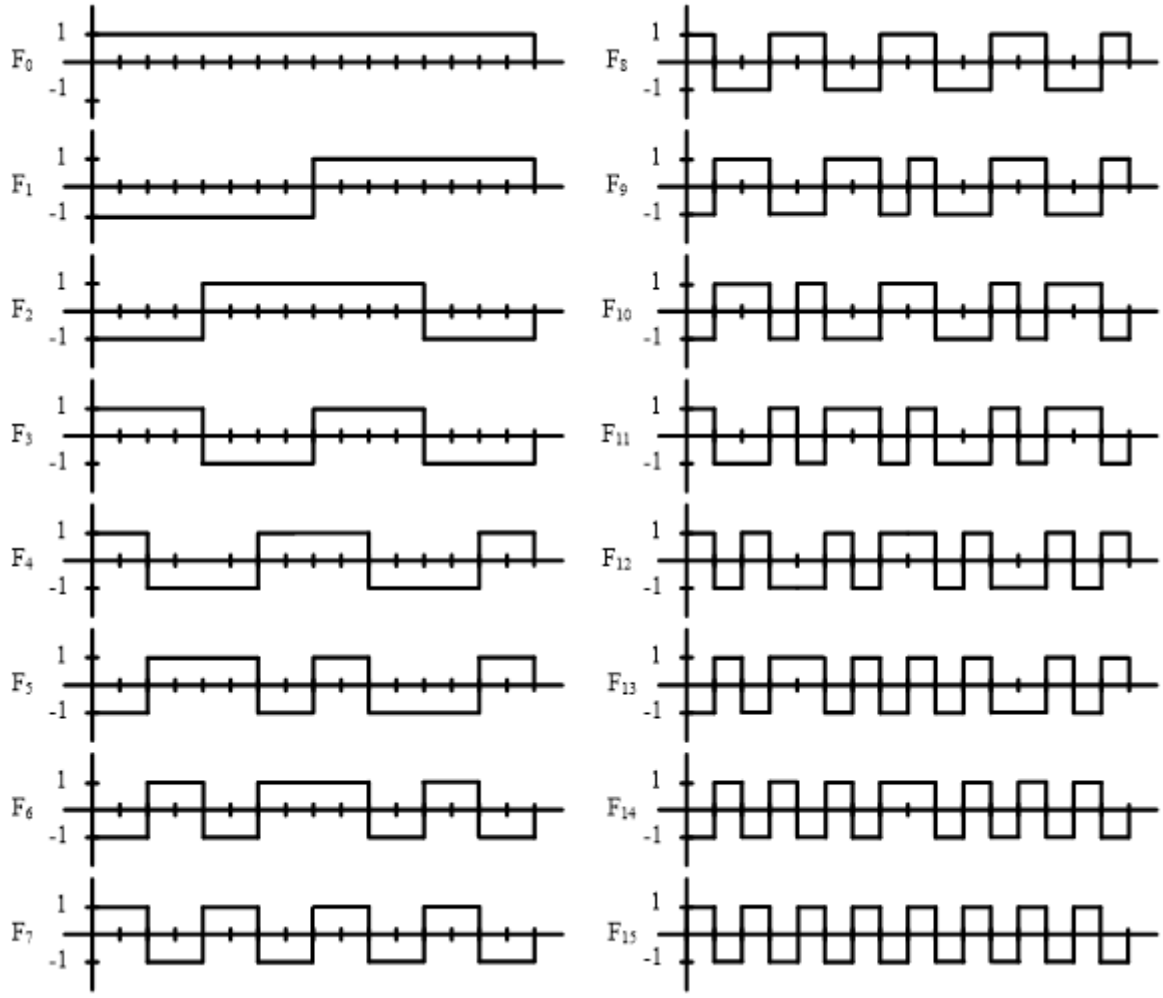


Рис. 2. Фильтры для реализации U-преобразования

В результате получаем вектор из 15 значений, к которым применяем функцию сигнум. От этого преобразования вычисляет вектор значений знаков. Далее воспользуемся расстоянием Хэмминга для определения направления рекурсивного спуска, для этого мы рассчитаем его между вектором значений знаков и векторами $T_1 = \{1,1,1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1\}$ и $T_2 = \{-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,1,1\}$. В случае если расстояние будет минимальным с первым вектором, то мы выбираем левую половину исходного сегмента, иначе правую. Над ней проводятся все указанные выше действия, начиная с U-преобразования. Информация о выборе одной из двух половин должна сохраняться для определения места нахождения в хранилище [3].

Эффективность разрабатываемой системы зависит от способа хранения и поиска подходящего фрагмента. В реальных условиях поиск может происходить среди миллионов записей, что конечно же требует крайне продуманного подхода. Для этого была разработана двухуровневая система хранения и поиска отпечатков сигнала. На верхнем уровне используется двоичное дерево, размещение элемента в котором происходит согласно переходам при рекурсивном спуске по сегменту. Этот уровень позволяет провести довольно крупногранулярное деление, которое может позволить заложить в дизайн верхнеуровневый параллелизм, например деление по различным серверам поиска по второму уровню.

На втором уровне происходит выбор среди коротких последовательностей. Использование последовательностей, даже если из двух элементов обусловлено вопросом быстрого отсечения одинарных одинаковых фрагментов. Другими словами, мы полагаем, что

вероятность возникновения коротких одинаковых последовательностей между двумя файлами меньше, чем вероятность равенства одного фрагмента в двух разных композициях. Для генерации ключа поиска используется значения функции сигнум после первого U преобразования фрагмента сигнала. Поскольку используется несколько фрагментов, то объединяются вектора значений функции сигнум. В случае последнего элемента он дополняется его единицами до нужной длины. Далее получившийся вектор переводится в набор битов, где, к примеру, положительный знак преобразуется в ноль, а отрицательный становится единицей. Таким образом формируется получаем набор битов, который можно интерпретировать как беззнаковое целое число. Это число и будет использоваться как ключ при поиске.

Для пояснения потребности во втором слое, проведем небольшой мысленный эксперимент. Для простоты будем считать, что данные имеют достаточную энтропию и все события равновероятные. Предположим что у нас имеется 10e9 звуковых фрагментов, которые мы хотим разместить в нашей базе. Данное число может показаться большим для наших целей, но стоит упомянуть что размер такого фрагмента составляет менее секунды. Пусть глубина разбиения у нас будет равняться 6. Тогда и на первом уровне у нас будет дерево глубиной 6. Значит мы сможем разделить пространство на 64 части, в каждой из которых окажется около 16 миллионов записей. Далее предположим что мы будем генерировать ключ, методом описанным выше, только для одного фрагмента. Тогда его диапазон будет от нуля до 2e16-1. И в одном ключе на втором уровне окажется порядка 240 фрагментов. Число кажется небольшим, но поскольку мы ищем последовательности, из него последует выборка каждого последующего для всех 240 элементов фрагмента, что увеличит количество операций ввода-вывода и негативно повлияет на производительность. Если же мы будем рассчитывать ключ хотя бы для двух последовательных элементов, то его диапазон будет от нуля до 2e31-1. Тогда коэффициент заполнения для каждого возможного ключа будет сильно меньше единицы. Хоть мы сделали некоторые допущения в нашем мысленном эксперименте и в реальности данные не будут распределяться столь равномерно, даже с неравномерностью в пару порядков мы не будем большого количества коллизий в отдельных ключах.

При поиске произвольного сигнала в базе одним из основных требований является длина, она должна быть не менее N длин последовательностей. Это требование появляется из механизма поиска, который двигаясь с первого отсчета входного сигнала с некоторым шагом, ищет возможную последовательность. Это может показаться расточительным, но при хорошем отсечение во время поиска процесс должен проходить достаточно быстро.

Вычислительный эксперимент

В вычислительный эксперимент проводился на базе из 1000 музыкальных композиций. Средняя длина трека около трех минут. Шаг сдвига начала был выбран равным 10 отсчетам. Также был применен шум в 10 и 20 дБ для проверки стабильности поиска. Ниже приведен график наиболее репрезентативных измерений (см. рис. 3). Опущенные значения не имели больших негативных отклонений и не показаны для сохранения размера статьи.

Как видно на приведенном ниже графике, использование более длинной последовательности позволяет с большей вероятностью найти интересующий нас трек. Так же благотворно влияет глубина рекурсивного разбиения звукового сегмента.

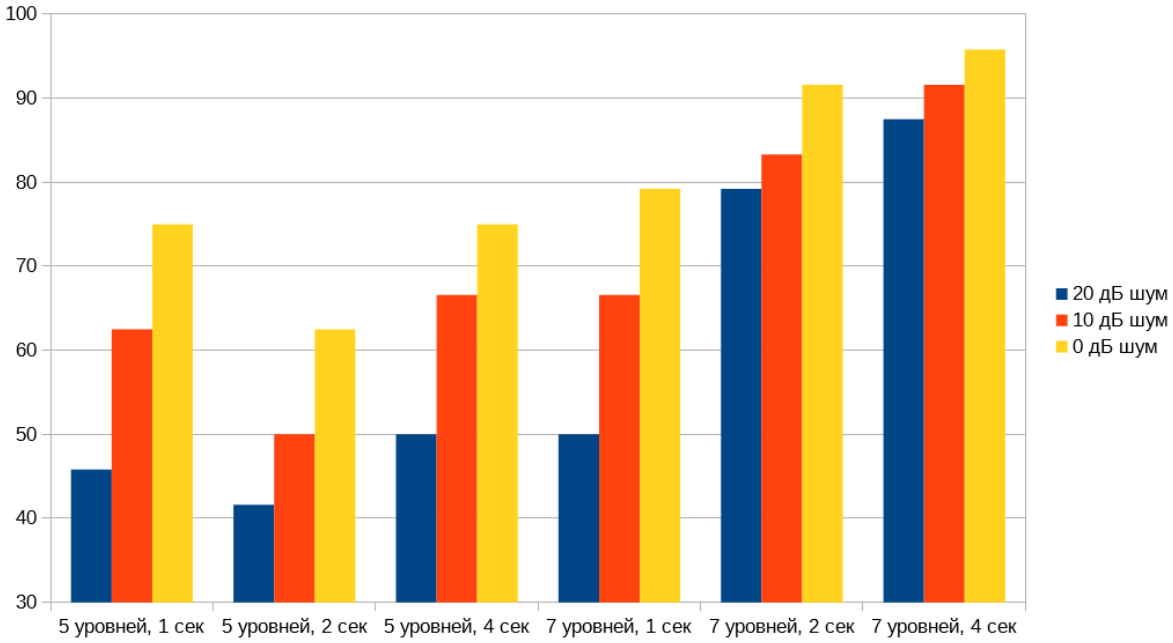


Рис. 3. Результат вычислительного эксперимента

Заключение

В данной работе рассмотрен подход к построению модели и алгоритма поиска сигнала в звуковых базах данных. На практике данная разработка может применяться для поиска интересующих звуковых фрагментов. Например, в криминалистике, для установления сходства двух голосов. Либо в музыкальной индустрии для выявления плагиата среди исполнителей и композиторов. В отличие от известных методов поиска, которые в основном используют грубый перебор и сравнение признаков сигнала, в данном алгоритме идет последовательное, сначала грубое потом с каждым шагом более точное, нахождение звукового фрагмента в базе данных.

Список литературы

1. Утробин В.А. Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, Т. 174, № 10, 2004, С. 1089–1104.
2. Гай В.Е. Метод обработки биометрической информации в системах контроля и управления доступом // Труды Нижегородского государственного технического университет им. Р.Е. Алексеева: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013, № 8 (94). – С. 65-32.
3. Гай В.Е. Метод обработки биометрической информации в системах контроля и управления доступом // Труды Нижегородского государственного технического университет им. Р.Е. Алексеева: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013, № 8 (94). – С. 65-32.

M.O. Derbasov, V.E. Gai

ALGORITHM FOR SEARCHING SOUND SEQUENCES IN DATABASE

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This article is devoted to the description of the algorithm for searching for sound sequences based on the theory of active perception. A computational experiment is conducted to test the capabilities of this algorithm.

Keywords: theory of active perception, search for sound signals, database.

УДК 004.931

В. Е. Гай, А. А. Зайцев

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПО ФОТОГРАФИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена построению системыидентификации человека по фотографии.Актуальность этой темы возникает из-за роста необходимости быстрой и простой идентификации личности. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы на основе теории активного восприятия.

Ключевые слова: теория активного восприятия, распознавание лиц

Описание задачи идентификации человека по фотографии

Задача распознавания лиц всегда относилась к числу приоритетных исследований в области систем компьютерного зрения. Она разбивается на два этапа: выделение лица человека в естественной или искусственной обстановке (детектирование) и последующее установление степени сходства с лицами из известной системы распознавания базы (идентификация).

Актуальность этой задачи, а также ее предпочтительность по сравнению с другими средствами идентификации личности (идентификация по отпечаткам пальцев или по сетчатке глаза) заключается в том, что нет необходимости непосредственного контакта системы и человека. Лицо человека само по себе содержит уникальную информацию для проведения безошибочной идентификации. Кроме того, задача распознавания актуальна в системах безопасности:

- сравнение фотографий на документах, удостоверяющих личность;
- контроль доступа к безопасным компьютерным сетям и оборудованию;
- верификация пользователя при проведении финансовых транзакций;
- наблюдение в публичных местах для предотвращения террористических актов и др.

Настоящая работа посвящена применению теории активного восприятия (ТАВ) к решению задачи идентификации человека по фотографии [1].

Обзор подходов к идентификации человека по фотографии

Классические системы распознавания лиц основаны на методах, ориентированных на внешность в целом: PCA (PrincipalComponentAnalysis) [3], ICA (IndependentComponentAnalysis) [4], а также LDA (LinearDiscriminantAnalysis) [5]. В работе [6] описывается применение SIFT-дескрипторов для распознавания лиц, но не предлагается решения проблемы идентификации человека. В работе [7] предлагается комбинация дескрипторов PCA и SIFT: PCA используется для распознавания глаз, носа и рта, а при помощи SIFT описываются области вокруг найденных элементов внешности.

В работе [8] предлагается рассчитывать расстояния между всеми парами дескрипторов обоих изображений и использовать в качестве меры близости наименьшее из них. В некоторых случаях используются только те дескрипторы, которые описывают положение глаз и рта, поскольку эти элементы внешности являются наиболее информативными.

Альтернативой методам, ориентированным на внешность в целом, являются методы локального описания внешности. Подобные методы в настоящее время подлежат активному исследованию в области распознавания лиц. В работе [9] описывается алгоритм ASM (ActiveShape Models – Активные Модели Формы). Цель алгоритма – подстроить модель формы под форму объекта на изображении. ASM успешно используется для решения широкого спектра задач, в том числе определение формы органов на медицинских снимках, распознавание лиц и рукописных символов.

На сегодняшний день наиболее эффективным алгоритмом поиска лиц на изображении является алгоритм, предложенный П. Виолой и М. Джонсом [10]. Ими был предложен метод

классификации объектов (не только лиц) на основании метода усиления слабых классификаторов. Усиление слабых классификаторов – это подход к решению задачи классификации путем комбинирования примитивных классификаторов в один более сильный. П. Виола и М. Джонс построили каскад слабых классификаторов, работающий по принципу последовательных приближений. Каскад состоит из нескольких ступеней, каждая ступень – множество простых классификаторов. Если ступень принимает решение о том, что вектор признаков относится к классу искомого объекта, то принимается положительное решение, только если все ступени каскада это подтвердили, иначе вектор признаков классифицируется как неискомый объект. По показателям работы в реальных системах данный подход обеспечивает высокую точность, высокий уровень верных обнаружений и низкий уровень ошибок [11].

Подход к идентификации человека по фотографии с помощью ТАВ

Идентификация человека по изображению на основе ТАВ строится следующим образом:

1. Формирование исходного описания - предварительная обработка изображения для дальнейшей работы;
2. Формирование системы признаков – формирование набора признаков, на основании которых будет принято решение;
3. Классификация (принятие решения) – идентифицирован человек или нет.

Во время предварительной обработки исследуемого изображения, полученного из источника данных (камера), производится нормирование изображения, Q-преобразование и последующее вычисление матрицы «визуальных масс». Далее происходит набор необходимых признаков (U-преобразование): формируются вектора спектральных коэффициентов (фильтров). На основе данных признаков, на этапе принятия решений, происходит классификация и идентификация человека, позволяющая сказать о совпадении (или отсутствие совпадения) исследуемого изображения человека и изображения хранящаяся в базе данных.

Таким образом, можно сформировать систему идентификации человека по изображению на основе (ТАВ) состоящую из следующих компонентов: модуль ввода эталонного изображения, модуль ввода исследуемого изображения, база эталонных изображений, база данных признаков эталонных изображений (см. рис. 1).

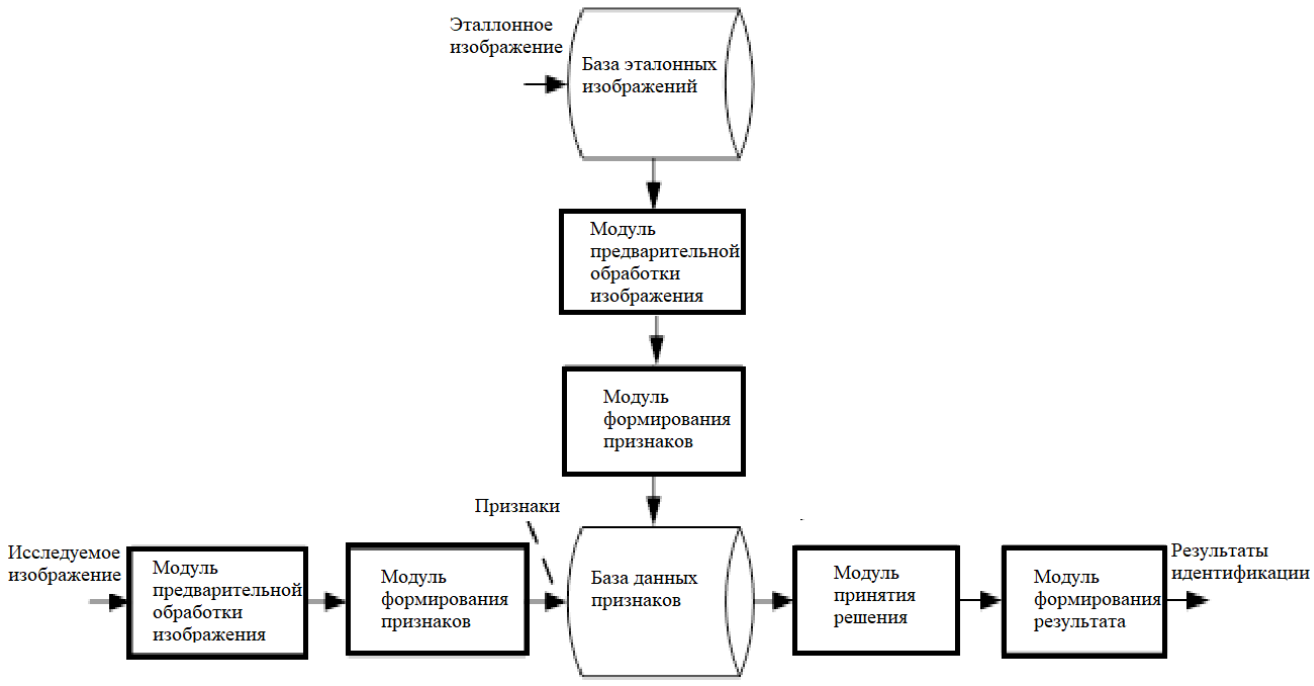


Рис. 1. Архитектура системы идентификации человека по фотографии

Заключение

Результатом работы является создание теоретической модели системы идентификации человека по фотографии по теории активного восприятия.

Библиографическийсписок

1. Утробин В. А. Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, Т. 174, № 10, 2004, С. 1089–1104.
2. Утробин В. А. Элементы теории активного восприятия изображений // НГТУ, 2001. - 64 с.
3. Kirby M. and Sirovich L. Application of the Karhunen-Loeve procedure for the characterization of human faces // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – № 12. – P. 103-108.
4. Bartlett M.S., Movellan J.R. and Sejnowski J. Face recognition by independent component analysis // IEEE. Trans. Neural Networks. – 2002. – № 13. – P. 1450-1464.
5. Belhumeur P.N., Hespanha J.P., Kriegman D.J. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using Class Specific Linear Projection // Proc. of the 4th European Conference on Computer Vision. – Cambridge, UK. – 1996. – P. 45-58.
6. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. – 2004. – № 60. – P. 91-110.
7. Sivic J., Everingham M. and Zisserman A. Person spotting: Video shot retrieval for face sets // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – P. 226-236.
8. Bicego M., Lagorio A., Grosso E. and Tistarelli M. On the use of SIFT features for face authentication // Proceedings of Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. – New York, NY, USA. – 2006. – 35 p.
9. Cootes T.F. and Taylor C.J. Statistical Models of Appearance for Computer Vision. – University of Manchester. – 2004. – 124 p.
10. Viola P., Jones M.J. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 57, №. 2. – P. 137-154.
11. Вежневец А.П. Методы классификации с обучением по прецедентам в задаче распознавания объектов на изображениях // Труды конференции Graphicon-2006. – 2006. – С. 166-173.

Gai V.E., Zaycev A.A.

SOFTWARE SYSTEM IDENTIFY THE MAN IN THE PHOTO

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This work is devoted to construction of the system identify the man in the photo. The relevance of this topic arises due to the growth of the need for rapid and simple identification. The article examines the approach to solving this problem based on the theory of active perception.

Key words: theory of active perception, face recognition.

УДК 004.931

В.Е.Гай, П.В. Кузнецова

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ПОИСКА ПОХОЖИХ ЛЮДЕЙ ПО ФОТОГРАФИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена разработке программной системы поиска похожих людей по фотографии. Данная тема является актуальной, так как возникает потребность выявления группы похожих лиц из больших баз данных фотографий. Эта статья посвящена рассмотрению метода разработки данной программной системы с помощью теории активного восприятия.

Ключевые слова: теория активного восприятия, распознавание образов, поиск похожих лиц.

Описание задачи поиска похожих людей по фотографии

На данный момент существует множество программ, способных идентифицировать человека, а вот нахождением похожих лиц по фотографии занимается относительно небольшое число компаний. Хотя в индустрии развлечений существует большая потребность и актуальность нахождения группы похожих лиц из больших баз данных. Так, большое распространение находят сервисы, занимающиеся поиском похожих лиц в социальных сетях. Но в данных сервисах ограничен функционал и имеется платный контент, что уменьшает аудиторию пользователей.

Так же нахождение похожих лиц является актуальным в системе безопасности. На основании накопленных баз данных лиц, попавших в поле зрения камер, производится поиск похожих лиц по этой базе. Модуль поиска похожих лиц даёт возможность существенно ускорить поиск интересующего человека в видеоархиве и получить статистику его появлений в поле зрения различных камер.

Область информационного поиска не ограничивается задачей кластеризации фотографий людей, с помощью данной программной системы так же можно выполнять поиск похожих объектов.

Система кластеризации фотографий должна максимально быстро и точно подбирать совокупность фотографий, похожих на заданную. Но стоит учесть, что степень похожести людей для каждого человека разная и точность решения данной задачи оценивается экспертом.

Обзор алгоритмов кластеризации

Задача нахождения похожих лиц по фотографии является задачей кластеризации. Она заключается в разбиении заданной выборки объектов на непересекающиеся подмножества, называемыми кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались.

Существует несколько алгоритмов решения поставленной задачи. Можно выделить два основных направления:

1) алгоритмы, основанные на использовании нейронных сетей;
2) алгоритмы, основанные на теории активного восприятия.

При использовании классических нейросетевых архитектур был выявлен ряд недостатков:

- большая размерность изображений порождает сложные нейронные сети;
- из-за большого количества параметров увеличивается время и вычислительная сложность процесса обучения, а следовательно замедляется работа всей системы;

- при повышении эффективности системы так же увеличивается и вычислительная сложность решения задачи, а следовательно и время её выполнения;
- отсутствие инвариантности входного сигнала.

Данные недостатки могут оказаться критическими при решении поставленной задачи.

Тогда как алгоритм, основанный на теории активного восприятия не требует вычислений большой сложности, а следовательно повышается скорость работы программы. В отличие от алгоритмов с использованием нейронных сетей для метода поиска похожих лиц с использованием метода активного восприятия не требуется время на обучение, а затраты памяти минимальны, так как нет необходимости хранить сложную нейронную сеть.

В качестве минусов теории активного восприятия следует отметить пониженную точность поиска похожих изображений в отличие от классических алгоритмов нейросетевого поиска.

Реализуется этот алгоритм в несколько этапов:

1) нормализация изображения;
2) формирование системы признаков;
3) классификация (принятие решения).

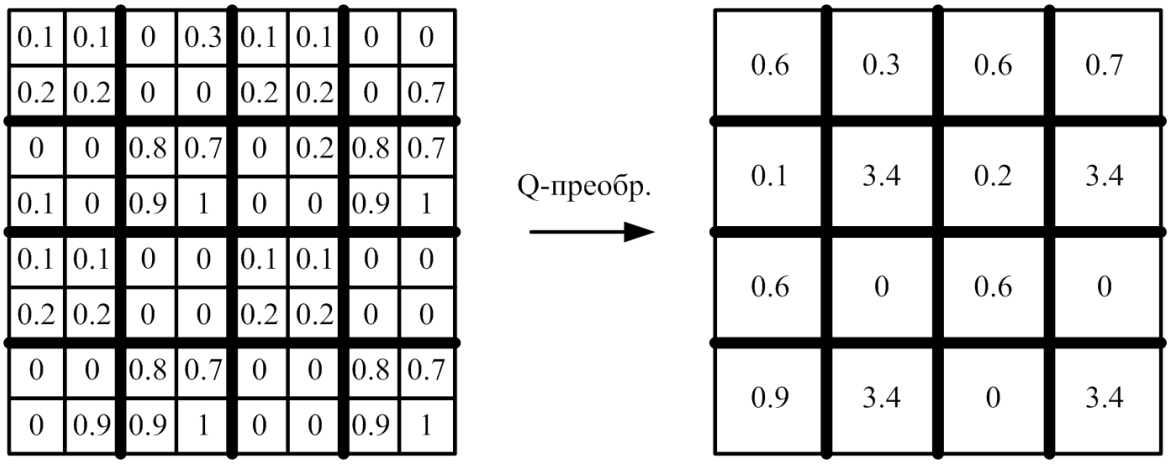
Перед преобразованием изображения в программе с графическим интерфейсом пользователю предоставляется возможность задать положение глаз на фотографии. Исходя из предоставленных пользователем данных изображение кадрируется, поворачивается и масштабируется. В результате данных преобразований входное изображение приобретает формат, понижающий воздействие фоновых цветовых и яркостных составляющих входного изображения на процесс распознавания. Таким образом, глаза человека на входном изображении располагаются на одной горизонтальной прямой, а расстояние между ними равно 1/3 ширины получившегося изображения.

Исходя из того, что цветовые характеристики изображения не оказывают значительного влияния на результат по сравнению с яркостными, для упрощения дальнейших расчётов фотография преобразуется в градации серого.

Нормализация изображения заключается в приведении яркостей пикселей к интервалу [0;1]. Это реализуется с помощью следующего алгоритма:

1) определяется минимальный элемент матрицы яркостей изображения;
2) минимальный элемент вычитается из каждого элемента матрицы;
3) определяется максимальный элемент из получившихся в результате расчётов;
4) каждый элемент матрицы делится на найденный максимальный элемент.

Далее, по нормализованным изображениям формируется система признаков, для чего используется матрица «визуальных масс». Изображение разбивается на 16 одинаковых блоков. Для каждого из блоков вычисляется сумма нормализованных яркостей пикселей, входящих в блок. Данное преобразование называется Q-преобразованием, в результате которого формируется матрица визуальных масс, размером 4x4.



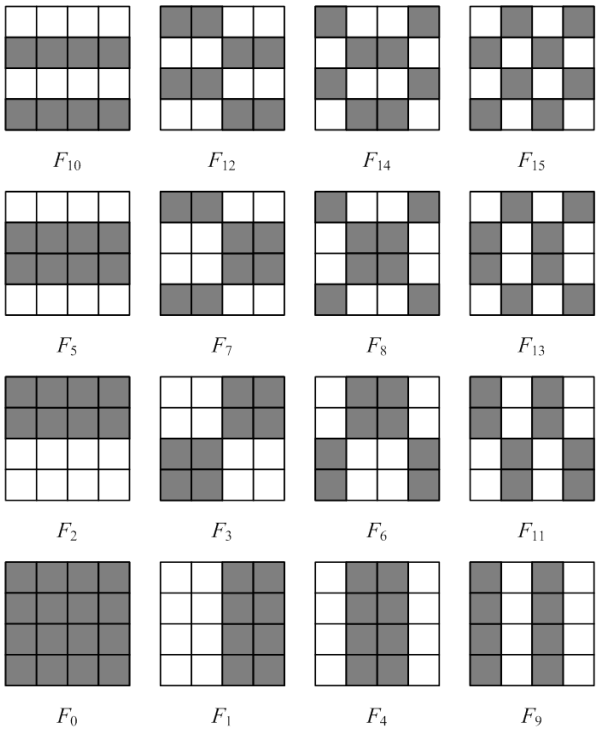
Матрица I размером 8×8 $(N\times M)$ пикселей

Матрица «визуальных масс» размером 4×4 пикселей

Рис. 1 Схема Q-преобразования

Для повышения точности поиска, изображение можно разбить на части, для каждой из которых будет выполняться Q-преобразование.

Далее для каждой матрицы «визуальных масс» применяются фильтры, описанные в теории активного восприятия.



Характеристики

Количество – 16;

Темный элемент – значение – 1

Светлый элемент – значение +1

–1	–1	+1	+1
–1	–1	+1	+1
–1	–1	+1	+1
–1	–1	+1	+1

F_1

Рис. 2 Фильтры, описанные в теории активного восприятия

После этого формируется вектор спектральных коэффициентов за счёт перемножения матрицы визуальных масс на каждый из фильтров.

На этапе классификации происходит отбор группы фотографий по признакам, которыми являются элементы вектора спектральных коэффициентов.

Сначала сравниваются знаки значений векторов. При рассмотрении отбрасываются значения, которые по абсолютному значению менее, чем 20% от максимального значения элемента в текущем векторе спектральных коэффициентов. Эта операция производится для

уменьшения влияния нестабильных (маленьких) значений на результат. Далее рассчитывается процент совпадений и в результат включаются те фотографии, чей процент оказался больше порогового значения, выбранного экспертом.

Архитектура системы кластеризации изображений

Любая система идентификации состоит из нескольких компонент. Для реализации рассматриваемой системы поиска похожих изображений характерно выделяются следующие модули:

1) модуль ввода изображения, по которому будетвестись поиск;
2) модуль вывода результата;
3) база данных изображений, среди которых ведётся поиск;
4) База данных признаков изображений, каждый из которых соответствует некоторому изображению из БД п.3.

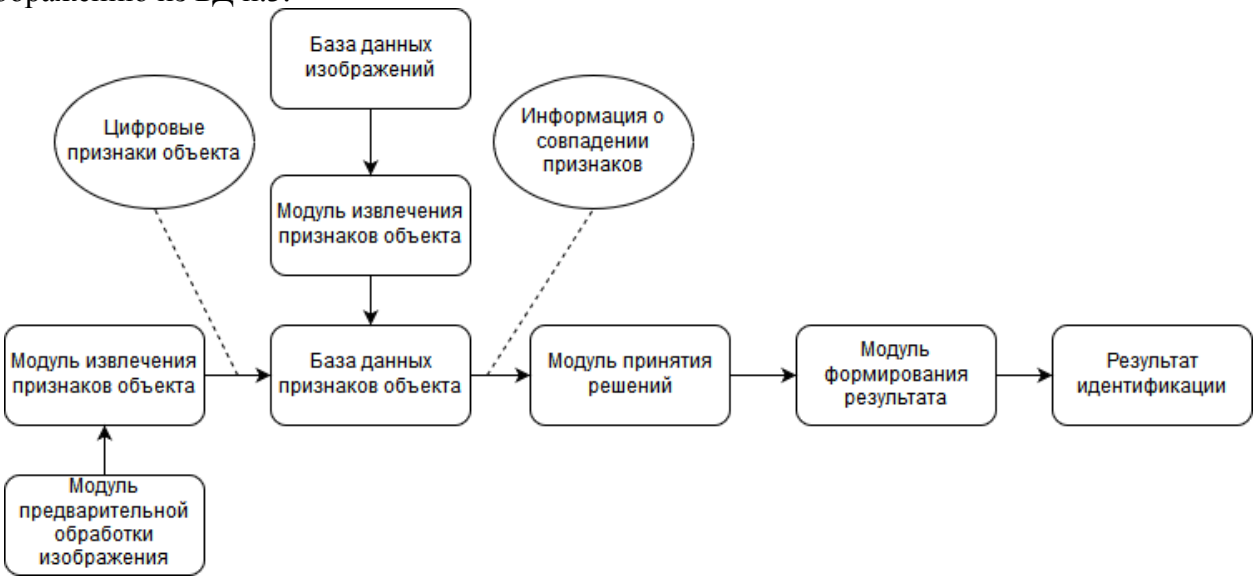


Рис. 3 Типовая архитектура системы кластеризации изображений

Укрупненно, рассматриваемая система идентификации состоит из двух алгоритмов: получение признаков входного изображения и выбор похожих изображений из БД по признакам.

Основные различия между системами идентификации, построенными по описанной архитектуре, заключаются в используемом пространстве признаков.

Вычислительный эксперимент

Для проведения эксперимента было создано приложение на языке C++ в интегрированной среде разработки QtCreator. Данная среда была выбрана по ряду причин:

1) поддержка языка программирования C++;
2) визуальные средства разработки графического интерфейса;
3) поддержка множества распространённых компиляторов;
4) большой функционал для работы с изображениями и файлами;
5) возможность редактирования этапов сборки проекта;
6) постоянная поддержка и разработка.

Для ускорения проведения эксперимента используются предварительно рассчитанные статические данные, а именно указание положения глаз на фотографиях, содержащихся в базе данных. Для хранения признаков используется текстовый файл, так как поиск по нему занимает меньше времени, чем работа с базой данных, что обеспечивает ускорение

вычислений. Признаки в нем хранятся построчно с указанием имени изображения и количества блоков, на которые он разбивается, что обеспечивает удобное обращение к содержимому файла.

Эксперимент показал, что время на построение базы данных признаков зависит от заданной точности результата. Так, для 1000 фотографий с большим разрешением и высокой точностью результата, потребовалось 30 секунд на выполнение данных вычислений.

Работа системы поиска похожих людей по фотографии представлена на рис. 4.

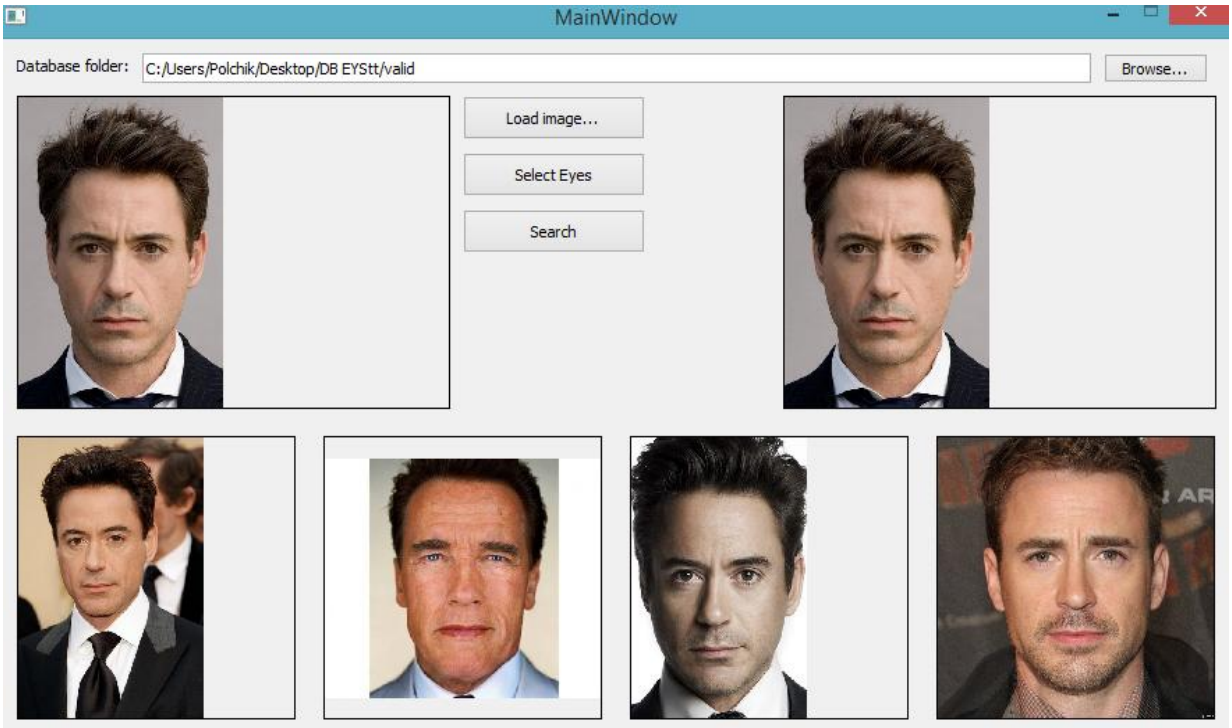


Рис. 4 Результат работы программы

Заключение

Результатом работы является создание программной системы нахождения похожих лиц по фотографии, основанной на теории активного восприятия. Данная система пригодна для кластеризации не только фотографий людей, но и объектов. Был проведён анализ программы в рамках поставленного эксперимента. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что данный метод решения поставленной задачи имеет большой потенциал и будет проанализирован с помощью других экспериментов.

Библиографический список

1. Конушкин А. Распознавание и анализ лиц // MicrosoftResearch
2. Котов А., Красильников Н. Кластеризация данных М.: 2006
3. Мищенкова Е. С. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания лиц // Труды молодых учёных
4. Утробин В. А. Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, Т. 174, № 10, 2004
5. Charles Otto, Dayong Wang, Anil K. JainClustering Millions of Faces by IdentityIEEE,2016
6. Huang-wei Chang, Lei Huang, XiangruiMeng, Grouping Photos by Face

Gai V.E., KuznetsovaP.V.

SOFTWARE SYSTEM FOR FINDING SIMILAR PEOPLE BY PHOTOGRAPHY

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

The article is aimed at the development of a software system for finding similar people by photography.

This topic is relevant, as there is a need to identify a group of similar persons from large photo databases. This article is devoted to the method of developing this software system using the theory of active perception.

Keywords: theory of active perception, pattern recognition, search for similar persons.

УДК 004.931

В.Е. Гай, Н.А.Никифоров

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Задача обнаружения объектов на изображении или в видеопотоке – одна из актуальных задач компьютерного зрения. Ключевой этап в решении данной проблемы – формирование признакового описания объекта. Предлагается новый подход к формированию признакового описания объекта на основе теории активного восприятия. Приводятся результаты тестирования предложенного метода на базе данных изображений.

Ключевые слова: обнаружение объектов, теория активного восприятия, распознавание образов

Описание задачи обнаружения

Задача обнаружения объектов на изображении – одна из фундаментальных проблем в области компьютерного зрения и обработки изображений. Практическое применение данная задача находит в системах автопилотирования, индексирования изображений и видео, охранных системах.

Структуру системы обнаружения объектов на изображении можно представить в виде совокупности трёх блоков: предварительная обработка изображения, формирование признакового описания, принятие решения.

Предварительная обработка изображения обычно заключается в применении к изображению 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.

Обзор алгоритмов идентификации

В [1] рассмотрена задача детектирования объекта, представляющего собой несколько соединенных сфер одинакового радиуса. В решении поставленной задачи определен ряд этапов: выделение границ объекта с использованием детектора Канни, поиск структурных элементов на основе преобразования Хафа, определение положения объекта с использованием распознавания по эталону и поиска изменений по кадрам.

В [2] предложен метод распознавания, относящийся к классу обобщающих методов. Объект рассматривается как совокупность элементов, в качестве которых выбраны линии границ. Обнаружение заключается в построении каркаса исследуемого изображения, поиск наилучшего совмещения с эталоном, принятие решения об обнаружении путем сравнения количества совпавших линий с пороговым значением.

В [3] описан подход к распознаванию объекта на изображении с использованием алгоритма адаптивного усиления (AdaBoost), в основе которого лежит идея отбора и комбинирования слабых классификаторов. Тестирование реализации предложенного алгоритма показало приемлемое время обработки изображений в тренировочной выборке. Установлено также, что в реальных условиях требуется обучающая выборка большого объема, а на обучение каскада классификаторов необходимо потратить несколько дней.

В [4] описан метод детектирования лиц на изображениях, в основу которого положены идеи алгоритма Viola&Jones. Для повышения скорости и точности детектирования в предобработке изображения предложено использовать серию фильтров, где каждый

следующий фильтр обрабатывает только «перспективные» части изображения, полученные от предыдущих фильтров.

В [5] представлен алгоритм обнаружения объектов, основанный на обучении свёрточной нейронной сети. Для распознавания исходное изображение приводится к размеру 448×448, делится на ячейки 7×7, для каждой ячейки формируется метка, характеризующая ее принадлежность объекту некоторого класса.

Данная работа посвящена решению задачи обнаружения объектов на изображении с позиций теории активного восприятия (ТАВ). Использование ТАВ позволит распознавать объекты произвольных 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

Базовым преобразованием ТАВ является *U*-преобразование, которое реализуется в два этапа [6]. На первом этапе к изображению применяется *Q*-преобразование, после которого получаем матрицу визуальных масс *m* размером 4 × 4 элемента:

$$m[i,\ j] = \sum_{k=\left(\frac{i-1}{4}\right)\cdot N}^{\frac{i}{4}\cdot N} \sum_{l=\left(\frac{j-1}{4}\right)\cdot M}^{\frac{j}{4}\cdot M} I[k,l],\ i=\overline{1,4},\ j=\overline{1,4},$$

где I – изображение размером $N \times M$ отсчётов. Для корректной интерпретации результатов *Q*-преобразования отсчёты изображения 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 $\mathbf{F} = \{F_i\},\ i=\overline{1,16}$. В результате, формируется вектор спектральных коэффициентов μ:

$$\mu_i = \sum_{k=1}^{4}\sum_{l=1}^{4} m[k,l]\cdot F_i[k,l].$$

Размер каждого фильтра составляет 4×4 элемента. 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.

Метод обнаружения объектов

Этап обучения заключается в выполнении следующих шагов:

1) формируется «положительные» и «отрицательные» образцы объектов для каждого из обнаруживаемых классов объектов; база данных «положительных» образцов включает изображения обнаруживаемых C классов объектов, каждый образец имеет размер $h_c \times w_c$, где h_c – высота образца, w_c – высота образца, c – класс образца ($c \in \overline{1,C}$), причём каждый образец содержит изображение детектируемого объекта, база данных «отрицательных» образцов строится аналогично базе для «положительных», каждый «отрицательный» образец не содержит изображение детектируемого объекта;

2) вычисляется признаковое описание для изображений, находящихся в указанных базах данных; формирование признакового описания изображения I выполняется по следующему алгоритму:

2.1) изображение I разбивается на L^2 равных частей без перекрытия $\mathbf{P}=\{P_i\},\ i=\overline{1,L^2}$ размером $(N/L)\times(M/L)$ отсчётов (эквивалентность частей изображения выбрана исходя из

того, что изображение обрабатывается в условиях априорной неопределённости), где P_i – i-ая область изображения, L – количество разбиений одной стороны изображения;

2.2) для каждой части вычисляется признаковое описание на основе U-преобразования

$$D = FC\,[I],$$

где оператор $FC[\bullet]$ вычисляет признаковое описание изображения и реализуется следующим образом:

$$\forall j = \overline{1, L^2}:$$

$$D = D \cup U[P_j],$$

где $U[\bullet]$ – оператор вычисления U-преобразования, D – признаковое описание изображения I. Таким образом, число частей, на которое разбивается изображение определяет размерность признакового описания: $1 \times (15 \cdot L^2)$. В результате выполнения данного шага формируется признаковое описание положительных образцов для каждого класса $F_P = \{F_{P,i}\}$ и признаковое описание отрицательных образцов для каждого класса: $F_N = \{F_{N,i}\}$, $i = \overline{1, C}$;

3) с использованием метода опорных векторов на основе вычисленных признаковых описаний формируется модель для детектирования каждого из классов объектов; таким образом, каждый классификатор обучается различать два класса: «положительный» образец некоторого класса и «отрицательный» образец для того же класса:

$$\mathbf{S} = \{S_i\},\ S_i = SVM_t\,[F_{P,i}, F_{N,i}],\ i = \overline{1, C},$$

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 изображения I – деление изображения I, на котором выполняется детектирование объектов, на области с шагом s_h по горизонтали и s_v по вертикали, размер области для i-го класса объектов известен заранее и установлен на этапе обучения, выделение областей выполняется на нескольких масштабах; это используется для обнаружения объектов, размер которых меньше размера эталона

$$\mathbf{Q} = \{Q_{i,(x,y),s}\},\ i = \overline{1, T},$$

где **Q**–множество всех областей, полученных по изображению, $Q_{i,(x,y),s}$ – i-ая область, (x, y) – координата верхнего правого угла области, s – масштаб изображения ($0 < s < 1$), T – количество полученных областей;

2) для каждой области Q_i формируется признаковое описание:

$$D_{Qixys} = FC\,[Q_{i,(x,y),s}],\ i = \overline{1, T},$$

где D_{Qixys} – признаковое описание области $Q_{i,(x,y)}$;

3) при выполнении обнаружения на вход классификатора направляются полученные на предыдущем этапе признаковые описания областей изображения:

$$C_{Qixys} = \mathrm{SVM}_u[D_{Qixys}, \mathbf{S}],$$

где SVM_u – оператор определения класса по признаковому описанию D_{Qixys} на основе множества моделей **S**, C_{Qixys} – класс области $Q_{i,(x,y),s}$;

4) учитывая, что на предыдущем шаге для одного объекта, находящемся на тестовом изображении, генерируется множество близких друг другу вариантов расположения («гипотез»), необходимо выполнить подавление немаксимумов с использованием алгоритма Soft-NMS, описанного в [7]; данный метод выбирает область с максимальной оценкой правдоподобия некоторого класса объектов, а все остальные области, перекрывающиеся в определённом процентном соотношении с данной областью, подавляет.

Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент предназначен для оценки точности работы предложенного метода детектирования объектов. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны объекты двух классов – «Пешеход» и «Легковой автомобиль». В обучающей выборке для каждого из классов хранится 1000 положительных и 1000 отрицательных эталонов, таким образом, всего 4000 изображений. Тестовая выборка включает 1000 предварительно размеченных изображений для каждого из классов размером 640×480 отсчётов.

Размер эталона для класса «Пешеход» составляет 64×128 отсчётов, для класса «Легковой автомобиль» – 64×64 отсчёта. Разметка изображений выполнялась в программе VGGImageAnnotator, разработанная группой визуальной геометрии Оксфордского университета. На этапе применения величина смещения окна по изображению кратна значению L.

На рис. 1 показан результат детектирования объектов класса «Пешеход» и «Легковой автомобиль». Время обработки одного изображения составляет 47 мс.

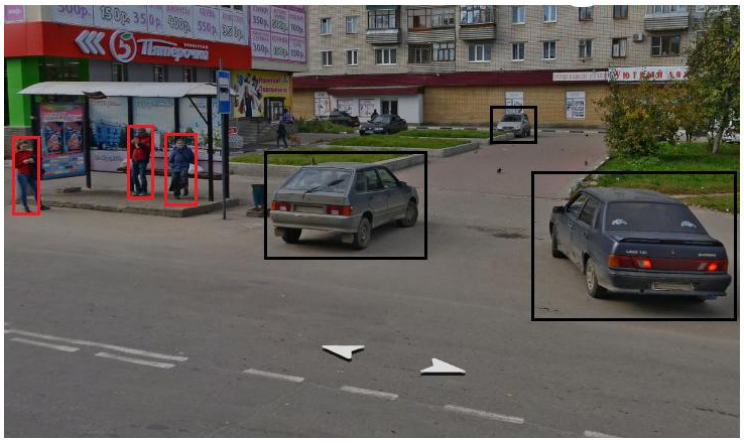


Рис. 1. Результат детектирования объектов

В работе [3] решается задача обнаружения бейсбольного мяча. Время обработки одного изображения – не более 13 мс. Время, затраченное на обучение каскада классификаторов – 1 день.

В работе [4] решается задача обнаружения лиц на изображении. Тестирование производилось на специализированном тестовом наборе CMU/MITTestset, состоящем из 130 изображений, содержащих в общей сложности 507 лиц. Ошибка детектирования составляет 6,1%, время на обработку одного изображения – 35 мс.

Таким образом, реализация предложенного метода обнаружения объектов по точности обнаружения и производительности не уступает реализациям известных методов;

Заключение

Методы обнаружения объектов на изображении имеют широкий круг применения, включая робототехнику, анализ медицинских изображений, охранные системы. В данной работе предложен метод обнаружения объектов, разработанный с позиций теории активного восприятия. Выполнено тестирование предложенного метода на двух классах объектов – «Пешеход» и «Легковой автомобиль».Результаты тестирования подтвердили эффективность предложенного метода обнаружения. По точности обнаружения объектов,

предложенный метод не уступает известным подходам, а в ряде случаев – показывает лучшие результаты.

Библиографический список

1. Д.С. Азаренко Детектирование объекта на изображении и определение его смещения на двух различных изображениях // Искусственный интеллект, 2013, №3, С. 90-97

2. А.Н. Алфимцев, И.И. Лычков Метод обнаружения объекта в видеопотоке в реальном времени // Вестник ТГТУ. 2011. Том 17. No 1., С. 44-55

3. Бутенко В. В. Поиск объектов на изображении с использованием алгоритма адаптивного усиления // Молодой ученый. — 2015. — №4. — С. 52-56.

4. Гребнов И. В. Новый метод детектирования человеческих лиц на цифровых изображениях // Вестник ИГЭУ» Вып.4 2008, с. 77-81

5. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi; The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779-788

6. Utrobin V. A. Physical interpretation of the elements of image algebra // Phys. Usp. 47 1017–1032 (2004)

7. Bodla N. et al. Improving Object Detection With One Line of Code //arXiv preprint arXiv:1704.04503. – 2017.

V.E. Gai, N.A. Nikiforov

THEOBJECT DETECTION METHOD INANIMAGEINTERMS OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

The problem of detecting objects in an image or video stream is one of the relevant tasks of computer vision. A key stage in the solution of this problem is the formation of indicative description of the object. We propose a new approach to the formation of an indicative description of the object based on the theory of active perception. We also present the results of testing the proposed method on the image database.

Keywords: object detection, theory of active perception, pattern recognition.

УДК 004.931

В.Е. Гай, И.В. Поляков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В данной статье рассматривается проблема прогнозирования износа и поломок узлов механизмов, в которых используются подшипники качения. Любой механизм с течением времени изнашивается и, соответственно, возрастает риск поломки. Это создает необходимость в своевременном обслуживании изношенных деталей механизмов. Решение проблемы состоит в разработке новых моделей и методов прогнозирования состояния подшипников в узлах и механизмах. Разрабатываемые методы, в отличие от известных, должны позволить повысить точность предсказания остаточного ресурса, работая в условиях отсутствия накопленной статистики о неисправностях. Для решения задачи предлагается использовать теорию активного восприятия, позволяющую решить проблемы, связанные с применением известных методов распознавания образов.

Ключевые слова: распознавание образов, машинное обучение, теория активного восприятия, подшипник качения, прогнозирование, виброакустический сигнал.

Введение

Механизмы с течением времени изнашиваются и, соответственно, возрастает риск их поломки. Это создает необходимость в своевременном обслуживании изношенных деталей механизмов. Одним из самых важных элементов практически любого механизма является подшипник качения. Поэтому, подшипник может рассматриваться как критический узел, так как выход его из строя снижает безопасность и работоспособность машины. В связи с этим, актуальной является фундаментальная научная проблема, связанная с разработкой моделей и методов оценки остаточного ресурса подшипника качения.

Научная значимость решения проблемы состоит в разработке новых моделей и методов прогнозирования состояния подшипников в узлах и механизмах. Разрабатываемые методы, в отличие от известных, должны позволить повысить точность предсказанияостаточного ресурса, работая в условиях априорной неопределённости (отсутствие накопленной статистики о неисправностях). Для решения задачи предлагается использовать теорию активного восприятия [1], позволяющую решить проблемы, связанные с применением известных методов распознавания образов.

Фундаментальная задача, на решение которой направлена данная работа – разработка моделей и методов прогнозирования остаточного ресурса подшипника качения на основе данных.

В рамках поставленной фундаментальной задачи планируется выполнить следующие подзадачи:

1) Разработать методы формирования систем признаков по вибрационному сигналу подшипника качения, обладающих свойством монотонности и выделения тренда;

2) Разработать модели оценки остаточного ресурса подшипника качения на основе предложенных систем признаков;

3) Выполнить экспериментальные исследования разработанных моделей и методов формирования систем признаков с целью оценки точности выполнения прогноза остаточного ресурса.

Были рассмотрены несколько исследований, предоставляющих решение данной задачи.Рассмотрена работа [2], в которой анализ вибросигнала осуществляется при помощи метода главных компонент, использующегося для уменьшения размерности исходных вибрационных признаков, путем удаления избыточных признаков. Такой метод позволяет уменьшить конечный объем вычислений, однако такой способ не реализует полный потенциал имеющихся данных. Для вычисления оставшегося времени работы подшипника используется

метод описания данных с помощью опорных векторов, основанный на принципах минимизации структурных рисков. Он используется для соотнесения данных обучения в область гиперсферы, таким образом граница полученного радиуса гиперсферы может использоваться в качестве индикатора состояния подшипника. Такой способ показывает хорошие результаты в данном виде вычислений и было решено также использовать его на одном из этапов. Рассмотрена работа [3], в которой анализ вибросигнала осуществляется при помощи методаБайесовского моделирования Монте-Карло, а этап вычисления оставшегося времени работы подшипника реализован с помощью метода скользящего среднего спектрального эксцесса и метод регрессии опорных векторов. Эксперименты в обоих исследованиях проводились на том же наборе данных, который используется в данной работе [4]. Результаты имеют точность прогнозирования до 85-95%, однако в некоторых случаях происходит ощутимое падение точности. Используемые в статьях методы довольно затратные, в плане вычислительной сложности. При анализе данных исследований был сделан вывод о возможном повышении точности работы и снижении вычислительной сложности, при помощи предлагаемых методов.

Информационная модель предсказания

Информационная модель состоит из части, ответственной за анализ вибросигнала и части вычисления оставшегося времени работы подшипника. Представляя систему анализа вибросигнала как систему распознавания образов, выделим три этапа обработки данных: предварительная обработка, вычисление признаков и принятие решения. структура представлена на рис. 1.

Рис. 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», посвящённый анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Обнаруженные зависимости допускают своё использование на этапах принятия решения и понимания анализируемого сигнала.

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, это позволяет сократить количество данных на этапе прогнозирования.

Далее, по полученному на предыдущем этапе массиву аномалий рассчитывается кумулятивное среднеквадратичное отклонение. На полученном в результате графике

производится аппроксимация конечной части кривой с помощью параболы, начало аппроксимации рассчитывается с помощью базисной функции [1]. Один из коэффициентов полученной параболы, в результате сигнализирует о состоянии подшипника (скорости его износа за измеренный отрезок времени). На основе этого производится вычисление оставшегося времени работы подшипника.

Вычислительный эксперимент

Эксперимент проводился на пакете данных, представленных в [4].Каждый набор является результатом тестирования шести подшипников до поломки. Каждый набор состоит из файлов, содержащих вибрационные сигналы (горизонтальные и вертикальные ускорения):

- Частота дискретизации: 25.6 kHz;
- Записи: 2560 замеров (длиной 1/10 с) записанныес интервалом в 10 секунд.

Для каждого набора данных, соответствующего результатам тестирования одного из подшипников, указано общее время записи данных с подшипника, до момента поломки. Эксперимент проводился с данными, полученными от трех пар подшипников, работающих в разных условиях:

1) 1800 об/мин и прилагаемая радиальная нагрузка 4000 Н;
2) 1650 об/мин и прилагаемая радиальная нагрузка 4200 Н;
3) 1500 об/мин и прилагаемая радиальная нагрузка 5000 Н.

Для проверки работоспособности предложенного метода была проведена серия экспериментов. Компьютер, производящий вычисления, имеет процессор IntelCorei7 3.6 ГГц и 8 Гб оперативной памяти. Этапы предварительной обработки сигнала и вычисления признаков выполнены на языке R, этапы принятия решения и вычисления остаточного ресурса выполнены на языке Python. Программа работает в два шага: На первом шаге системе предоставляются данные для обучения, включающие в себя вибрационные данные, соответствующие работе подшипника в исправном состоянии. На втором шаге система проводит исследование всей доступной информации о состоянии подшипника и выдает результат, включающий в себя остаточное время работы до критической поломки.

Тестирование программы проводилось на 70% данных, строилась модель предсказания и сравнивалась с реальными показаниями. Большее количество результатов показали точность прогнозирования сравнимую с методами рассмотренными выше(80-95%) [2], [3], однако встречались случаи, где точность ощутимопадала, что показывает необходимость в дальнейшей работе над алгоритмом.

Заключение

Были проведены научные исследования и экспериментальные работы в области создания систем прогнозирования. По итогам, к результатам работ по рассматриваемой теме можно отнести разработку подхода основанного на данных. Решение задачи выполнялось с позиции теории активного восприятия. Полученные результаты вычислительных экспериментов подтверждают эффективность предложенных методов. Повысить точность работы можно с помощью более точной настройки алгоритма. Созданная система имеет потенциал для дальнейшего развития и может быть использована в образовательных целях. Дополнительно выполнено исследование существующих систем прогнозирования, указана их эффективность при решении задачи расчета прогноза состояния подшипника.

Библиографический список

1. Утробин В. А. Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений. — Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2001.— С. 234.
2. T. Benkedjouh, K. Medjaher, N. Zerhouni, S. Rechak. Fault prognostic of bearings by using support vector data description // 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management
3. E. Sutrisno; H. Oh; A. Sai SarathiVasan; M. Pecht. Estimation of remaining useful life of ball bearings using data driven methodologies // 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)
4. http://www.femto-st.fr/en/Research-departments/AS2M/Research-groups/PHM/IEEE-PHM-2012-Data-challenge.php
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.

PREDICTING THE CONDITION OF ROLLING BEARINGS BASED ON THE ANALYSIS OF VIBROACOUSTIC SIGNALS

Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alekseev

This article discusses the problem of predicting deterioration and damage of the units which use ball bearings. Any mechanism wears out over time and, accordingly, the risk of breakage increases. This creates the need for timely maintenance of worn parts of the mechanisms. The solution to the problem is to develop new models and methods for predicting the condition of bearings in assemblies and mechanisms. The developed methods, unlike the known ones, should allow to increase the accuracy of predicting the residual life, working in the absence of accumulated statistics about malfunctions. To solve the problem, it is proposed to use the theory of active perception, which allows solving problems associated with the use of known methods of pattern recognition.

Key words: vibration diagnostics, pattern recognition, machine learning, theory of active perception, bearing, prediction, vibro-acoustic signal.

УДК 004.931

В.Е. Гай, С.М. Шляпников

СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена созданию системы сбора данных о качестве дорожного покрытия. Актуальность этой темы объясняетсяростом протяженности дорог, в связи с чем обостряется проблема их качества и безопасности. В статье будет рассмотрен подход к решению данной проблемы.

*Ключевые слова:*оценка качества дорожного полотна.

Описание задачи оценки качества дорожного полотна

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 полота (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 вышеописанных 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:

- Системы, специализирующиеся на определении качества обслуживания дорожного полотна: наличии заснеженности, заледенения, влажности и скоплений воды;
- Системы, специализирующиеся на определении технического состоянии дорог, которое включают в себя: определение ям, трещин и других повреждений полотна;
- 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 вышеописанные методы сбора данных. Такие системы могут размещаться не только на автомобилях, но и даже на вертолет.

Архитектура системы идентификации качества дорожного покрытия

Автоматизированная система оценки качества дорожного покрытия состоит из нескольких ключевых модулей (см. рис. 1.).

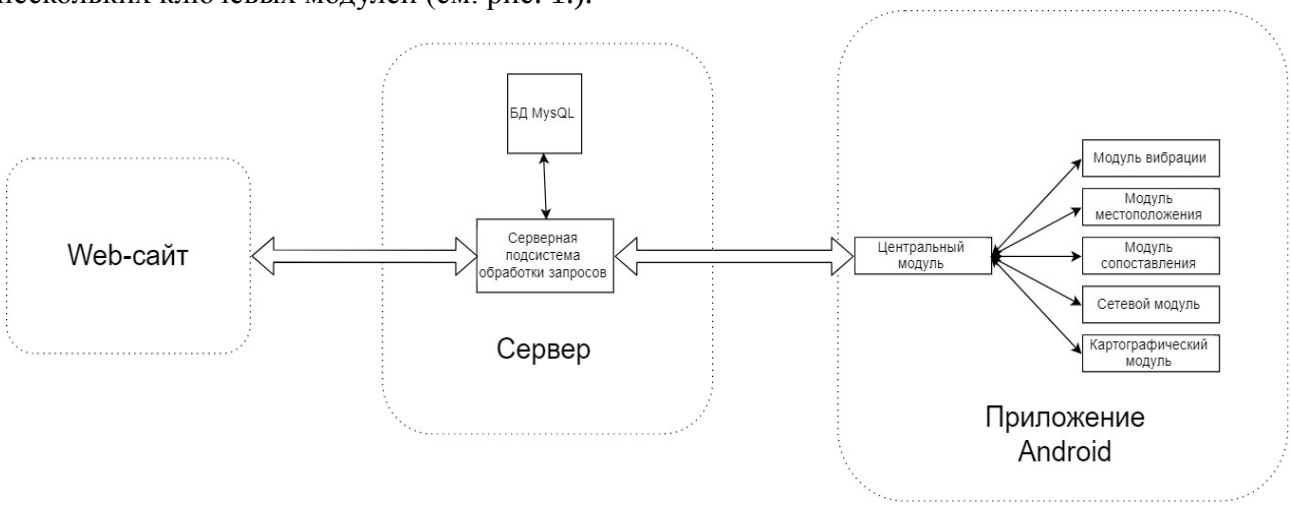


Рис.1. Архитектура системы

Рассмотрим принцип действия некоторых из модулей. Одним из самых важных является модуль, собирающий информацию о вибрациях и тряске в процессе движения транспортного средства. Для этого необходимо задействовать аппаратный компонент смартфона или планшета – акселерометр. С помощью акселерометра производятся замеры

кажущегося ускорения. Замеры производятся с максимально доступной частотой, которая определяется используемым в устройстве типом акселерометра. Всё полученные значения суммируются, и после определенного промежутка времени происходит нахождение среднего значения за пройденное время. Стоит обратить внимание на то, что все получаемые значения находятся в системе координат устройства, которая представлена на Рис. 2.

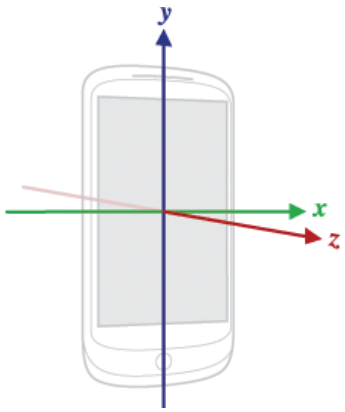


Рис 2. Система координат устройства

По этой причине, прежде чем производить какие-либо действия с полученными данными, необходимо перейти к мировой системе координат. Кроме того, необходимо учесть влияние силы земного притяжения (9.80665 м/с^2).Только учтя все вышеописанные нюансы, можно получить «чистые» данные, готовые для дальнейшей обработки.

Также важную роль выполняет модуль сопоставления, функции которого заключаются в объединении данных, которые поступают в данный модуль из двух других: модуля фиксации вибраций и модуля местоположения. Основная сложность функционирования этого модуля состоит в том, что поток, приходящий на него информации, неоднороден. Это значит, что информация о вибрации за промежуток времени может приходить чаще, чем информация о местоположении.

Рис.3. Шкала времени с изображением моментов поступления данных

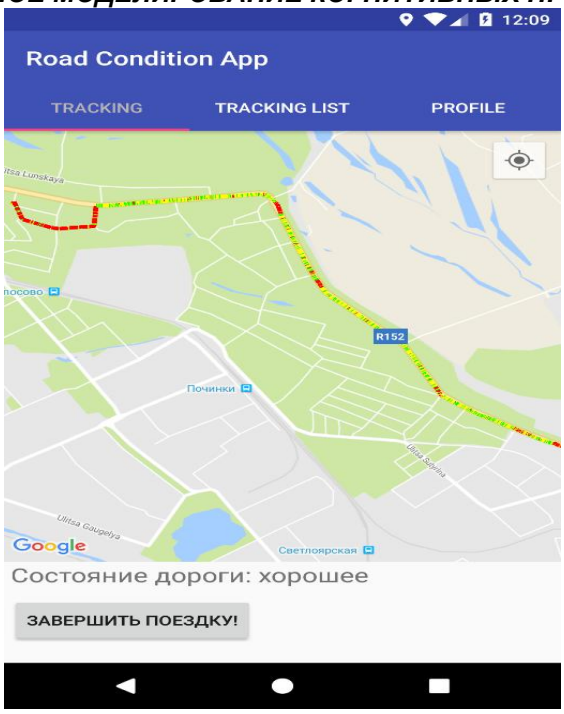


Рис.4 Результат работы программы

Для решения этой проблемы применяется интерполяция местоположения в момент поступления сведений о вибрации за прошедший промежуток времени.

Результат работы программы

В результате работы программы строится карта маршрута, на которую в процессе записи трека наносится качество пройденных дорог:

Заключение

Результатом работы является создание интерактивной карты качества дорожного покрытия, котораяохватывает все пройденные маршруты. Разработанная система имеет ряд преимуществ в сравнении с аналогами, а, следовательно, имеется большой потенциал для её дальнейшего развития и модернизации.

Библиографический список

1. Bhoraskar, R., Vankadhara, N., Raman, B., Kulkarni P.; Wolverine: Trafficand Road Condition estimation using Smartphone Sensors. In: FourthInternational Conference on Communication Systems and Networks(COMSNETS). IEEE (January 2012).

2. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., Balakrishnan, H.: Thepothole 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. Gonzlez, A., O’brien, E.J., Li, Y.Y., Cashell, K.: The use of vehicle accelerationmeasurements to estimate road roughness. Vehicle System Dynamics: InternationalJournal of Vehicle Mechanics and Mobility (2008)

4. Mohan, P., Padmanabhan, V.N., Ramjee, R.: Nericell: rich monitoring of roadand traffic conditions using mobile smartphones. In: Proc. ACM SenSys 2008, ACM, New York (2008)

5. Thiagarajan, A., Ravindranath, L.S., LaCurts, K., Toledo, S., Eriksson, J., Madden,S, H.: VTrack: Accurate, Energy-Aware Traffic Delay EstimationUsing Mobile Phones. In: ACM SenSys 2009, Berkeley, CA (November 2009).

Gai V.E., Shlyapnikov S.M.

ROAD SURFACE QUALITY ASSESSMENT SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The article describes classification system of roadsurface. The relevance of this work arises from the ever-increasing amounts of length of roads and the need to identify their quality. The article will be considered approach to this problem based on the analyzing mobile's sensors.

Key words:road surface quality assessment system

УДК.519.65

М.С. Баранова, В.В. Гладков

ЯВНОЕ ОПИСАНИЕ ВСЕХ ВЕЙВЛЕТ - БАЗИСОВ ПЕРВОГО ЭТАПА ПРОСТРАНСТВА $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается задача конструирования ортонормированных базисов пространства $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$, которые могут быть получены циклическими сдвигам на четное число разрядов двух векторов. Такие базисы называются вейвлет - базисы первого этапа.

Пространство $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$можно интерпретировать как пространство дискретных сигналов заданных на конечном множестве. $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$- это евклидово пространство конечной размерности, поэтому в работе используются методы линейной алгебры.

В работе дано явное описание всех вейвлет-базисов первого этапа пространства $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$,.

В статье приведена процедура, позволяющая генерировать все вейвлет - базисы первого этапа. В качестве примера приведена процедура генерирования вещественного базиса Шеннона.

Ключевые слова: Вейвлеты. Ортонормированные базисы. Конечномерные евклидовы пространства

Введение

Основные обозначения взяты из [1]

1. $l^2\ (\mathbb{Z}_N)=\{z=(z(0),z(1),\dots,z(N-1)): z(j)\in\mathbb{C}, 0\le j\le N-1\}$–N-мерное пространство над полем комплексных чисел $\mathbb{C}$.
   Векторы этого пространства обозначаются или как строки или как столбцы
   $z(0),z(1),\dots,z(N-1)$ – компонента вектора z, вектор z считается периодическим с периодом N, $z(j+N)=z(j)$дляj $\in\mathbb{Z},\mathbb{Z}-$ множество целых чисел.

   Например, при N=12, z (-21) = z (-9) = z (-15) = z(27) =z (3).
2. <z,w>= $\sum_{k=0}^{N-1} z\,(k)\overline{w(k)}$ –скалярное произведение в$l^2\ (\mathbb{Z}_N)$, $\overline{w(k)}$ – число комплексно сопряженное к w(k).
3. $\|z\|=(\sum_{k=0}^{N-1}|z(k)|^2)^{1/2}$ – норма вектора z в $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$
4. Дискретное преобразование Фурье

$$\hat{z}(m)=\sum_{n=0}^{N-1} z(n)e^{-2\pi imn/N}$$

5. Обратное дискретное преобразование Фурье

$$\check{w}(n)=\frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1} w(m)e^{2\pi imn/N}$$

6. Оператор циклического сдвига

   $R_k z(n)=z(n-k)$ Для всех $n\in Z$
   Например

$$z=(2,3-i,2i,4+i,0,1)$$
$$R_2 z=(0,1,2,3-i,4+i)$$

7. z^{v} - обратно дискретно преобразование Фурье для вектора Z
8. $(\hat{z})^{v}$= z

В работе дается описание всевозможных ортонормированных базисов в $l^2(\mathrm{Z_N})$, которые могут быть получены с помощью четных целочисленных сдвигов двух N – мерных векторов.

Определение [1]:

Пусть *N=2M, M* $\in \mathbb{N}$
Ортонормированный базис $l^2(\mathbb{Z}_N)$ *вида*

$$B = \{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$$

Для некоторых $u, v \in l^2(\mathbb{Z}_N)$ называется вейвлет-базисом первого этапа $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$,
Векторы u *и* v называются порождающими векторами вейвлет – базиса первого этапа.
u – называется отцовским вейвлетом, а v – материнским вейвлетом.
В работе [1] получены необходимые и достаточные условия для того, чтобы множество векторов *B* было ортонормированным базисом $l^2\ (\mathbb{Z}_N)$, (т.е. вейвлет-базисом первого этапа).
Пусть *N=2M, M* $\in \mathbb{N}$, $u, v \in e^2\ (\mathbb{Z}_N)$, тогда множество векторов

$$B = \{R_{2k}u\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k}v\}_{k=0}^{M-1}$$

Есть ортонормированный базис $e^2(Z_N)$, если и только если матрицы

$$A(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} \hat{u}(n) & \hat{v}(n) \\ \hat{u}(n+m) & \hat{v}(n+m) \end{pmatrix} \qquad (1)$$

Унитарны для *n = 0, 1, …, M-1*.
Эквивалентно:
Если и только если

$$|\hat{v}(n)|^2 + |\hat{v}(n+m)|^2 = 2$$
$$|\hat{u}(n)|^2 + |\hat{u}(n+m)|^2 = 2$$

И $\hat{v}(n)\overline{\hat{u}(n)} + \hat{v}(n+m)\overline{\hat{u}(n+m)} = 0$
Для *m=0, 1,…, N-1*

Явное описание вейвлет базисов первого этапа

Найдем условия, при которых матрицы (1) унитарны при всех *n*=0,1, 2, …,*M*-1. Если матрицы (1) унитарны, то должно быть

$$\mathrm{A(n)A^*(n) = A^*(n)A(n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}} \qquad (2)$$

Где $\mathrm{A^*(n)}$ матрица, полученная из $\mathrm{A(n)}$ транспортированием и заменой элементов

матрицы $\mathrm{A(n)}$на комплексно сопряженные.

Из (2) следует, что для унитарности матрицы (1) необходимо:

$$|\hat{u}(n)|^2 + |\hat{v}(n)|^2 = 2$$
$$|\hat{u}(n)|^2 + |\hat{u}(n+m)|^2 = 2$$
$$|\hat{v}(n)|^2 + |\hat{v}(n+m)|^2 = 2$$
$$|\hat{u}(n+m)|^2 + |\hat{v}(n+m))|^2 = 2 \qquad (3)$$

Положим $\hat{u}(n) = r(n)e^{i\theta(n)}$ $(0\le r(n)\le\sqrt{2})$, тогда из соотношения (3) следует, что

$\hat{v}(n) = \sqrt{2 - r^2(n)}e^{i\sigma(n)}$, $\hat{u}(n+m) = \sqrt{2 - r^2(n)}e^{i\varphi(n)}$,$\hat{v}(n+m) = r(n)e^{i\rho(n)}$

Теперь можно считать, что система матриц A(n) имеет вид:

$$A(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} r(n)e^{i\theta(n)} & \sqrt{2 - r^2(n)}e^{i\sigma(n)} \\ \sqrt{2 - r^2(n)}e^{i\varphi(n)} & r(n)e^{i\rho(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Где $(0\le r(n)\le\sqrt{2})$

Для матриц (4) условия (3) выполнены

Пусть r(n)=0, тогда

$$A(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2}e^{i\sigma(n)} \\ \sqrt{2}e^{i\varphi(n)} & 0 \end{bmatrix}$$

Так как $A(n)A^*(n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, то такие матрицы унитарны при любых вещественных $\theta(n), \varphi(n), \sigma(n), \rho(n)$.

Если $r(n)=\sqrt{2}$, то

$$A(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} \sqrt{2}e^{i\varphi(n)} & 0 \\ 0 & \sqrt{2}e^{i\,\rho(n)} \end{bmatrix}$$

Для такой матрицы $A(n)A^*(n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

И значит такие матрицы унитарны при любых вещественных $\theta(n), \varphi(n), \sigma(n), \rho(n)$.

Пусть теперь $0<r(n)<\sqrt{2}$

Тогда $A(n)A^*(n) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 2 & (*) \\ (**) & 2 \end{pmatrix}$ где:

$(*) = r(n)\sqrt{2 - r^2(n)}(e^{i(\theta(n)-\varphi(n))} + e^{i(\sigma(n)-\rho(n))})$

$(**) = r(n)\sqrt{2 - r^2(n)}(e^{i(\varphi(n)-\theta(n))} + e^{i(\rho(n)-\sigma(n))})$

Так как $r(n)\sqrt{2 - r^2(n)} \ne 0$, то должно быть

$$e^{i(\theta(n)-\varphi(n))} = -e^{i(\sigma(n)-\rho(n))} = e^{i(\sigma(n)-\rho(n)+\pi)}$$

Аргументы этих комплексных чисел могут отличаться на $2\pi k$

$$\sigma(n) - \rho(n) = \sigma(n) - \rho(n) + \pi + 2\pi k$$

Или

$$\theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = (2k+1)\pi \quad (5)$$

Для некоторого $k=k(n)\in N$

С другой стороны если (5) выполнено, то матрицы A(n) унитарны для n=0,1, 2, …, M-1 и (5) является необходимым и достаточным условием унитарности матриц A(n) (4),в случае $0 < r(n) < \sqrt{2}$, а значит это необходимое и достаточное условие для того, что бы

$(\hat{u})^{\vee}$= u , $u(\hat{v})^{\vee} = v$

были порождающими векторами вейвлет-базисов первого этапа $l^2(\mathbb{Z}_N)$.

Вывод:

Предположим, что $M \epsilon \mathbb{N} u \mathbb{N} = 2M$.

1) Пусть $\left\{r(n)_{n=0}^{M-1}\right\}$ *вещественныыечисла, такиечто* $0 \le r(n) \le \sqrt{2}$ *длявсех* $n = 0,1, \dots, M-1.$

   Пусть $\{\theta(n)\}_{n=0}^{M-1}, \{\varphi(n)\}_{n=0}^{M-1}, \{\sigma(n)\}_{n=0}^{M-1}, \{\rho(n)\}_{n=0}^{M-1}$-

   - *вещественныыечисла, такиечто* $n \in \{0,1, \dots, M-1\} u$ $0 < r(n) < \sqrt{2}, mo \theta(n) + \rho(n) - \varphi(n) - \sigma(n) = (2k+1)\pi,$ *длянекоторых* $k = k(n) \in \mathbb{Z}$

   (Если $r(n) = 0$ *или* $r(n) = \sqrt{2}$, *то* $\theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n)$ – *любыевещественныечисла*)

   Определим $\hat{u}, \hat{v} \in l^2(\mathbb{Z}_N)$, положив $\hat{u}(n) = r(n) e^{i\theta(n)}$,

   $$\hat{u}\left(n + \frac{N}{2}\right) = \sqrt{2 - \left(r(n)\right)^2}\, e^{i\varphi(n)}, \hat{v}(n) = \sqrt{2 - \left(r(n)\right)^2}\, e^{i\sigma(n)} u$$

   $$\hat{v}\left(n + \frac{N}{2}\right) = r(n) e^{i\rho(n)} для n = 0,1, \dots, M-1.$$

   Определим $u, v \in l^2(\mathbb{Z}_N)$ как $u = (\hat{u})^{\vee} uv = (\hat{v})^{\vee}$.

   Тогда$\{R_{2k} v\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k} u\}_{k=0}^{M-1}$ есть ортонормированный базис $l^2(\mathbb{Z}_N)$.

2) Для любого вейвлет-базиса первого этапа $\{R_{2k} v\}_{k=0}^{M-1} \cup \{R_{2k} u\}_{k=0}^{M-1}$, векторы $\hat{u} u \hat{v}$ имеют вид, определенный в п.1, при некоторый вещественных $r(n), \theta(n), \rho(n), \varphi(n), \sigma(n),\ n = 0,1, \dots, M-1$, удовлетворяющих условиям $0 \le r(n) \le \sqrt{2}$ и $\theta + \rho - \varphi - \sigma = (2л+1)\pi$ для некоторого$k = k(n) \in \mathbb{Z}$, для каждого $n = 0,1, \dots, M-1.$

Пример генерирования вещественного базиса Шеннона первого этапа

Пусть $N = 8u$

$r = (\sqrt{2}, \sqrt{2}, 1, 0)$

$\theta = (0,0, \frac{\pi}{2}, 0)$

$\rho = (0,0, 0,0)$

$\varphi = (0,0, -\frac{\pi}{2}, 0)$

$\sigma = (0,0,0,0)$

Программа

$$[u, v] = wave(N, r, o, f, c, p)$$

Подсчитывает векторы $\hat{u}u\hat{v}$, по формулам

$$\hat{u} = r(n)e^{i\theta(n)}, \hat{u}\left(n + \frac{N}{2}\right) = \sqrt{2 - \left(r(n)\right)^2}e^{i\varphi(n)}$$

$$\hat{v}(n) = \sqrt{2 - \left(r(n)\right)^2}e^{i\sigma(n)}, \hat{v}\left(n + \frac{N}{2}\right) = r(n)e^{i\rho(n)}$$

$$n = 0,1, \dots, M - 1$$

При этом получаются векторы:

$$\hat{u} = (\sqrt{2}, \sqrt{2}, i, 0,0,0, -i, \sqrt{2})$$

$$\hat{v} = (0,0,1, \sqrt{2}, \sqrt{2}, \sqrt{2}i, 1,0)$$

Это есть преобразованные Фурье векторы uuv, которые образуют базис Шеннона [2].

Найдем обратное преобразование Фурье. Получим векторы uuv. Затем сформируем матрицу *x*, строки которой есть векторы uuvи их сдвиги на четное число разрядов. Это выполняется программой $[x] = bv\ (u, v, N)$. Для проверки ортонормированности полученного базиса вычисляется матриц $x^* x'$, которая оказывается единичной.

Вывод

В статье разработана процедура позволяющая генерировать вейвлет-базис первого этапа пространства $l^2(\mathrm{Z_N})$.

Библиографический список

1. М. Фрейзер. Введение в вейвлеты в свете линейной алгебры. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 487с
2. M.W. Wong. Discrete Fourier Analysis. Pseudo – Differential Operators Theory and Applications.Vol.5, 2011.-175c

M.S.Baranova, V.V. Gladkov

CHARACTERIZATION OF THE WAVELEY BASES OF THE FIRST-STAGE IN SPACE $l^2(\mathrm{Z_N})$.

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

Purpose: An important objective is to construct ortonormal bases B for $l^2(\mathrm{Z_N})$ such that B is time – localized, frequency-localized and there is a fast algorithm for the computation of $(\mathrm{Z_B})$ for all z in $l^2(\mathrm{Z_N})$.To study the wavelet bases first-stage in spaces $l^2(\mathrm{Z_N})$.
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 of the bases first-stage in spaces $l^2(\mathrm{Z_N})$.
Research limitation/implications: In this paper, we considered only discrete finite-dimensional space.
Originality/value: Necessary and sufficient conditions for existence of wavelet bases of the first-stage in spaces $l^2(\mathrm{Z_N})$ are proved/

Key words: linear space, wavelet bases, Discrete Fourier transform.

УДК 551.465

Баранова Е.А., Тугарёв А.М., Мазова Р.Х.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ЦУНАМИ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассмотрена цунамиопасность в Керченском проливе при возможных сильных цунамигенных землетрясений, очаги которых локализованы на входе и выходе из Керченского пролива. Рассмотрены два возможных сценария реализации землетрясений. Магнитуда возможного землетрясения предполагалась М=7. В рамках нелинейных уравнений мелкой воды проведено численное моделирование генерации и распространения волн цунами при данных локализациях источников. Получены волновые характеристики для двух симметричных задач: как при движении волны цунами из Черного моря через Керченский пролив в Азовское море и по всему Керченскому проливу, так и из Азовского моря в акваторию Черное море. Проведен детальный спектральный анализ полученных волновых характеристик для данных двух процессов. Получены оценки энергетических характеристик волновых процессов в районе строящегося Керченского моста. Получено, что наибольшая интенсивность волновой энергии может достигать 50 дБ. Показано, что усиление энергии волны цунами при подходе к Керченскому мосту, может привести к повреждению опор моста.

Ключевые слова: эпицентр землетрясения, волны цунами, численное моделирование, спектральные характеристики

Введение

Керченский пролив является важнейшей водной артерией, соединяющей акватории Черного и Азовского морей [1]. По данным гидрогеологов, Керченский пролив является фактически местом тектонического разлома, и Керченский и Таманский берега Рельеф дна Керченского пролива имеет достаточно сложное строение. Геологические условия в проливе достаточно сложные: сейсмичность, тектонический разлом, слабые грунты.

Проекты по строительству моста через Керченский пролив возникали неоднократно, однако все попытки были неудачными [2]. В 2014 году в связи с присоединением Крыма к России был предложен и одобрен проект по строительству моста. Планируемая высота моста 35м, длина - 19км [3]. Мост спроектирован с учетом устойчивости от землетрясений силой до 9,1 баллов. Однако, кроме учета возможности землетрясения в самой акватории Керченского пролива, необходимо учесть возможность появления волн цунами, пришедших как из акватории Черного, так и Азовского морей. Прогнозом цунами в Черном, Азовском морях занимался ряд авторов (см., например, [4]).

Численное моделирование

Для моделирования возможных катастрофических землетрясений с магнитудой 7 были выбраны два гипотетических очага землетрясения эллиптической формы с размерами около 16,4х68 км. Вдоль побережья рядом с прибрежными населенными пунктами и в местах, особенно важных для исследования, выставлены виртуальные мареографы (рис.1), регистрирующие уровень воды с шагом по времени. В работе рассмотрены локализация очага землетрясения перед Керченским проливом к северо-востоку от Крымского полуострова в акватории Черного моря (Сценарий 1) (рис.2.1) и очаг землетрясения, локализованный в Азовском море перед Керченским проливом (Сценарий 2) (рис.3.1).

Для реализации виртуального процесса генерации волны цунами в сейсмическом источнике и ее дальнейшего распространения по акватории были рассмотрены два сценария, при которых рассматривалась генерация волн цунами эллиптическими очагами, при вертикальном равномерном смещении дна в очаге землетрясения на высоту 2.1м за 30сек. Для

описания волнового процесса для данных сценариев была использована нелинейная система уравнений мелкой воды в двумерной постановке с учетом диссипативных эффектов и донного трения (см., например, [5]).

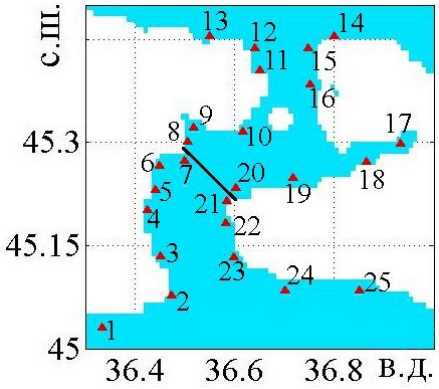


Рис.1. Локализация мареографов внутри Керченского пролива

При численном решении использовалась схема, аналогичная [6]. Расчетная область приходилась на квадрат 35^0-38^0 в.д., 44.5^0-47.5^0 с.ш. Расчеты производились на сетке из 345x361 узлов. Для моделирования использовалась батиметрия Керченского пролива, Азовского и Черного морей с разрешением 500 м. Шаг по времени составил 1с [5]. В последней мористой точке с глубиной 3м поставлено условие полного отражения, позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смещения волнового уровня. Были получены волновые поля смещений и поля скоростей вдоль северо-западного побережья Черного моря, побережий Азовского моря и вдоль побережий Керченского пролива.

Первый Сценарий рассматривает сейсмический очаг с локализацией на границе Черного моря и Керченского пролива. По данным, полученным в ходе расчетов, передний фронт волны, двигающийся в северном направлении к Керченскому проливу, подошел к заливу с высотой около 2,3м. Эти сведения подтвердились и данными с виртуальных мареографов, расположенных на входе в пролив. При движении волны в Керченском проливе ее высота уменьшается, и максимальное значение высоты переднего фронта волны составляет порядка 1,8м (рис.2.3). Через 1ч 05мин фронт достигает сначала правой опоры моста, при этом максимальная высота волны остается порядка 1.5м. Согласно данным мареографов (рис. 2.3), через 5 мин фронт достигает левой опоры моста, высота волны при этом чуть более 1м. В дальнейшем, при движении волны по Керченскому проливу , у левого края моста по мареограмме наблюдается более интенсивное волнение с бóльшим подъемом воды.

При втором Сценарии, для случая локализации очага в Азовском море у входа в Керченский пролив, высота волны в самом начале движения внутри пролива составляет более 1,5м (рис. 3.2). С течением времени она уменьшается. К моменту t=1ч 46мин 40с, когда фронт достигает правой опоры моста, максимальная высота составляет всего 0,5м. Примерно через 10мин волна доходит до левого края моста с высотой 40см. Все это подтверждается и данными с мареографов, расположенных в зоне Керченского пролива (рис.3.2). В отличие от предыдущего сценария высоты волн в Керченском проливе заметно меньше - до полуметра. Основной удар волны приходится на южное побережье Таманского залива. Характерной чертой распространения цунами по проливу является плоская форма волнового фронта, как при движении вдоль косы Чушка, так и при подходе непосредственно к мосту. Заметим, что высота волны здесь существенно меньше, чем в первом случае, однако, атаке подвергается сразу вся конструкция моста.

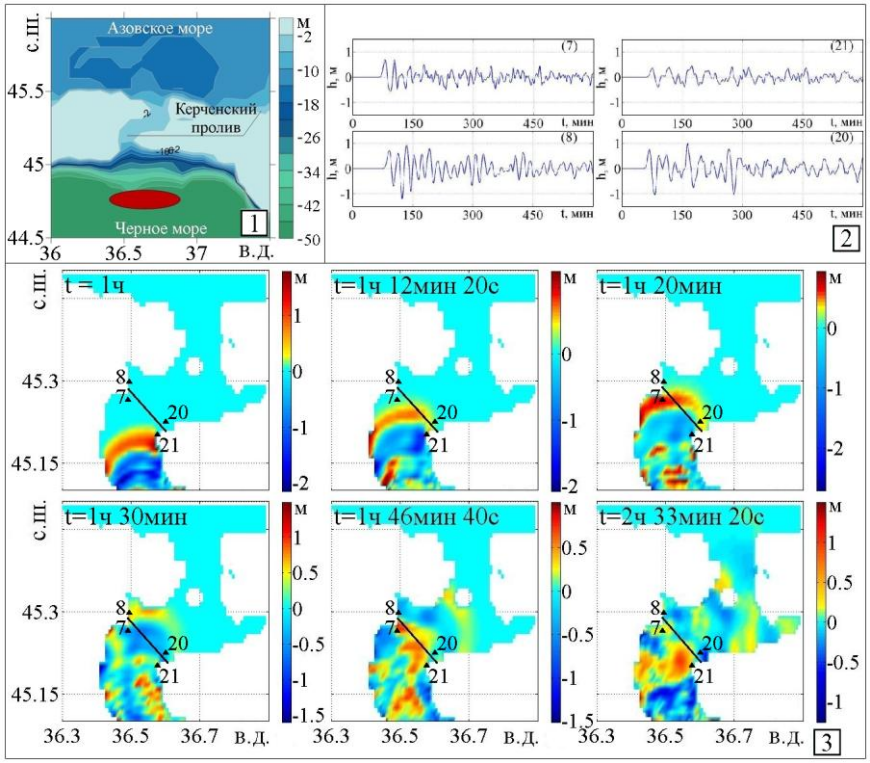


Рис.2. 1 - положение рассматриваемого очага цунами для сценария 1; 2 - данные с виртуальных мареографов, локализованных внутри Керченского пролива, для сценария 1; 3 - положения фронтов волн цунами в акватории Керченского пролива для сценария 1

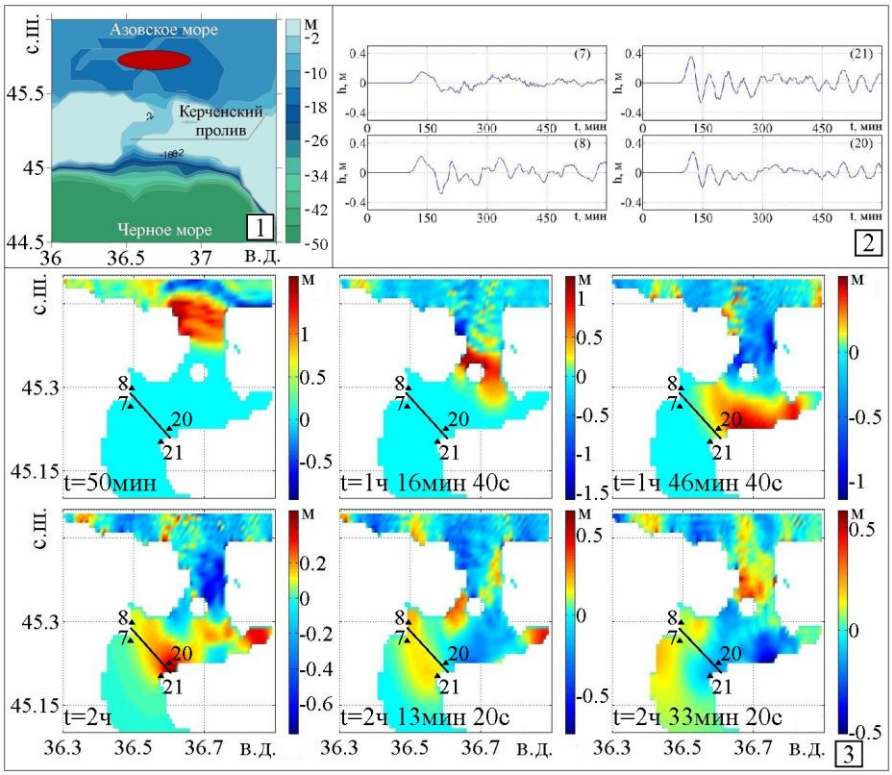


Рис.3. 1 - положение рассматриваемого очага цунами для сценария 2; 2 - данные с виртуальных мареографов, локализованных внутри Керченского пролива, для сценария 2; 3 - положения фронтов волн цунами в акватории Керченского пролива для сценария 2

Спектральный анализ

Для анализа возможных катастрофических волновых процессов при реализации сильных или катастрофических цунами в Керченском проливе, был проведен спектральный анализ полученных волновых характеристик [7], [8]. Исследование было проведено на базе мареограмм, полученных с виртуальных мареографов, локализованных вдоль Керченского пролива, Черного и Азовского морей. Были рассмотрены мареограммы, полученные в двух случаях: при численном моделировании при Сценарии 1 и Сценарии 2. Используя эти данные, были построены энергетические характеристики процесса цунами: частотная характеристика волновой энергии, мгновенная мощность волнового фронта и wavelet-спектрограмма.

На рис. 4.1 приведена мареограмма для п.2, который находится у западной границы входа в Керченский залив. Волна доходит до этого пункта спустя 20 минут после начала исследования. Максимальная высота волны в этом пункте достигает 2.7 метров на интервале Δt от 20 до 70 минут. На графике мгновенной мощности (рис. 4.2) так же хорошо заметен пик на интервале от 20 до 70 минут. На wavelet-спектрограмме (рис. 4.3) хорошо видно, что на интервале Δt от 0 до 300 мин энергия волны распределена практически равномерно по всей частотной области с интенсивностью до 50дБ, однако, основная доля энергии волны сконцентрирована в области низких частот в диапазоне 1-2,5 цикл/час, что соответствует Т ~ 15-60 минутным волнам, для интервала времени Δt от 0 до 180 мин. Интенсивность около 60 Дб. На рис. 4.4 представлена энергетическая кривая для пункта 2. Хорошо видно, что энергетическая кривая имеет пик в частотной промежутке от 1 до 4 цикл/час.

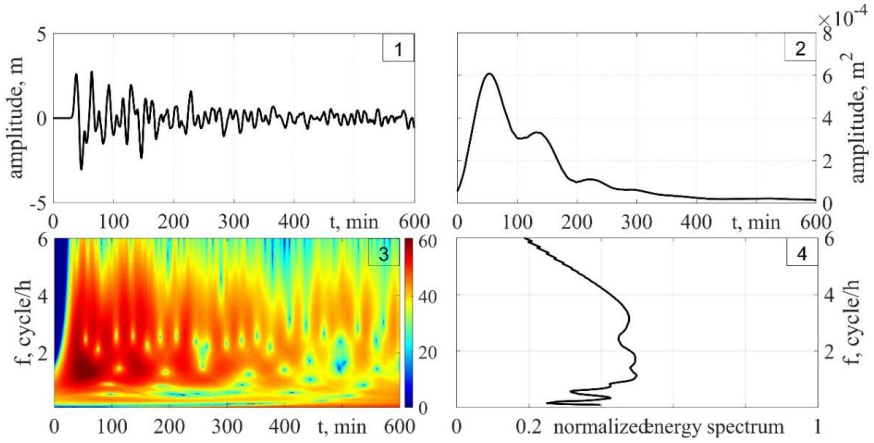


Рис.4. Энергетические характеристики цунами (мареограф 2): 1 - мареограмма, 2 - мгновенная мощность для волнового фронта, 3 - wavelet-спектрограмма, 4 - частотная характеристика волновой энергии

В пункт 7, расположенный у южной опоры моста рядом с Керченским полуостровом волна доходит спустя 70 - 80 мин после начала исследования. Максимальная амплитуда волны значительно меньше, чем при входе в пролив, что хорошо видно на мареограмме для этого пункта (рис 5.1). Мгновенная мощность (рис 5.2) волны так же становится на порядок ниже. Её пик приходится на временной интервал 90 - 100 мин. На wavelet-спектрограмме (рис 5.3) хорошо видно, что энергия волны цунами распределена не так равномерно, как на входе в пролив. Основная энергия сконцентрирована в частотном интервале 1-3 цикл/час для временного промежутка 70 - 120 мин. Интенсивность - 50 дБ. На графике энергетической кривой (рис 5.4) так же хорошо видно, что основная частотная составляющая волны цунами локализована в частотной области 1 – 2 цикл/час.

Как видно на рисунке 6, на выходе из Керченского пролива волна цунами теряет свою силу. Как видно на мареограмме для пункта 12 (рис. 6.1), расположенного у села Юркино,

высота волны не превышает 0.1 метра, а для пункта Приазовское 0.2 метра. Энергия, как видно из спектрограмм (рис. 6.3) сосредоточена так же в низкочастотной области, но её интенсивность не превышает 40 дБ.

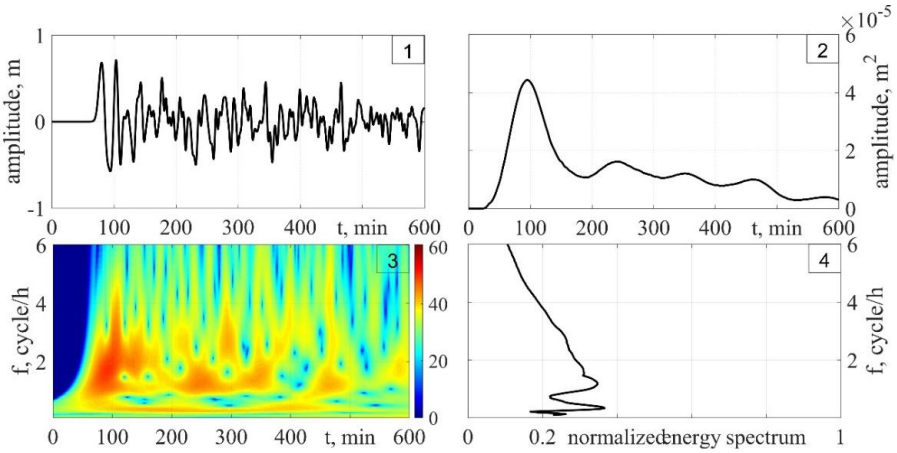


Рис. 5. Энергетические характеристики цунами (мареограф 7): 1 - мареограмма, 2 - мгновенная мощность для волнового фронта, 3 - wavelet-спектрограмма, 4 - частотная характеристика волновой энергии

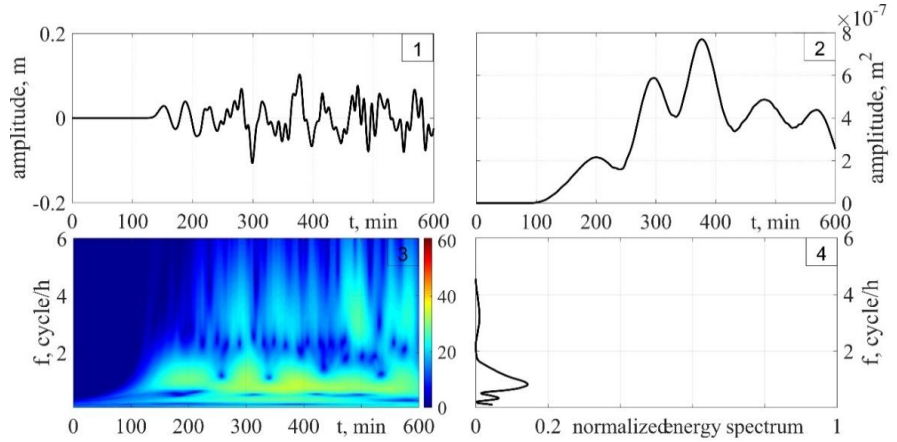


Рис. 6. Энергетические характеристики цунами (мареограф 12): 1 - мареограмма, 2 - мгновенная мощность для волнового фронта, 3 - wavelet-спектрограмма, 4 - частотная характеристика волновой энергии

Выводы

Полученные значения максимальных высот волн непосредственно связаны с выбором сценария реализации землетрясения в виртуальных сейсмических очагах. Кроме того, пересчет с изобаты на сухой берег может привести к значительному подрастанию высоты волны на берегу. В связи с этим, приведенные в работе значения расчетных высот волн от модельных сейсмических очагов на 3-ти метровой изобате, можно считать нижней оценкой при определении высот наката волн на берег. Проведенное численное моделирование показало, что при возможных сильных землетрясениях с магнитудой M=7 и более в акватории Черного моря, высоты волн цунами в Керченском проливе в районе строящегося моста достигают 1.5-2 м, что может привести к большой нагрузке на опоры строящегося моста. Проведенный в работе спектральный анализ показал, что наибольшая волновая энергия в основном будет сосредоточена в низкочастотной составляющей спектра, что соответствует периодам волн порядка 20-60 мин. Наибольшая интенсивность волновой энергии может достигать 50 дБ. В районе расположения восточной части моста ширина частотной области, где сосредоточена

основная энергия, увеличивается в полтора раза (1-3 цикл/ч) и интенсивность так же увеличивается в ~ 1.3 раза, хотя основная частотная составляющая волны цунами остается практически без изменения. Усиление энергии волны цунами при подходе к Керченскому мосту, вызванное переотражениями волны в районе моста может привести к повреждению опор моста.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00095).

Библиографический список

1. Тормасов Ю.Б. Проект-концепция «Универсальный транспортный переход через Керченский пролив» [Электронный ресурс] / http://kerch-most.ru/pdf/orig-booklet_3docx.pdf
2. Грищенко В.Н. Краткая история [Электронный ресурс] / http://kerch-most.ru/kratkaya-istoriya.html
3. Мост в Крым, скорее всего, построят через косу Тузла [Электронный ресурс] / Добавлено 5.06. 2014. - Проверено 31.03.2017. https://ria.ru/crimea_today/20140605/1010792003.html
4. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С. 21-31
5. Mazova R.Kh., Kiselman B.A., Kolchina E.A. Numerical simulation of tsunami wave height distribution for Turkish Black Sea coast in nonlinear dynamic keyboard model of underwater seismic source // Journal of Computational and Applied Mathematics, 2013, 259, 887-896.
6. Sielecki, A., and M. Wurtele, The numerical integration of the nonlinear shallow water equations with sloping boundaries // J.Comput. Phys., 6, 219, 1970 doi:10.1016/0021- 9991(70)90022-7.
7. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / пер. с англ. Хабаров О. И., Сидорова Г.А. – Москва: Мир, 1990. – 53с
8. Карташев В. Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров [Текст] / Карташев В. Г. – Москва: Высшая школа 1982 – 81-85с

Baranova E.A., Tugaryov A.M., Mazova R.Kh.

INVESTIGATION OF SPECIFIC FEATURES AND SPECTRAL ANALYSIS OF THE WAVE FIELD OF TSUNAMI IN THE KERCHEN STRAW

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

The work considers tsunami-hazard in the Kerch Strait at possible strong tsunamigenic earthquakes, the source of which are localized at the entrance and exit from the Kerch Strait. Two possible scenarios for the realization of earthquakes are considered. The magnitude of a possible earthquake was assumed to be M = 7. Numerical modeling of generation and propagation of tsunami waves was carried out within the framework of nonlinear shallow water equations for given source localizations. The wave characteristics for two symmetric problems are obtained: as when a tsunami wave moves from the Black Sea through the Kerch Strait to the Sea of Azov and throughout the Kerch Strait, and from the Sea of Azov to the Black Sea. A detailed spectral analysis of the obtained wave characteristics for these two processes is carried out. The energy characteristics of the wave processes in the area of the Kerch bridge under construction are estimated. It is received, that the greatest intensity of wave energy can reach 50 dB. It is shown that the amplification of the tsunami wave energy when approaching the Kerch bridge may damage the bridge supports.

Keywords: epicenter of the earthquake, tsunami waves, numerical simulation, spectral characteristics of the wave field

УДК 004.42

И.И. Бычков, А.А. Куркин

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Гидродинамическая установка разработан с целью проведения лабораторных экспериментов по измерению волн на воде. Для управления оборудованием было разработано программное обеспечение, осуществляющее считывание, обработку и визуализацию данных. Для обеспечения стабильности работы программы была разработана многоуровневая архитектура, детали которой обсуждаются в докладе.

Ключевые слова: гидродинамическая установка; архитектура; датчики; программное обеспечение; протокол; Arduino.

На базе НГТУ им. Р.Е.Алексеева построена гидродинамическая установка для проведения лабораторных экспериментов с целью измерения волн на воде. Установка оснащена вертикальной перегородкой, разделяющей две полуемкости, весельным волнопродуктором, способным совершать колебательные движения частотой 0.1-10 Гц и угловой амплитудой до 15 градусов, ультразвуковыми датчиками, измеряющими уровень воды в бассейне, аварийными датчиками перелива, насосами, которые подают жидкость, клапанами подачи и слива воды.. Аварийные датчики увеличивают надежность установки в целом, таким образом снижается вероятность того, что произойдет аварийный перелив. За управление элементами оборудования отвечает управляющий компьютер на базе платформы Arduino Mega, представляющей собой небольшую плату с процессором AVR и памятью. Для управления оборудованием необходимо разработать программный комплекс, представляющий собой программу для Arduino и клиентское приложение, запускающееся на персональном компьютере оператора, и взаимодействующее с Arduino через последовательное соединение. Важнейшим этапом разработки является разработка надежной, гибкой и легко поддерживаемой архитектуры, способной обеспечить сохранность оборудования гидродинамической установки.

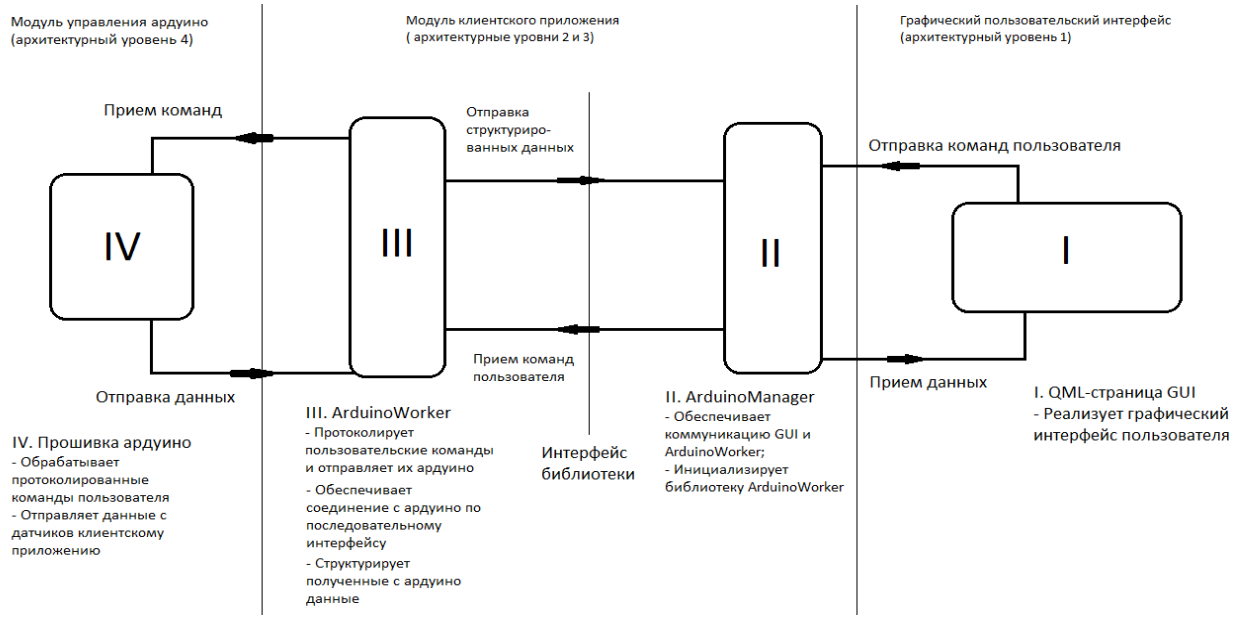


Рис. 1. Общая схема информационной системы программного комплекса

Рассмотрим подробнее каждый элемент архитектуры.

1-й архитектурный уровень (Графический пользовательский интерфейс).

На данный момент разработан графический пользовательский интерфейс, предоставляющий пользователю блок управления наполнения и сливом емкостей экспериментального лотка, блок управления вертикальной перегородкой, отображает в реальном времени уровни воды в каждой полуемкости. Рассмотрим подробнее каждую функциональность:

***Наполнение левой/правой полуемкости*:** инициирует процесс отправки команды по наполнению левой/правой полуемкости, при получении данной команды модуль управления ардуино запустит соответствующий цикл обработки.

***Слив левой/правой полуемкости*:** инициирует процесс отправки команды по сливу воды в левой/правой полуемкости, при получении данной команды модуль управления ардуино запустит соответствующий цикл обработки.

Цикл наполнения/слива: инициирует процесс отправки команд по наполнению/сливу воды в обеих полуемкостях.

Опустить/поднять перегородку: инициирует процесс отправки команды опустить/поднять перегородку, команда поднятия перегородки параметризуется целочисленным значением задержки, которая произойдет перед запуском привода.

Стоп привода: инициирует процесс немедленной остановки привода.

Блок "история команд" отображает последовательность инициированных пользовательских команд.

2-й архитектурный уровень.

Данный архитектурный уровень представляет собой класс ArduinoManager, реализующий высокоуровневую логику взаимодействия графического пользовательского интерфейса с оборудованием. Функционал класса непосредственно взаимодействует с графическим пользовательским интерфейс с помощью механизма сигналов и слотов библиотеки Qt. Взаимодействие с нижним архитектурным уровнем (ArduinoWorker) происходит через интерфейс, реализация которого находится в динамически загружаемой библиотеке. Интерфейс предоставляет функцию отправки команды на ArduinoWorker. Прием данных с ArduinoWorker осуществляется с помощью механизма сигналов и слотов библиотеки Qt.

Инициализация. В точке входа клиентского приложения создается объект класса ArduinoManager. В конструкторе данного класса инициализируется объект класса ArduinoWorker путем загрузки динамической библиотеки ArduinoWorker. Загрузка осуществляется с помощью фабричного метода **createArduinoWorker()**, генерируемого библиотекой QLibrary. Затем происходит подключение слотов ArduinoManager и соответствующих сигналов ArduinoWorker, которые заранее регламентированы. Объект ArduinoWorker запускается в отдельном потоке, чтобы не тормозить графический пользовательский интерфейс.

Отправка команд (на примере поднятия вертикальной перегородки). ArduinoManager получает от GUI сигнал (возможно с параметром) о том, что необходимо отправить ардуино команду "поднять перегородку". Обработка данного сигнала происходит в соответствующем слоте-функции класса ArduinoManager. Данный слот вызывает функцию из предоставляемого интерфейса библиотеки ArduinoWorker, которая принимает в качестве параметра идентификатор, соответствующий команде "поднять перегородку". Далее ArduinoWorker распознает по индексу команду, протоколирует ее, т.е. генерирует строку-команду и отправляет ее непосредственно ардуино.

Прием данных. Полученные от ArduinoWorker сигналы автоматически инициируют запуск функций-слотов ArduinoManager и передают им на вход структурированные данные с ардуино и статус соединения с ардуино. Полученные данные с помощью механизма сигналов и слотов отправляются модулю графического пользовательского интерфейса, где происходит их визуализация.

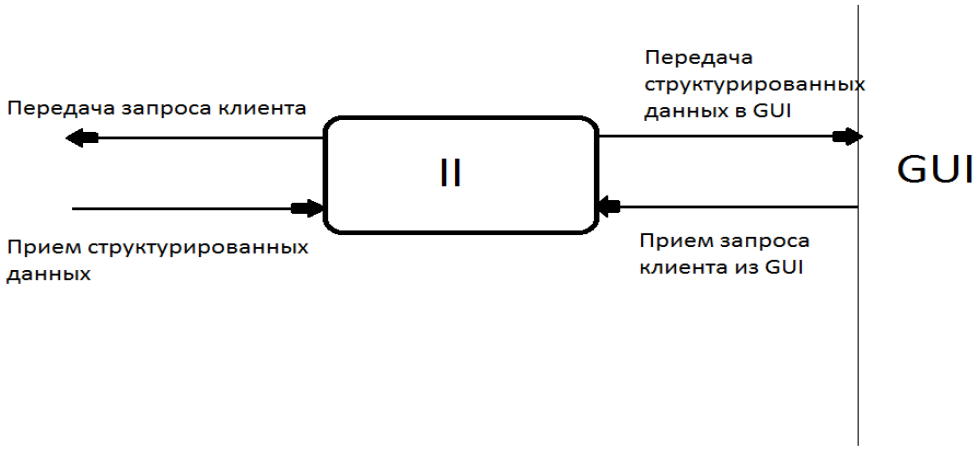


Рис. 2. Схема 2-го архитектурного уровня

3-й архитектурный уровень.

Данный архитектурный уровень представляет собой класс ArduinoWorker, реализующий низкоуровневую обработку данных на клиенте в отдельном потоке, чтобы не тормозить процесс графического пользовательского интерфейса. Функциональность класса реализована в динамической библиотеке и осуществляет инициализацию последовательного интерфейса с ардуино, генерацию команд для ардуино, распознаваемых по идентификатору, полученному от объекта ArduinoManager, а также структуризацию полученных с ардуино данных и отправку их объекту ArduinoManager. Взаимодействие с ардуино происходит по протоколу Firmata, синтаксический анализатор которого находится в открытом доступе, и более того он предоставляет возможность создания собственных команд.

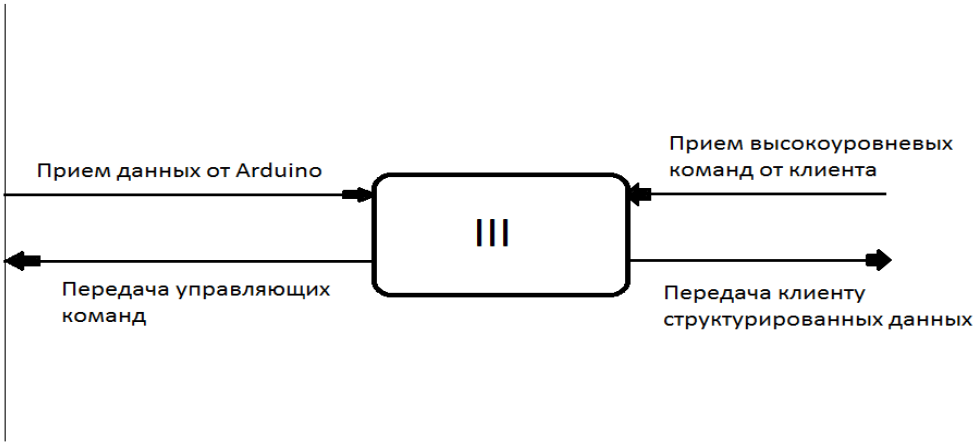


Рис. 3. Схема 3-го архитектурного уровня

4-й архитектурный уровень. (Модуль управления ардуино).

Данный уровень состоит из программы для процессора AVR, входящего в состав платформы Arduino Mega, и разрабатывался с учетом необходимости в автономности программной составляющей, работающей под ардуино. Программа обеспечивает передачу данных с датчиков оборудования без необходимости дополнительных запросов со стороны высших архитектурных уровней, и прием команд от клиента, которые преобразуются в низкоуровневые управляющие сигналы для оборудования. Команды отправки данных соответствуют протоколу Firmata и представляют собой последовательность байт, содержащие значения и номера портов входа Arduino, и идентифицируемая байтом-префиксом и байтом-суффиксом.

Обработка поступающих на ардуино команд реализована в стиле автоматной парадигмы программирования, т.е. модуль управления ардуино представляет собой систему, состоящую из конечных автоматов.

Модуль управления ардуино представляет собой бесконечный цикл, в котором происходит синтаксический анализ поступающих с клиентского приложения команд, передача команд и необходимых параметров соответствующим конечным автоматам, и отправка данных датчиков клиентскому приложения через последовательное соединение.

Рис. 4. Граф состояний и переходов конечного автомата, управляющего вертикальной перегородкой

В начальном состоянии ожидания команды конечный автомат считывает параметр, характеризующий текущую команду. После чтения параметр обнуляется и осуществляется переход на соответствующее состояние. В состоянии поднятия перегородки автомат отправляет сигнал на соответствующий выход ардуино с задержкой, передаваемой в качестве параметра вместе с командой. Если в этом состоянии была получена команда остановить привод, автомат прекращает обработку текущего состояния и переходит в состояние “стоп привода”, в котором отправляется нулевой сигнал на выше упоминавшийся выход ардуино, и происходит переход в начальное состояние. Обработка команды “опустить перегородку” происходит аналогичным образом.

Рис. 5. Граф состояний и переходов конечных автоматов, управляющих наполнением и сливом воды в левой/правой полуемкости.

Для каждой полуемкости инициализируется, представленный на рис.5 конечный автомат. В начальном состоянии ожидания команды конечный автомат считывает параметр, характеризующий текущую команду. После чтения параметр обнуляется и осуществляется переход на соответствующее состояние. В состоянии подачи воды автомат отправляет сигнал, открывающий клапан пробки, затем с задержкой в несколько секунд отправляет сигналы, открывающие клапан подачи воды и затем запускающие пускатель насоса. Если в этом состоянии была получена команда остановить подачу воды, автомат прекращает обработку текущего состояния и переходит в состояние “стоп подачи воды”, в котором отправляются нулевые сигналы на использованные в предыдущем состоянии выходы ардуино, и происходит переход в начальное состояние. Обработка команды “слив воды” происходит аналогичным образом.

Если модулю управления ардуино поступила команда старт/стоп цикла наполнения/слива воды, то инициализируются конечные автоматы обеих полуемкостей соответствующими командами.

Выводы

Был разработан программный комплекс для управления гидродинамической установкой на языках C++ и QML с использованием библиотеки Qt для написания клиентской составляющей комплекса, и расширении языка C для написания программы под Arduino. Разработанная информационная система соответствует требованиям к архитектуре.

Планы на будущее подразумевают оптимизационные улучшения программного кода комплекса, реализацию автоматизированного юнит-тестирования, функционального и интеграционного тестирования, реализацию системы обновления клиентского приложения, разработку установочного пакета, добавление новой высокоуровневой логики.

Библиографический список

1. Саммерфилд, М. Qt Профессиональное программирование: Изд-во Символ-Плюс, 2011. - 560 стр.
2. Страуструп, Б. Язык программирования С++: Пер. с англ. -3-е спец. изд. - М.: Бином, 2003. - 1104 с.
3. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы: 4-е изд. - СПб.: Питер, 2015. - 1120 с
4. Лафоре, Р. Объектно-ориентированное программирование в С++: СПб: Питер; Издание 4-е - Москва, 2003. - 928 с
5. Тюгин, Д.Ю., Куркин, А.А. Разработка программного обеспечения на основе технологии QtQuick/QML 5.7: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е.Алексеева. - Нижний Новгород, 2016. - 89 с.
6. Макконнелл, С. Совершенный код: Пер. с англ. - М. : Издательство «Русская редакция», 2010. - 896 с.
7. Влиссайдс, Д., Джонсон, Р., Хелм, Р., Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования.: СПб: Питер, 2001. - 368 с.
8. Керниган, Б., Ритчи, Д. Язык программирования С: 2-е изд.- М.: Вильямс, 2016.-288 с.
9. Фридл, Дж. Регулярные выражения: 3-е издание. - Пер. с англ. - СПб.: Символ Плюс,. 2008. - 608 с.
10. Шлее, М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на С++: СПб.: BHV, 2016. - 928 с.

I.I. Bychkov, A.A. Kurkin

DEVELOPMENT OF INFORMATION CONTROL SYSTEM OF HYDRODYNAMIC EQUIPMENT

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev

The hydrodynamic equipment was developed for the purpose of conducting laboratory experiments to measure waves on water. To manage the equipment, software has been developed that performs reading, processing and visualization of the data. Multitier architecture, the details of which are discussed in the report has been designed and implemented to ensure the stability of the program of work.

Keywords: hydrodynamic equipment; sensors; software; protocol; Arduino.

УДК 551.465

Мазова Р.Х, Тюнтяев С.М.

ЦУНАМИОПАСНОСТЬ ПОБЕРЕЖИЙ ГРЕЦИИ, ТУРЦИИ И КИПРА ОТ ВОЗМОЖНЫХ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты численного моделирования возможных сильных и катастрофических цунамигенных землетрясений в Средиземном море, с локализацией, близкой к локализации исторических катастрофических землетрясений 365г. вблизи о.Крит и 1948г. вблизи о.Карпатос. Численное моделирование проведено в рамках нелинейных уравнений мелкой воды с учетом диссипации. Геодинамические процессы в очаге во время землетрясения базируются на имеющихся в литературе сведениях о рассматриваемых землетрясениях, а также на данных по расположению зон активных разломов земной к в месте локализации источника. Даются оценки возможных максимальных высот волн вдоль рассмотренных побережий.

Ключевые слова: землетрясение и цунами; источники землетрясения; моделирование цунами.

В работе проведено численное моделирование возможных сильных землетрясений с магнитудами 7,5 и 8, с локализацией, близкой к локализации исторических катастрофических землетрясений 365 и 1948 годов, применяя клавишную модель с вертикальным смещением блоков [1-3]. В работе детально рассмотрен накат волн цунами на побережье Греции , о.Крит, о.Родос и на побережье Турции.

На рис. 1 изображено максимальное распределение высот волн на 5-ти метровой изобате. Хорошо видно, что наиболее опасными участками являются о. Крит, о. Иос, южное и юго-западное побережье Греции.

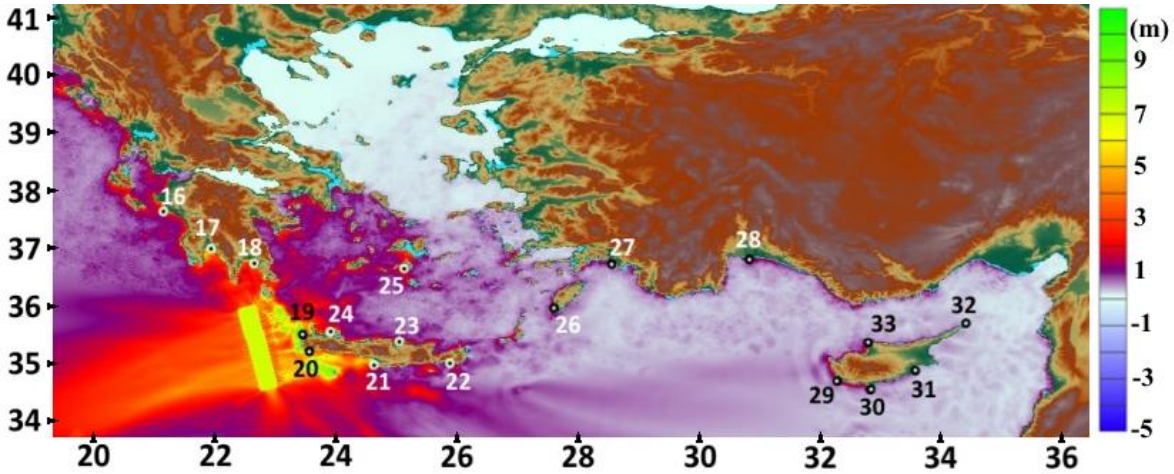


Рис.1. Распределение максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате

Более детально распределение максимальных высот волн вдоль побережья Греции можно видеть на рис. 2, где приведена двумерная гистограмма распределения максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате. При численном моделировании генерации и распространения волн цунами по акватории Средиземного моря для источников землетрясения различной динамики было получено, что на побережье Греции максимальные высоты волн в некоторых пунктах, расположенных в южной и юго-западной части Греции, могут достигать 8м. Так, например, в районе города Афины высоты волн изменяются от 0.1 до 2 метров, а в городе Каламата

максимальные высоты волн достигают до 6 метров. В районе города Глифада максимальные высоты волн доходят до 8 метров.

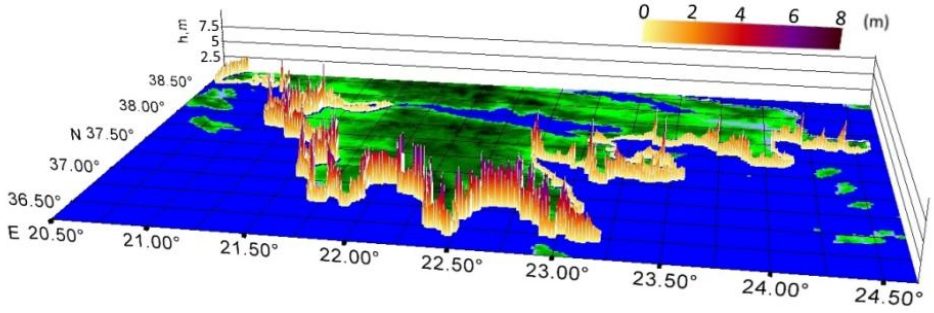


Рис.2. Двумерная гистограмма на побережье Греции для максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате

На рис.3 представлена двумерная гистограмма максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате на побережье о. Родос. Хорошо видно, что на южной части острова высоты изменяются от 0.1 до 1 метров, а на западной части острова максимальные высоты волн достигают 5м.

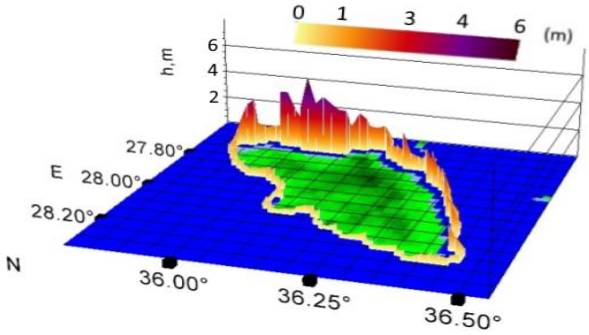


Рис.3. Двумерные гистограммы на побережье о. Родос для максимальных высот волн

На острове Крит (см. рис. 4) в посёлке Матала максимальные высоты могут достигать до 6 метров, в общине Макри-Ялос до 5 метров, а в районе города Ираклион до 4 метров. Наибольшие значения высоты волн в ряде пунктов могут достигать до 9 метров (рис.4).

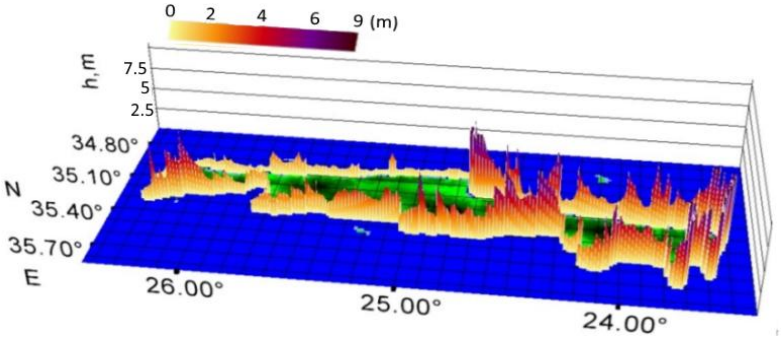


Рис.4. Двумерные гистограммы на побережье о. Крит для максимальных высот волн

На рис.5, хорошо видно, что для побережья о. Кипр высоты волн в некоторых пунктах могут достигать 5м, а именно в районе города Пафос высоты изменяются от до 0.2 до 2.5 метров, а в посёлке Ливера от 2 до 5 метров.

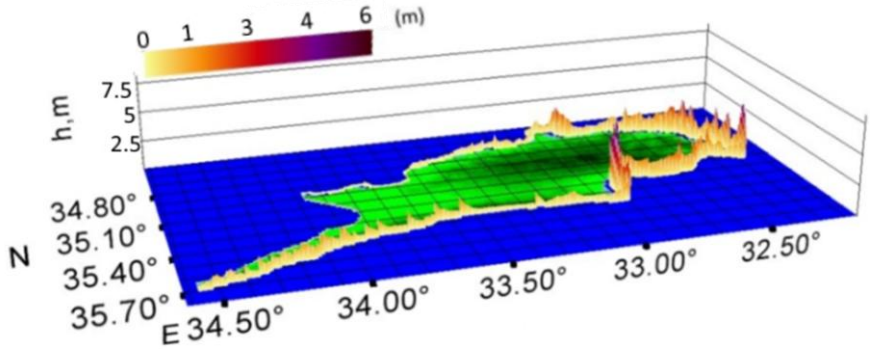


Рис.5. Двумерные гистограммы на побережье о.Кипр для максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате

Также на рис.3, видно, что на побережье Турции максимальные высоты волн достигают до 5м. Так, в курортном городе Белек максимальные высоты волн изменяются от 0.5 до 1.5 метров.

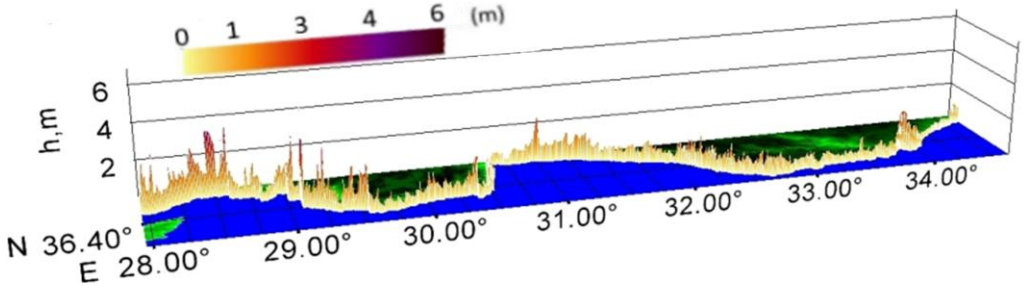


Рис.6. Двумерные гистограммы на побережье Турции для максимальных высот волн на 5-ти метровой изобате

Выводы

В работе показано, что геодинамическая модель сейсмического очага землетрясения позволяет подобрать те варианты динамики в очаге, которые наиболее адекватно оценивают возможные волновые процессы при катастрофических и сильных землетрясениях в Средиземном море, а также позволяют оценить возможные характеристики волн цунами на побережьях Греции, Турции и Кипра. Таким образом, максимальные высоты волн для ближнеполевых цунами Средиземного моря могут достигать до 9м. Так, например, на побережье Греции максимальные высоты волн не превышают 8м, а на острове Крит 9м. Для дальнеполевых цунами максимальные высоты не превышают 5м.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00095).

Библиографический список

1. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранов Б.В., Катаева Л.Ю., Генерация и распространение цунами в Охотском море: возможные сценарии // ДАН, Т.410, С.528-532, 2006.
2. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранов Б.В., Катаева Л.Ю., Моделирование цунами в Охотском море на базе клавишной модели зоны субдукции // в кн.: Фундаментальные исследования океанов и морей (под ред. Лавёрова Н.П), М.: Наука, 2006, кн.1, с. 292-303.
3. Papadopoulos G.A., E.Daskalaki, A.Fokaefs, N.Giraleas, Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean Sea: Strong earthquakes and tsunamis in the west Hellenic arc and trench system // J.Earthquake and Tsunami V. 4, 145 (2010).
4. Lobkovsky L., Mazova R., Tyuntyaev S., Remizov I. Features and Pronlems with Historical Great Earthquakes and tsunamis in the Mediterranean Sea// Journal Science of Tsunami Hazards, Vol. 35, .No. 3, pp. 167 – 188, (2016).
5. Mazova R.Kh., Tyuntyaev S.M., Remizov I.V. Numerical simulation of two historical tsunami in Mediterranean Sea // 10th Annual Int. Conf. on Math.: Teach., Theory & Appl., 27-30 June 2016, Athens, Greece, Abstr.Book, p.37.
6. Mazova R.Kh.,,.Tyuntyaev S. Tsunami at Sicilian coast from numerical simulation of two historical Mediterranean earthquakes // 15th Plinius Conf. on Mediterranean Risks, Abstr.Book, 2015, p.17.

Mazova R.Kh, Tyuntyaev S.M.

TSUNAMI HAZARD OF THE COASTS OF GREECE, TURKEY AND CYPRUS FROM POSSIBLE CATASTROPHIC EARTHQUAKES IN THE MEDITERRANEAN SEA

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

The results of numerical simulation of possible strong and catastrophic tsunamigenic earthquakes in the Mediterranean Sea are presented, with localization close to the localization of historical catastrophic earthquakes of 365g. near the island of Crete and 1948. near the island of Karpatos. Numerical simulation was carried out within the framework of nonlinear shallow water equations taking into account dissipation. The geodynamic processes in the source during the earthquake are based on information available in the literature on the earthquakes in question, as well as on the data on the location of the zones of active faults in the earth's crust at the location of the source. Estimations of the possible maximum wave heights along the considered coasts are given.

Keywords: earthquake and tsunami, earthquake sources, tsunami source, tsunami modeling.

УДК 551.466

Е.Г. Шургалина[1,2], А.В. Кокорина[1], А.В. Слюняев[1], Е.Н. Пелиновский[1-4]

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В РАМКАХ УРАВНЕНИЯ КОРТЕВЕГА – ДЕ ВРИЗА

[1)] Институт прикладной физики РАН, [2)] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, [3)] Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, [4)] Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

Эволюция случайных волновых полей с начальным Гауссовым спектром в рамках уравнения Кортевега – де Вриза исследуется с помощью численного моделирования. Проанализировано поведение различных характеристик волновых полей: статистические моменты, спектры, экстремумы, функции распределения. Вычисления выполнены для разных значений параметра Урселла, характеризующего отношение нелинейности к дисперсии, а также для различных ширин начального спектра. Демонстрируется возможность образования аномально больших волн (волн-убийц) в сильно нелинейных случайных волновых полях.

Ключевые слова: уравнение Кортевега – де Вриза, случайные волны, мелкая вода, статистические моменты, спектры волн, функции распределения, волны-убийцы

Уравнение Кортевега-де Вриза является одной из основных моделей слабо нелинейных волн в слабо дисперсионных средах. Первоначально оно было получено для поверхностных волн на мелководье, а затем - для разных волн в несжимаемой и стратифицированной жидкости, магнитной гидродинамике, плазме, линиях электропередач и т. д. [1-3]. Данное уравнение мы используем для изучения нелинейной динамики случайных волн на мелкой воде. По-видимому, первые результаты исследований статистических характеристик поверхностных волн были получены Лонге-Хиггинсом [4]. Он получил функции распределения высот волн в предположении, что поверхностное волнение в линейном приближении (смещение уровня относительно невозмущенного состояния) в фиксированной точке является гауссовым случайным процессом. Однако значение нелинейного взаимодействия между волновыми компонентами оказывается очень велико, особенно на мелкой воде. Нелинейное взаимодействие нарушает гауссовость процесса, и поэтому достаточно важно исследовать роль нелинейности в формировании вероятностных распределений высот волн. Прямой численный счет является эффективным способом получения статистического материала, а также изучения свойств случайных полей и оценки влияния на них отдельных условий [5,6]. В данной работе посредством численного моделирования исследуется эволюция случайных волновых полей в рамках уравнения Кортевега – де Вриза:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{9Ur}\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \qquad (1)$$

Ur – параметр Урселла, характеризующий роль нелинейности и дисперсии: малые значения параметра характеризуют линейную задачу, большие – сильно нелинейную. В данной работе рассматривается достаточно большой диапазон значений Урселла: от 0.07 до 0.95. Начальное волновое поле задается случайной суперпозицией косинусов:

$$u(x,0) = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}+2} \sqrt{2S(k_i)\Delta k}\cos\left(k_i x + \varphi_i\right), \qquad (2)$$

где *k=[0:N/2+1]*dk* – волновые числа, $\Delta k = 2\pi / L$, $L = 200\pi$ - размер расчетной области, фазы φ_i распределены равномерно в интервале $(0,2\pi)$, число гармоник *N*=4096, шаг по пространству $\Delta x = L / N$. Начальный волновой спектр - *S(k)* имеет гауссову форму:

$$S(k) = Q \exp\left(-\frac{(k-k_0)^2}{2K^2} \right), \tag{3}$$

Центральное волновое число k_0=1, ширина спектра *K*=0.18, параметр $Q = \frac{1}{4K\sqrt{2\pi}}$ выбран таким образом, чтобы дисперсия всех волновых полей была одинаковой и равнялась 0.25. Для каждого значения *Ur* посчитано 150 реализаций. Каждая реализация состоит примерно из 100 волн. То есть для каждого Урселла просчитывается 15000 волн.

Моментальный профиль волновых реализаций при *t*=0 и *t*=100 для разных значений параметров Урселла представлен на рис.1. Видно, что чем выше нелинейность поля (чем больше параметр Урселла), тем асимметричнее становится волновое поле с течением времени.

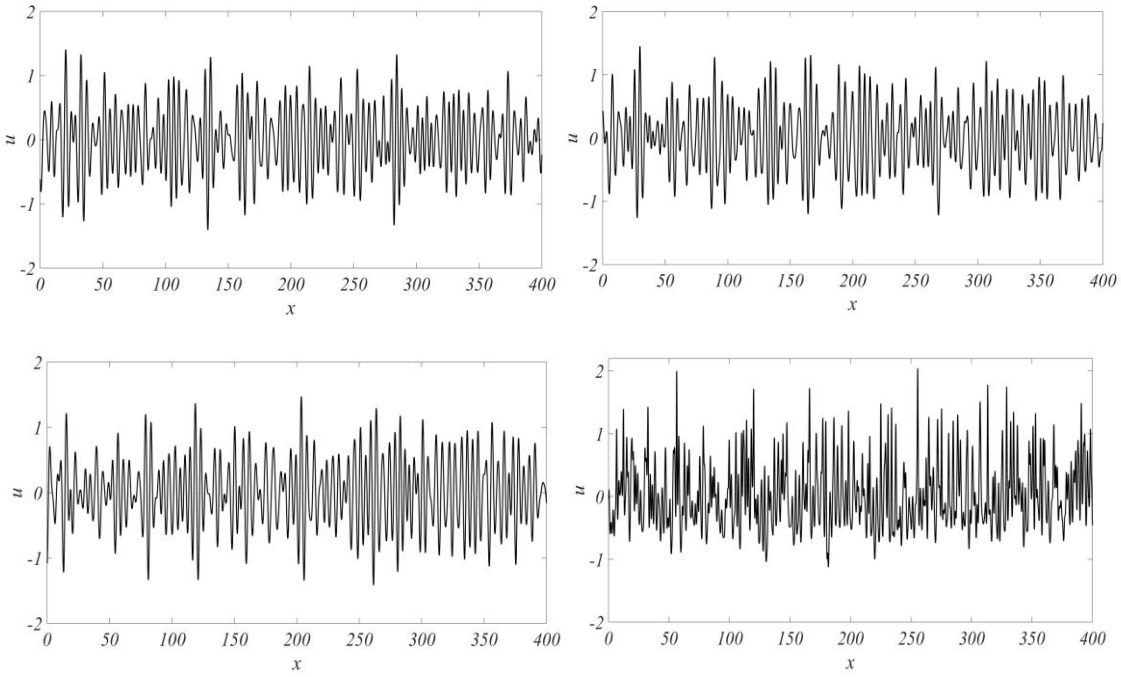
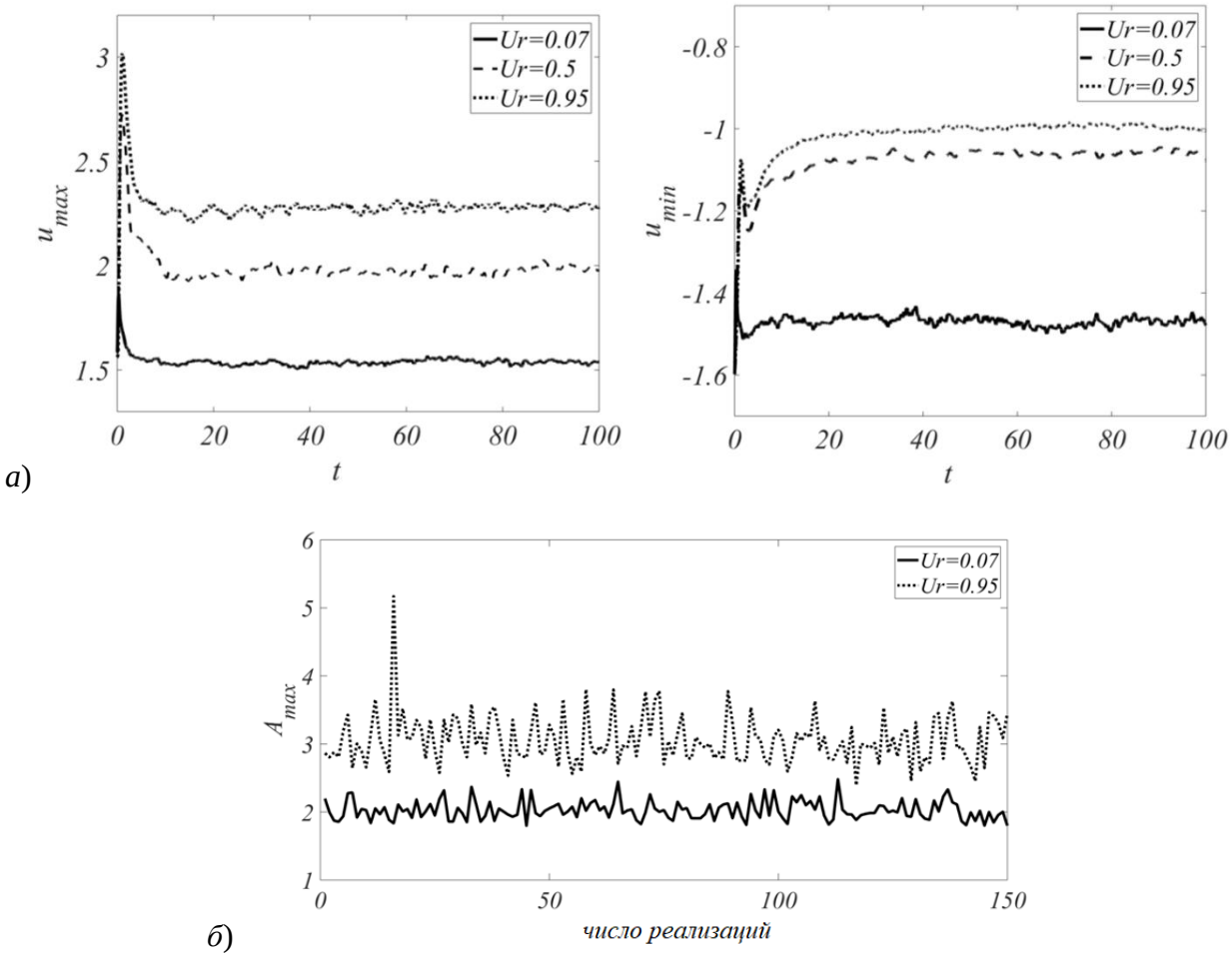


Рис. 1. Волновые поля при *t*=0 (левый столбец) и *t*=100 (правый столбец) для разных значений *Ur*. Верхние рисунки - *Ur=0.07*, нижние - *Ur*=0.95

Нелинейность значительным образом влияет на динамику волновых полей, в том числе на экстремумы. Рис. 2*а* демонстрирует усредненные по 150 реализациям эволюции значений максимумов и минимумов волновых полей. Большие значения максимумов соответствуют большим значениям числа Урселла. Примечательно, что при малых временах на обоих рисунках наблюдается резкий скачок, который соответствует так называемой переходной зоне. Рис. 2*б* демонстрирует максимальные значения амплитуд волн при разных значениях Урселла. В сильно нелинейном случае (*Ur*=0.95) максимальные амплитуды волн в среднем в 1.5 раза больше, чем в слабо нелинейном случае (*Ur*=0.07). Также в первом случае наблюдается аномально большая

амплитуда волны равная 5.2 безразмерным единицам. Поэтому в данном случае можно говорить о возникновении волны-убийцы [7-11].



а)

б)

Рис. 2. *а*) Экстремумы (усредненные по 150 реализациям) от времени для разных *Ur*, *б)* Максимальные значения положительных амплитуд волн для разных *Ur*

В теории турбулентности одними из наиболее важных величин являются статистические моменты. Первый и второй (среднее и дисперсия волнового поля) являются инвариантами уравнения Кортевега – де Вриза и они сохраняются с течением времени. Третий и четвертый же моменты будут меняться с течением времени. Рис. 3 демонстрирует зависимость усредненных по 150 реализациям третьего и четвертого моментов поля от времени. После переходного периода (в среднем до t=6) асимметрия и эксцесс для всех значений параметра Урселла выходят на стационарное значение, причем, чем больше нелинейность, тем больше значения третьего момента. В случае нормального распределения (распределения Гаусса) M_3=M_4=0. Таким образом, поля, близкие к линейным (Ur=0.07), близки к нормальному распределению. Для значений Урселла меньших 0.5 эксцесс принимает отрицательные значения, что говорит об уменьшении вероятности возникновения аномально больших волн.

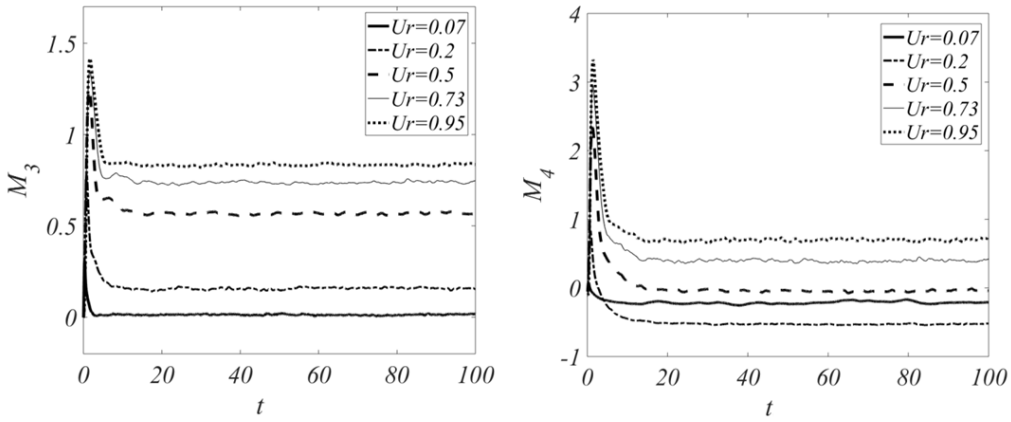


Рис. 3. Высшие статистические моменты (усреднение по 150 реализациям)

Функции распределения (усредненные по 150 реализациям) положительных амплитуд (A_+) и абсолютных значений отрицательных амплитуд ($|A_-|$) при t=100 представлены на рис. 4. Положительные амплитуды считаются как максимумы между соседними нулями, отрицательные – как минимумы. На всех графиках также представлено распределение Рэлея. В случае положительных амплитуд аналогично случаю волн на глубокой воде для сильно нелинейных волн (Ur>0.5) «хвосты» функции распределения значительно возрастают, говоря о значительном вкладе волн с большими амплитудами. В случае слабо нелинейных волн (Ur<0.2) функция распределения малых положительных амплитуд волн лежит выше распределения Рэлея, однако, в зоне больших амплитуд – ниже. Все функции распределения для абсолютных значений отрицательных амплитуд лежат ниже распределения Рэлея и чем больше Ur, тем ниже кривая. Это объясняется возрастанием асимметрии волн с увеличением нелинейности. Наиболее близкий случай к распределению Рэлея – при Ur=0.07.

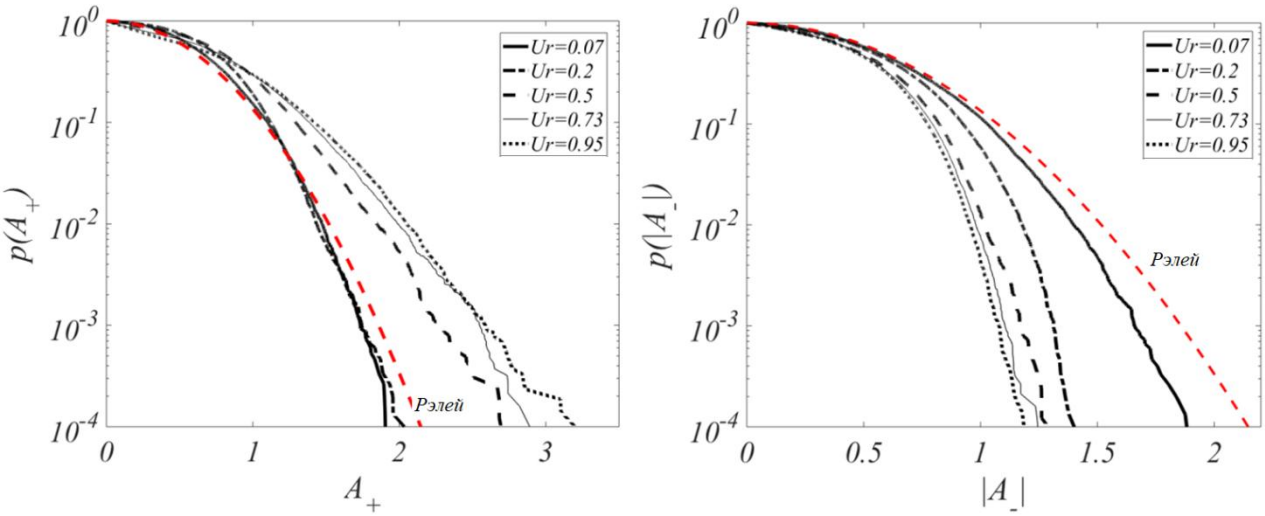


Рис. 4. Функции распределения положительных и отрицательных амплитуд

Далее исследуется трансформация волновых спектров. Рассматриваются четыре значения параметра Урселла (Ur=0.07 (почти линейный случай), 0.2, 0.5, 0.95 (сильно нелинейный случай)), что дает возможность проследить влияние нелинейности на эволюцию спектров. Для каждого значения параметра Урселла строится спектр в разные моменты времени: t=0, 20, 50, 80.

Все спектры усреднены по 150 реализациям. Начальный спектр во всех случаях имеет ширину K=0.18. С течением времени ширины спектров увеличиваются и спектры стремятся к некому стационарному состоянию. Основная энергия сосредотачивается в области малых значений волновых чисел. Для малых значений параметра Урселла у спектров со образуется второй пик, соответствующий второй гармонике несущей волны.

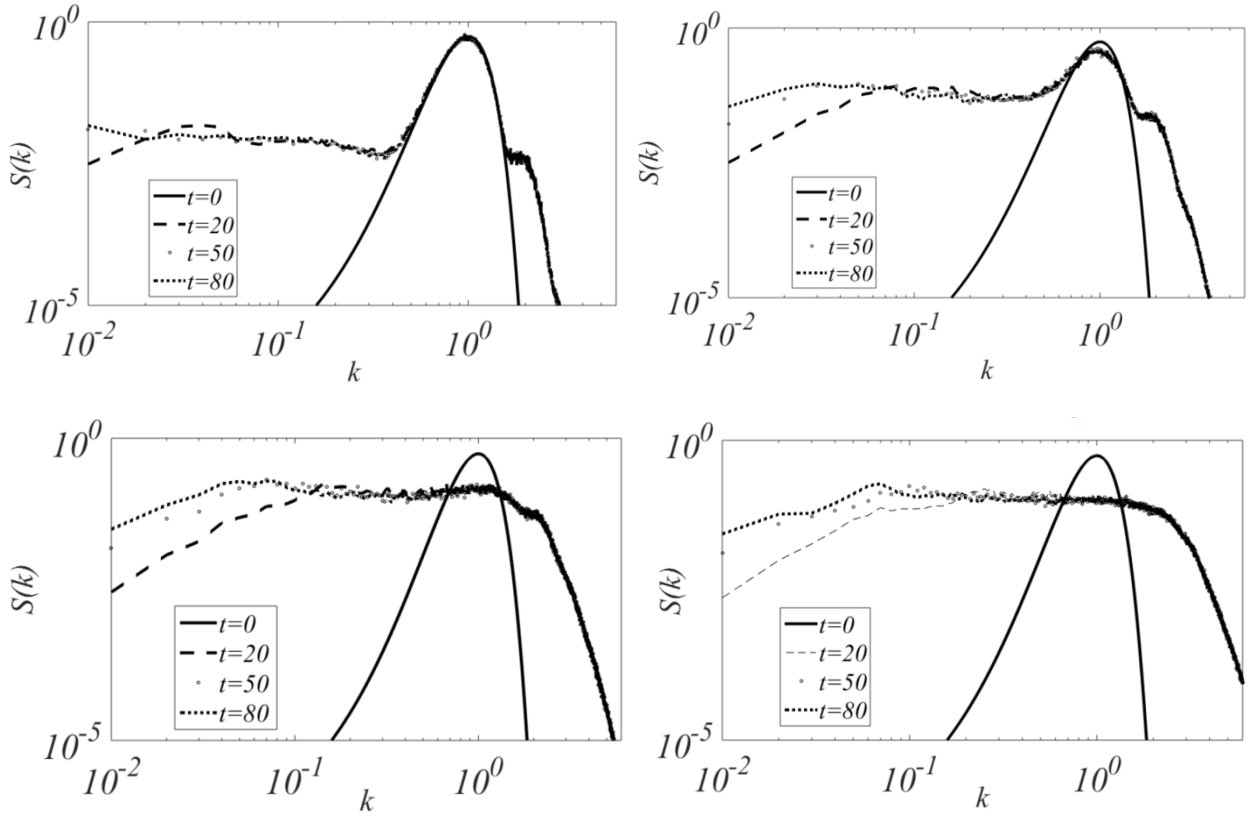


Рис. 5. Усредненные спектры волн в разные моменты времени (*Ur*=0.07 – верхний левый, 0.2 – верхний правый, 0.5 – нижний левый, 0.95 – нижний правый)

Помимо функций распределения амплитуд волн информацию об особенностях волновой поверхности могут содержать функции распределения смещения волновой поверхности. Соответствующие плотности вероятностей представлены на рис. 6 (в моменты времени t=0 и t=100, в обычных и логарифмических координатах). В начальный момент времени практически все функции лежат ниже гауссовой кривой, однако стечением времени графики значительно меняются. Отрицательные части графиков для всех значений параметра Урселла ещё сильнее отклоняются от Гаусса, положительные же значения значительно увеличиваются, причем сильнее всего – для больших значений параметра Урселла. График плотности вероятности становится асимметричным (особенно для больших значений *Ur*), он наклоняется в сторону отрицательных величин. Это объясняется тем, что хоть амплитуды положительных волн резко увеличиваются, но «точек смещений» положительных волн становится меньше, чем отрицательных, описывающих пологие впадины «отрицательных волн».

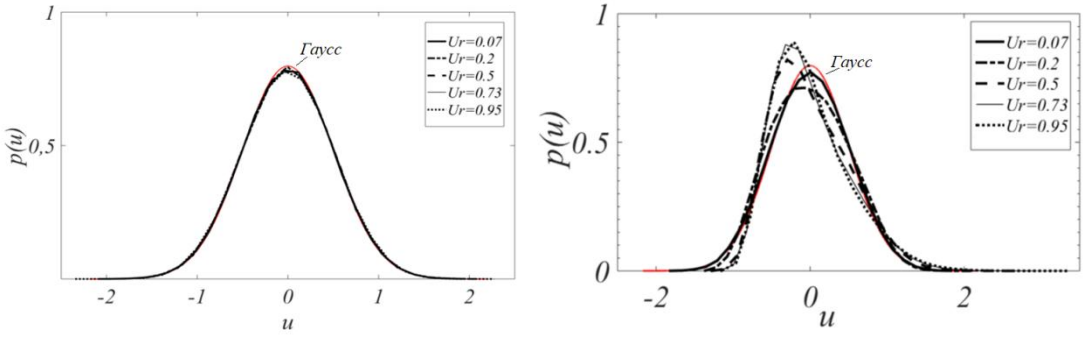


Рис. 6. Плотность вероятности, слева *t*=0, справа *t*=100.

Заключение

Данная работа посвящена изучению динамики случайных волн на мелкой воде в рамках уравнения Кортевега – де Вриза. Показано, что при увеличении значения параметра Урселла высшие статистические моменты и максимумы полей возрастают. Функции распределения амплитуд волн также демонстрируют роль нелинейности в процессе формирования аномально больших волн. В случае положительных амплитуд, сосчитанных как максимум между двумя нулями, функции распределения лежат выше теоретического распределения Рэлея при больших значениях параметра Урселла. В случае же отрицательных волн – наоборот, ниже, так как в результате нелинейного взаимодействия амплитуды отрицательных волн уменьшаются. Изначально симметричный волновой спектр гауссовой формы расширяется в результате волнового взаимодействия. С течением времени спектр принимает стационарную форму. Параметр Урселла влияет на ширину установившегося спектра: в случае большей нелинейности спектр будет шире, а энергия распределяется почти равномерно в диапазоне длинных волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-55-52019 и 16-32-60012.

Библиографический список

1. Whitham, G.B. Linear and Nonlinear Waves. Wiley. 1974.
2. Newell, A.C. Solitons in Mathematics and Physics. SIAM. Philadelphia. 1985.
3. Engelbrecht, J. Nonlinear Wave Dynamics: Complexity and Simplicity. Kluwer Acad. Publishers. 1997.
4. Лонге-Хиггинс, М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности. М.: Мир. 1962. С. 125-218.
5. Pelinovsky, E. Numerical modeling of the KdV random wave field / A. Sergeeva (Kokorina) // European Journal of Mechanics B/Fluids. 2006. V. 25. P. 425–434.
6. Sergeeva, A. Nonlinear random wave field in shallow water: variable Korteweg-de Vries framework / E. Pelinovsky, T. Talipova // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 323–330.
7. Pelinovsky, E. Nonlinear dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water / T. Talipova, C. Kharif // Physica D. 200. V. 147. P. 83–94.
8. Kharif, C., Formation de vagues géantes en eau peu profonde / E. Pelinovsky, T. Talipova // C. R. Acad. Sci. Paris. 2000. Ser. IIb 328. P. 801–807.
9. Kharif, C. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon / E. Pelinovsky // Eur. J. Mech. B Fluids. 2003. V. 22. P. 603–634.
10. Пелиновский, Е.Н. Волны-убийцы / А.В. Слюняев // Физика. 2006. №4.
11. Slunyaev, A.V. Soliton groups as the reason for extreme statistics of unidirectional sea waves / A.V. Kokorina // J. Ocean Eng. Marine Energy. 2017. V. 3. P. 395-408.

Shurgalina E.G.[1,2)], Kokorina A.V.[1)], Slunyaev A.V.[1)], Pelinovsky E.N.[1-4)]

STUDY OF CHARACTERISTICS OF RANDOM WAVE FIELDS WITHIN THE FRAMEWORKS KORTEWEG – DE VRIES EQUATION

[1)] Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, [2)] Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [3)] National Research University - Higher School of Economics, [4)] Special Design Bureau for Automation of Marine Research, FEB RAS

The evolution of random wave fields with an initial Gaussian spectrum shape within the framework of the Korteweg-de Vries equation is investigated using numerical simulation. The behavior of various characteristics of the wave fields is analyzed: statistical moments, spectra, extrema, distribution functions. The calculations are performed for different values of the Ursell parameter, which characterizes the ratio of nonlinearity to dispersion, and also for different widths of the initial spectrum. The possibility of formation of abnormally large waves (freak waves) in strongly nonlinear random wave fields is demonstrated.

Keywords: Korteweg – de Vries equation, random waves, shallow water, statistical moments, wave spectra, distribution functions, freak waves

УДК 517.9

Е.Н. Пелиновский[1-4], Е.Г. Шургалина[1,2], Т.Г. Талипова[1,2], Е. Тобиш[5]

УРАВНЕНИЯ ТИПА КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА В ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

[1] Институт прикладной физики РАН, [2] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, [3] Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, [4] Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, [5] Университет Кеплера, Линц, Австрия (Johannes Kepler University, Linz, Austria)

Уравнения типа Кортевега-де Вриза (КдВ) играют заметную роль в физике нелинейных волн и современной математической физике. Менее известны практические приложения этих уравнений, за исключением канонического уравнения Кортевега-де Вриза. В статье обсуждаются практические приложения семейства КдВ - уравнений и некоторые общие свойства их решений.

Ключевые слова: уравнения типа Кортевега – де Вриза, бегущие волны, солитоны

Введение

Уравнение Кортевега-де Вриза в канонических переменных

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \qquad (1)$$

выведенное Кортевегом и де Вризом в 1895 году для гравитационных волн на поверхности тонкого слоя воды, стало эталонным уравнением теории нелинейных волн после открытия способа точного его решения с помощью метода обратной задачи теории рассеяния, которое теперь воспроизводится во всех учебниках по теории нелинейных волн. Практически еще в 70-е годы прошлого столетия было показано, что это уравнение описывает широкий класс волновых процессов в плазме, астрофизике, океане и электродинамике. По-существу, оно получается в любых физических системах, в которых возможны слабо нелинейные и слабо дисперсионные волны, и его вывод делается в рамках первого приближения асимптотических разложений. Если, однако, квадратичная нелинейность отсутствует, то аналогично (1) может быть выведено модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза

$$\frac{\partial u}{\partial t} \pm 6u^2\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \qquad (2)$$

которое также полностью интегрируемое. Основываясь на методе обратной задачи теории рассеяния в 70-90-е годы, было выведено много уравнений КдВ типа (содержащих в правой части слагаемые, ответственные за нелинейность и дисперсию высших порядков, нелинейную дисперсию и т.п.), которые также были интегрируемы. Между тем, многие из них непригодны для практики, в частности, для численного решения. Так, например, учет дисперсии высшего порядка ведет к тому, что групповая скорость мелкомасштабных возмущений становится больше фазовой, в то время как в исходных уравнениях групповая скорость всегда меньше фазовой. Кроме того, такие уравнения часто имеют решения, которые не соответствуют известным данным о волнах в рамках полных по нелинейности уравнений. Именно поэтому с физической точки зрения разумно сводить расширенные версии уравнений КдВ типа к классическому КдВ уравнению с помощью асимптотических замен, используя малость нелинейности и дисперсии.

В настоящей работе дается сводка уравнений КдВ типа, которые имеют физический смысл, и не обладают "ложными" свойствами, о которых говорилось выше. Обсуждаются также общие свойства решений этих уравнений.

Семейство уравнений КдВ типа

Прежде всего, мы бы хотели сказать, что модифицированное КдВ уравнение (2) имеет широкую область применения в электродинамике, динамике размерно-квантованных пленок, в астрофизической плазме, в твердом теле, в динамике волн в стратифицированной жидкости при определенных условиях на стратификацию плотности. В частности, если имеется двухслойная жидкость, то коэффициент при кубическом нелинейном члене отрицателен, а если жидкость трехслойна, то возможны оба знака нелинейности [1]. Особый интерес вызывает уравнение (2) в случае положительного знака кубической нелинейности. Волновые пакеты при этом модуляционно неустойчивы, что приводит к появлению волн-убийц [2]. Более того, даже в солитонном газе возможно возникновение волн-убийц, правда, если солитонный газ содержит солитоны обеих полярностей [3].

Стратифицированная жидкость дает примеры нескольких уравнений КдВ типа, кроме указанных выше уравнений (1) и (2). Так, в трехслойной жидкости при определенных условиях на толщины слоев динамика нелинейных волн описывается КдВ уравнением 4-ого порядка [4]

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 6u^4 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0. \qquad (3)$$

Уравнение (3) уже не интегрируемо в общем случае, хотя структуру бегущих волн легко исследовать на фазовой плоскости. По-видимому, можно "организовать" и более высокие степени нелинейного слагаемого в случае более сложной плотностной стратификации жидкости, но это пока не сделано.

Для волн в упругих средах, свойства которых разные по отношению к растяжению или сжатию, недавно выведено "модульное" КдВ уравнение [5]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial |u|}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \qquad (4)$$

которое также неинтегрируемо. Для однополярных импульсов оно становится линейным, так что сразу ясно, что оно не допускает однополярных солитонов. Однако такие солитоны могут существовать на пьедестале.

Ионно-звуковые волны в плазме также описываются различными уравнениями КдВ типа. Так, если в плазме есть отрицательные ионы, то в зависимости от концентрации можно получить уравнение (1) или (2), см. [6,7]. Если же есть в плазме резонансные частицы, то динамика волн описывается уравнением Шамеля [8]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{5}{2}\frac{\partial |u|^{3/2}}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0. \qquad (5)$$

Оно нелинейно даже в случае однополярных импульсов и допускает существование солитонов на нулевом пьедестале.

В кристаллических решетках при определенных условиях длинные волны описываются лог-КдВ уравнением [9, 10]

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial(u\ln|u|)}{\partial x}+\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}=0. \qquad (6)$$

В рамках этого уравнения солитон описывается гауссовой функцией.

Приведенные примеры показывают широкое разнообразие уравнений КдВ типа, описывающих реальные физические ситуации. Важно, что все они сохраняют главное свойство исходных систем в линейном приближении: неизменность знака отношения групповой скорости к фазовой, так что возможные излучения волн (дисперсионных хвостов) происходят только в одном направлении.

Бегущие волны в системах, описываемых уравнениями КдВ типа

Для последующего анализа удобно записать уравнения КдВ типа в обобщенном виде

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}f(u)+\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}=0. \qquad (7)$$

Бегущие волны описываются простым уравнением второго порядка, вытекающим из (7)

$$\frac{d^2u}{dx^2}+f(u)-cu+B=0, \qquad (8)$$

где c - скорость движения волны, B - произвольная константа интегрирования. При исследовании солитонов с физической точки зрения можно считать пьедестал нулевым, иначе вывод уравнения КдВ типа необходимо проводить относительно другого невозмущенного уровня. Тогда $B = - f(0)$. Во всех рассматриваемых выше случаях $f(0) = 0$, так что $B = 0$. Интегрируя еще раз уравнение (8), получим

$$\frac{1}{2}\left(\frac{du}{dx}\right)^2+F(u)-\frac{c}{2}u^2=0, \qquad (9)$$

где $F(u)=\int_0^u f(v)dv$ и константа интегрирования выбрана равной нулю из условия нулевого пьедестала. В максимуме солитона $du/dx = 0$, поэтому легко находится связь скорости солитона с его амплитудой

$$c=\frac{2F(A)}{A^2}. \qquad (10)$$

Форма солитона легко находится из (9) в интегральной форме

$$\pm x=\int\frac{du}{\sqrt{cu^2-2F(u)}}. \qquad (11)$$

В случае $f(u)=|u|^m$, где m - любое число, не обязательно целое ($m > 1$), солитон описывается явной формулой

$$u(x,t)=A\,\mathrm{sech}^{\frac{2}{m-1}}\left[\frac{m-1}{2}\sqrt{\frac{A^{m-1}}{m+1}}(x-ct)\right], \qquad c=\frac{2}{m+1}A^{m-1}, \qquad (12)$$

за исключением случая $m = 1$ (модульное КдВ уравнение), для которого не существует солитонов на нулевом пьедестале, о чем уже говорилось выше. Отметим важные свойства солитона, в частности, подсчитаем его массу

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx \sim A^{\frac{3-m}{2}}, \quad (13)$$

и энергию

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x)dx \sim A^{\frac{5-m}{2}}. \quad (14)$$

Обратим внимание, что уже для модифицированного КдВ уравнения ($m = 3$) масса солитона не зависит от амплитуды. Это значит, что в задаче об эволюции начального возмущения можно сразу найти число генерируемых солитонов, подсчитав массу начального возмущения. С увеличением m масса солитона начинает падать с ростом его амплитуды и это уже означает необычность поведения солитона во внешних полях. С точки зрения энергии переходный режим осуществляется при $m = 5$, и с физической точки зрения солитон уже должен разрушаться, например, при введении сколько угодно малой диссипации, когда энергия должна только уменьшаться.

Эти простые соображения подкрепляются анализом устойчивости солитонов, а также прямого численного решения уравнения КдВ типа с $m \geq 5$, когда решения становятся неустойчивыми и взрываются на конечных временах [11, 12]. Отметим, правда, что если знак нелинейности отрицательный при $m = 5$, как в уравнении (3), то решение этого уравнения устойчиво, хотя оно не допускает солитонов на нулевом пьедестале. Таким образом, физически разумные уравнения КдВ типа, описывающие динамику солитонов должны быть ограничены не очень большими показателями степени нелинейности ($m \leq 4$). Это означает, что солитонный газ в такого рода уравнениях будет обладать в какой-то степени тривиальной динамикой, солитоны будут сохраняться (в интегрируемых системах) или жить конечное время (в неинтегрируемых системах). Тем не менее, в процессе их взаимодействия могут появляться очень большие волны, называемые волнами-убийцами, и этот процесс уже исследован нами для модифицированного КдВ уравнения (2), см., например [3].

Заключение

Итак, мы демонстрируем существование семейства уравнений КдВ типа, которые описывают разнообразные волновые процессы в океане, электродинамике и астрофизической плазме. Некоторые из них достаточно нетривиальные и содержат модули от волновых полей, что должно приводить к трудностям их численного решения. Пока в основном исследованы волновые процессы в средах с полиномиальной нелинейностью $f(u)=u^m$, а "модульные" уравнения еще предстоит исследовать. Отметим, что ранее обращалось внимание на интегрируемость уравнений КдВ типа и устойчивости солитона. Сейчас же пик исследований переносится здесь на так называемую солитонную турбулентность и возможность образования волн-убийц в солитонном газе. Точные результаты в этом направлении получены пока только для модифицированного КдВ уравнения [3].

Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.5176.2017/8.9), гранта Президента РФ по государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5, грантов РФФИ (17-05-00067, 16-02-00167, 16-05-00049, 16-32-60012), а также при поддержке Австрийского научного фонда (FWF), проекты P24671 и P30887.

Библиографический список

1. Grimshaw, R. The modified Korteweg - de Vries equation in the theory of large-amplitude internal waves / E. Pelinovsky, T. Talipova // Nonlinear Processes in Geophysics. 1997. V. 4. P. 237 - 350.
2. Grimshaw, R. Short-lived large-amplitude pulses in the nonlinear long-wave model described by the modified Korteweg–de Vries equation / E. Pelinovsky, T. Talipova, M. Ruderman, R. Erdelyi // Studied Applied Mathematics. 2005. V. 114. P. 189-210.
3. Пелиновский, Е.Н. Солитонный газ; взаимодействия, турбулентность и волны-убийцы / Е.Г. Шургалина, А.В. Слюняев // Нелинейные волны-2016. Нижний Новгород: ИПФ. 2017. С. 279-293.
4. Куркина, О.Е. Динамика солитонов неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза / А.А. Куркин, Е.А. Рувинская, Е.Н. Пелиновский, Т. Соомере // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 98-103.
5. Руденко, О.В. Модельные солитоны // ДАН. 2016. Т. 471. С. 651-654.
6. Ruderman, M.S. Dynamics of modulationally unstable ion-acoustic wave packets in plasmas with negative ions / T. Talipova, E. Pelinovsky // J. Plasma Physics. 2008. V. 74. P. 639-656.
7. El-Tantawy, S.A. Rogue waves in electronegative space plasmas: The link between the family of the KdV equations and the NLS equation // Astrophys Space Sci. 2016. V. 361. ID 164 (9 pages).
8. Schamel, H. A modified Korteweg-de Vries equation for ion acoustic waves due to resonant electrons // J. Plasma Phys. 1973. V. 9. P. 377–387.
9. Пелиновский Д.Е. Аналитические приближения уединенных волн в зернистых кристаллах / А.Р. Гиниятуллин, Ю.А. Панфилова, Е.Г. Шургалина, А.А. Родин // Вестник НГТУ. 2013. № 3 (100). С. 55-69.
10. Dumas, E. Justification of the log-KdV equation in granular chains: the case of precompression / D. Pelinovsky // SIAM J. Math. Anal. 2014. V. 46, P. 4075-4103.
11. Klein, C. Numerical study of blow-up and dispersive shocks in solutions to generalized Korteweg-de Vries equations / R. Peter // Physica D. 2015. V. 304-305. P. 52-78.
12. Martel, Y. Asymptotic stability of solitons of the gKdV equations with general nonlinearity / F. Merle // Mathematische Annalen. 2008, V. 341. P. 391-427.

Pelinovsky E.N.[1-4], Shurgalina E.G.[1-2], Talipova T.G.[1-2], Tobisch E.[5]

EQUATIONS OF KORTEWEG – DE VRIES EQUATION TYPE I N PRACTICAL APPLICATIONS

[1] Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, [2] Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [3] National Research University - Higher School of Economics, [4] Special Design Bureau for Automation of Marine Research, FEB RAS, [5] University of Kepler, Linz, Austria (Johannes Kepler University, Linz, Austria)

Equations of the Korteweg-de Vries (KdV) type play an important role in the physics of nonlinear waves and in modern mathematical physics. Applications of these equations in physics and engineering are less known, with the exception of the canonical Korteweg-de Vries equation. In the paper several applications of the family of KdV-equations and some general properties of their solutions are discussed.

Key-words: equations of the Korteweg-de Vries type, traveling waves, solitons.

УДК 532.59

А. А. Родин, А.Ю. Земляникин, А.А. Куркин

НАКАТ ВОЛН НА БЕРЕГА РАЗЛИЧНЫХ СЕЧЕНИЙ В РАМКАХ БЕЗДИСПЕРСИОННЫХ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ И УРАВНЕНИЙ БУССИНЕСКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено численное моделирование наката длинных волн на береговые профили различной геометрии: плоский откос и «безотражательный береговой профиль». Численные эксперименты проводились в программной среде CLAWPACK (www.clawpack.org) в рамках бездисперсионных нелинейных уравнений мелкой воды, а также в рамках уравнений Буссинеска. Показано, что не смотря на большее усиление волны при накате на «безотражательный» береговой профиль, по сравнению с плоским откосом, волна, обрушаясь уменьшается по амплитуде быстрее при таких условиях. В результате высота наката обрушенных волн становится больше на плоском откосе.

Ключевые слова: трансформация длинных волн, плоский откос, безотражательный профиль, CLAWPACK, высота наката, уравнения Буссинеска, уравнения мелкой воды.

Введение

Исследование процесса наката морских волн на берег является одной из важных и актуальных проблем океанологии. Численное моделирование является наиболее популярным и доступным способом сделать необходимые оценки зоны затопления прибрежной зоны. Самыми опасными и наносящими большой ущерб являются длинные волны, которые могут проникнуть далеко на побережье, например, волны цунами.

В теории по данной проблематике хорошо исследован накат на плоский откос, аналитические решения которого были получены еще в 1958 Кэррием и Гринспаном [1], которое предоставило возможность изучать накат на берег длинных необрушенных волн. В рамках численного моделирования, по сравнению с аналитическим, сделано не так много исследований по получению оценок наката длинных волн, в особенности на так называемый «безотражательный» донный профиль,глубина которого связана с расстоянием от края зависимостью h ~ x ^ 4/3 (где h - глубина бассейна, а x - расстояние от края). Данная работа посвящена численному исследованию динамики наката длинных волн в рамках дисперсионной и бездисперсионной модели для двухразличных донных профилей: плоского и безотражательного.

Математическая модель

В данной работе проведено численное моделирование в программном пакете CLAWPACK, где использовалось две математические модели: система бездисперсионных нелинейных уравнений мелкой воды, а также уравнения Буссинеска.

1. Нелинейная система уравнений мелкой воды, записанная в дивергентной форме:

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[Hu^2+\frac{1}{2}gH^2\right]=gh\frac{dh}{dx}\ , \qquad \frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}[Hu]=0\ , \tag{1}$$

где $H\ (x,\ t)=h(x)+\eta\ (x,\ t)$ – глубина воды, отсчитываемая от дна; $\eta\ (x,\ t)$ – возвышение водной поверхности над средним уровнем $z=0$; u – усредненная горизонтальная скорость водного потока; g – ускорение силы тяжести; h – невозмущенная глубина бассейна, предполагаемая здесь постоянной.

Система уравнений (1) решается численно с помощью программного пакета GeoClaw, которая использует метод конечных объемов [2].

Уравнение Буссинеска

В программном пакете BoussClaw используется новая численная модель, которая является продолжением и дополнением пакета GeoClaw, решающая уравнения Буссинеска, полученных Шеффером иМедсеном [3]. Математическая модель BoussClaw использует для численного решения системы уравнений гибридный метод: конечных объемов и конечных разностей. Ранее уже проводились исследования с помощью гибридной схемы, например, в [4], [5] и [6]. Система уравнений имеет вид:

$$H_t + (Hu)_x = 0 \tag{2}$$

$$(1-D)[(Hu)_t] + (Hu^2 + \frac{g}{2}H^2)_x - gHh_x - Bgh^2(h\eta_x)_{xx} = -f_D \tag{3}$$

где f_D – коэффициент трения. Оператор *D*определен с помощью фиктивной переменной w (x, t) следующим образом

$$D(w) = \left(B + \frac{1}{2}\right)h^2 w_{xx} - \frac{1}{6}h^3\left(\frac{w}{h}\right)_{xx}, \qquad \text{для } \forall\, w(x,t) \tag{4}$$

В приведенных выше уравнениях *H(x, t)* и *u(x,t)* обозначают полную глубину потока и усредненную скорость воды соответственно, *h(x)* – это глубина невозмущенной воды, $\eta(x,t)$ – возмущение водной поверхности, так что $H(x,t) = h(x) + \eta(x,t)$, g – ускорение свободного падения, *B*– параметр дисперсии.

Численные эксперименты

В работе выполнено численное моделирование, посвященное динамике распада и трансформации длинных волн, в основе которого лежали дисперсионная и бездиссперсионная математические модели. Проведенная серия экспериментов имела следующие начальные условия.

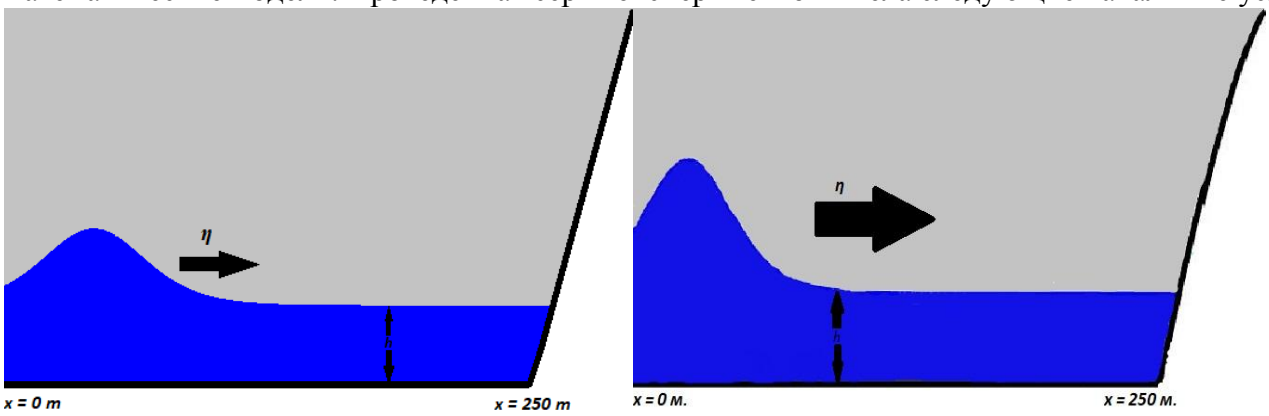


Рис.1 Геометрическая интерпретация лотка: слева – плоский откос; справа – «безотражательное» дно

Был смоделирован лоток длинной 300 м., в котором использовались 2 типа донного профиля – плоский откос и «безотражательное» дно, длинык оторых составляли - 50 м. (см. рис. 1). Типы донных профилей были заданы следующими уравнениями: $y(x) = kx + b$ – плоский откос; $y(x) = \alpha x^{\frac{4}{3}} + \gamma$ – "безотражательное" дно. Постоянная глубина в моделируемом бассейне *h*=2 м., при *x*< 250 м. Граничное условие на левой границе расчетнойобласти при*x=0*соответствовало свободному уходу. На правой границе расположен плоский откос или «безотражательное» дно. Пространственный шаг – 0.1 м., шаг по времени был задан в 0.5 секунды.

Начальное возмущение задавалось следующей формулой: $\eta = \frac{a_1}{\cosh(rx)^2}$, где a_1 – амплитуда; $rx = k(x - x_1), x_1$ – начальное положение волны,

$$k = \sqrt{\frac{3a_1}{(a_0 + a_1)2a_0}}\ ;\ a_0 - \text{длина волны}.$$

Во всех вычислениях длина волны $a_1 = 11$ м., начальное положение задаваемого исходного импульса находится в точке $x_0 = 20$ м., амплитуда a_0 варьируется от 1 м., до 6.5 м.

Было проведено 48 численных экспериментов по исследованию трансформации и наката длинных волн для моделей, использующих уравнение мелкой воды и уравнение Буссинеска.На рис. 2 и рис. 3 проиллюстрированы детальная трансформация длинной волны в разные моменты времени, а именно начальный момент, момент движения к «безотражательному» профилю для дисперсионной модели (рис. 2 – слева) и без дисперсионной (рис.2 – справа), а также момент заплеска на него.

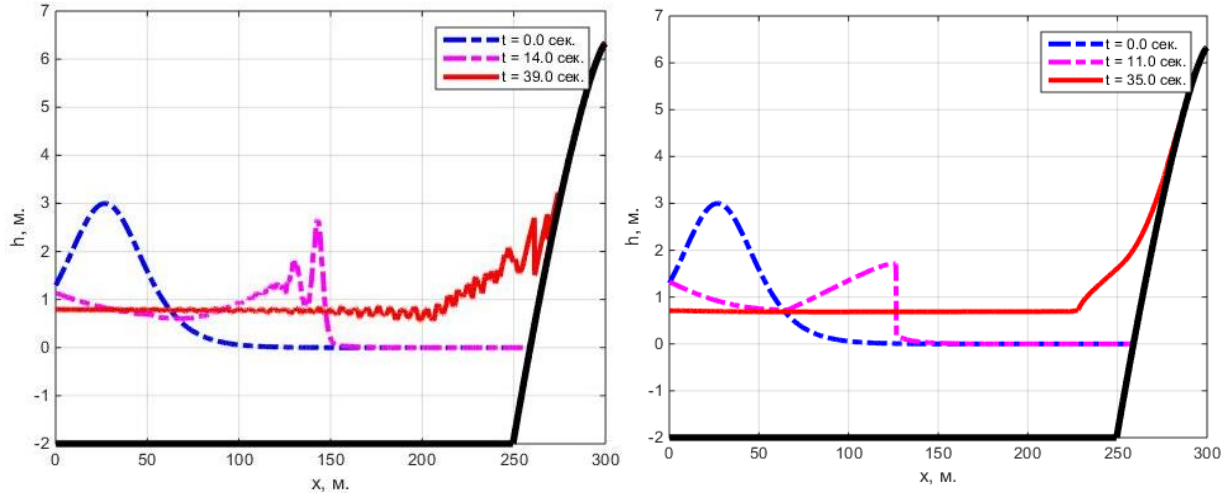


Рис. 2. Трансформация распада волны для диссперсионой(слева) и бездисперсионной(справа),при $a_0 = 3$ м

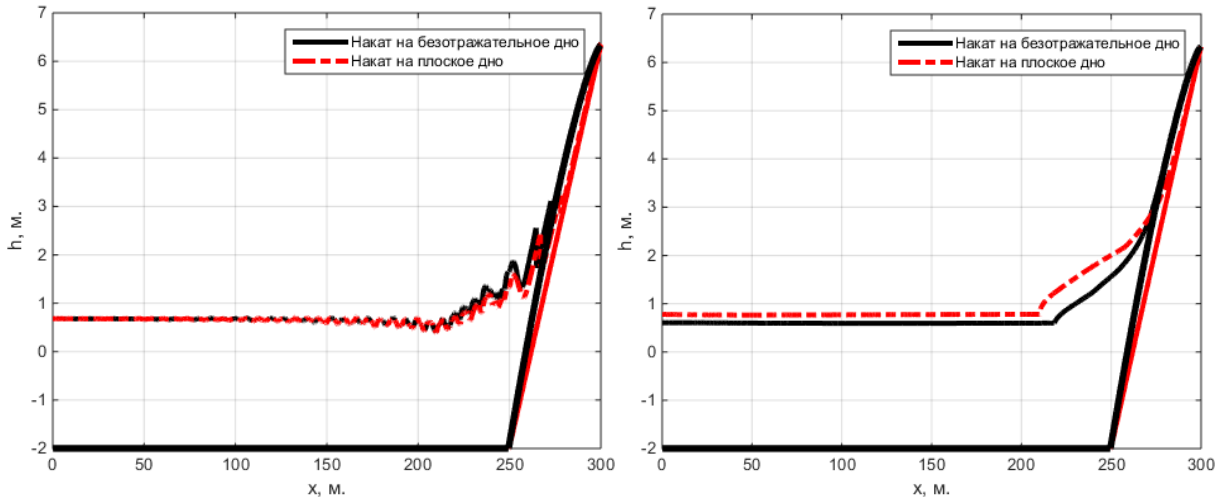


Рис. 3. Трансформация распада волны на разных донных профилях,при $a_0 = 3$м

Высота распавшейся волны, идущей к берегу, в 2 раза меньше начальной амплитуды. Распавшись, волна, бегущая в противоположную от берега сторону, уходит из расчетной области. Видно, что в дисперсионной модели волна, накатываясь на берег, образует ударный фронт, в отличие от дисперсионной модели, в которой формируется дисперсионный «хвост». При увеличении начальной амплитуды падающая волна обрушается быстрее, подходя к берегу сильно обрушенной, уменьшив, благодаря численной диссипации, свою амплитуду. Более наглядное и детальное сравнение можно увидеть на рис. 3 и рис.4.

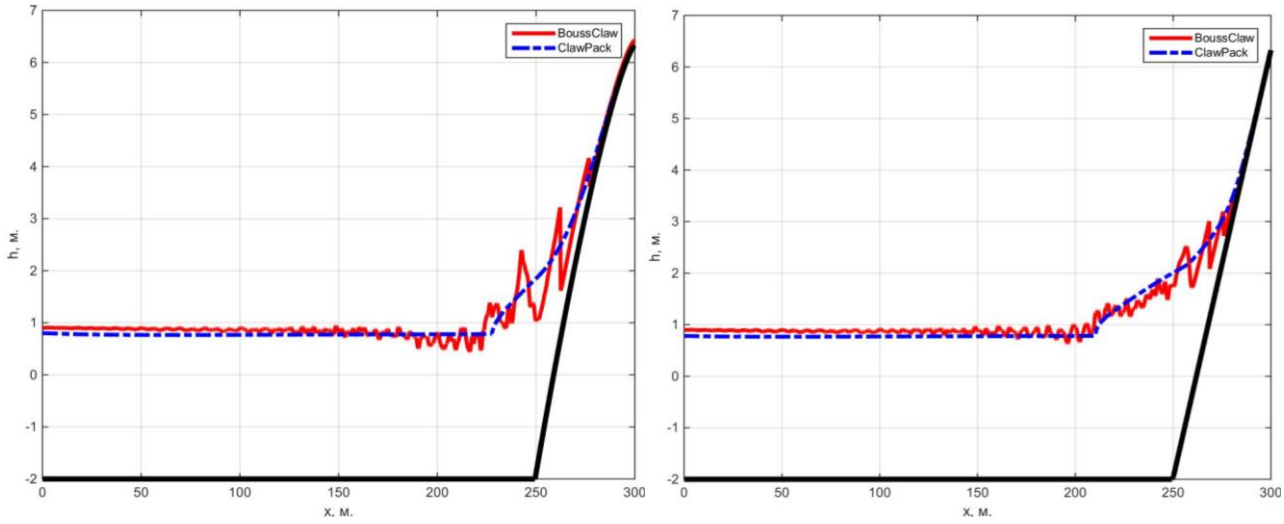


Рис. 4. Трансформация распада волны на для диссперсионной модели – слева, для бездисперсионной модели - справа

В проведенной серии численных экспериментов была сделана фиксация максимальных высот накатов на донные профили. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Начальная амплитуда	1 м.	1.5 м.	2 м.	2.5 м.	3 м.	3.5 м.	4 м.	4.5 м.	5 м.	5.5 м.	6 м.	6.5 м.
Донный профиль	**Плоский откос**											
Максимум наката в модели с дисперсией, м	2.72	4.24	5.92	6.17	6.39	6.79	6.80	7.04	7.15	7.25	7.69	7.74
Максимум наката в модели без дисперсии, м	2.72	3.07	4.12	4.94	5.64	6.34	6.80	6.99	7.05	7.12	7.50	7.50
Донный профиль	**«Безотражательное» дно**											
Максимум наката в модели с дисперсией, м	1.66	4.08	5.12	5.71	6.11	6.24	6.65	6.95	7.03	7.1	7.28	7.30
Максимум наката в модели без дисперсии, м	1.64	3.10	4.47	4.97	5.11	5.62	6.11	6.29	6.49	6.85	7.05	7.1

С увеличением амплитуды, идет быстрое монотонное увеличение наката на плоский откос, в сравнении с «безотражательным» донным профилем, где накат увеличивается также, но скорость увеличения ниже.

Заключение

В данной статье численно изучена динамика наката волн на береговые профили различных сечений: плоский откос и безотражательный профиль. Исследование проводилось в рамках нелинейной теории мелкой воды, а также в рамках уравнений Буссинескас использованием программного комплекса CLAWPACK, решающего обе системы уравнений. Одним из основных практических результатов является выявлениеопределяющей роли нелинейных эффектов и обрушения при исследовании распространения волн над безотражательным береговым профилем по сравнению с плоским откосом. Было проведено 48 численных эксперимента в программном пакетеCLAWPACK (GEOCLAW и BOUSSCLAW). Получены оценки высот наката волн для разных типов донных профилей для двух моделей: бездисперсионной и дисперсионной. Проанализирована динамика и трансформация длинных волн.Показано, что, не смотря на большее усиление волны при накате на «безотражательный» береговой профиль, по сравнению с плоским откосом, волна, обрушаясь уменьшается по амплитуде быстрее при таких условиях. В результате высота наката обрушенных волн становится больше на плоском откосе.

Представленные результаты научно-исследовательской работы получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1127.2017.5).

Библиографический список

1. Carrier, G.F., Greenspan, H.P. Water waves of finite amplitude on a sloping beach // J. Fluid Mech. 1958. V. 4. P. 97–109.
2. Родин, А.А. Численные расчеты наката обрушенных одиночных волн на плоский откос / А.А. Родин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. –2013. – № 1(98). – С. 36-43
3. H.A. Schäffer, P.A. Madsen, Further enhancements of Boussinesq-type equations, Coast. Eng. 26 (1) (1995) 1–14.
4. M. Tissier, P. Bonneton, F. Marche, F. Chazel, D. Lannes, Serre Green-Naghdimodelling of wave transformation breaking and run-up using a high-order finite volume finite-difference scheme, Coast. Eng. Proc. 1 (32) (2011) 13.
5. D. Dutykh, T. Katsaounis, D. Mitsotakis, Finite volume schemes for dispersive wave propagation and runup, J. Comput. Phys. 230 (2011) 3035–3061.
6. D. Dutykh, T. Katsaounis, D. Mitsotakis, Finite volume methods for unidirectional dispersive wave models, Int. J. Numer. Methods Fluids 71 (6) (2013) 717–736.

Rodin A.A., Zemlyanikin A.Y., Kurkin A.A.

RUN-UP OF WAVES ON THE SHORE OF VARIOUS CROSS SECTIONS WITHIN THE FRAMES OF THE DISPERSIONLESS EQUATIONS OF SHALLOW WATER AND THE BOUSSINESQ EQUATIONS

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

Numerical modeling of the run-up of long waves on the shore profiles of various geometries is carried out: a flat slope and a "non-reflecting" coastal profile. Numerical experiments were carried out in the CLAWPACK (www.clawpack.org) software environment within the dispersionless nonlinear shallow water equations, as well as within the Boussinesq equations. It is shown that, despite the greater amplification of the wave during run-up on the "non-reflecting" shore profile, in comparison with the flat slope, the wave collapsing decreases in amplitude more rapidly under such conditions. As a result, the height of the run-up of the collapsed waves becomes larger on a flat slope.

Key words: transformation of long waves, flat slope, non-reflecting bottom profile, CLAWPACK, slope height, Boussinesq equation, shallow water equations.

УДК 532.59

Родин А.А., Лиходеев Н.М., Кузин В.Д., Куркина О.Е., Куркин А.А.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено лабораторное моделирование динамики внутренних волн над ровным дном. В работе представлено описание лабораторных экспериментов по генерации, распространению и взаимодействию внутренних волн в трехслойной жидкости. Представлены результаты интрузии волны в лабораторных условиях. Представлен способ регистрации волновых характеристик с помощью обработки видеозаписи эксперимента.

Ключевые слова: многослойная жидкость, интрузия, лабораторный эксперимент, уединенная волна, многослойная жидкость.

Введение

Одним из эффективных источников генерации течений в океане являются внутренние волны. Даже при спокойной поверхности в толще океанских вод происходит волнение. Их скорость существенно ниже поверхностных волн, однако они способны переносить огромные массы воды на большие расстояния. Такие волны возникают на границах разделения сред в результате взаимодействия слоев с разной температурой, плотностью и соленостью. Изучение динамики таких волн остается актуальным на протяжении многих лет. Актуальность исследований обусловлена влиянием внутренних волн на движение подводных лодок, распространение акустических сигналов, размывы грунта, участием в распространении примесей и загрязнений. Несмотря на то, что внутренние волны относительно хорошо поддаются лабораторному моделированию, их трансформация на достаточно длинных расстояниях в лабораторных исследованиях является мало описанной. В данной работе приведены первичные результаты, полученные в ходе лабораторных экспериментов в специально оборудованном гидродинамическом бассейне на базе лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф.

Лабораторные эксперименты

Лабораторные эксперименты проводились в гидродинамическом бассейне в научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф в НГТУ им. Р.Е. Алексеева (рис. 1). Бассейн, в котором проводились опыты, имеет следующие размеры: длина - 6.5 метра; ширина - 0.5 метра; высота - 1 метр.

Лабораторный бассейн оснащен двумя типами волнопродукторов для реализации различных начальных условий: вертикальной перегородкой, которая позволяет герметично разделять разные уровни водяного столба, и волнопродуктором весельного типа, приводимым в движение с помощью шагового двигателя и генерирующим волны различных амплитуд.

Для моделирования задачи интрузии и распространения внутренних волн использовалась герметичная вертикальная заслонка, которая при старте эксперимента со скоростью 1 м/с поднимается вверх. Целью проведенных экспериментов являлось изучение генерации и распространения внутренних волн в стратифицируемых жидкостях.

В ходе экспериментов бассейн разделялся на две емкости с помощью герметичной вертикальной перегородки (Рис. 1). Длина L_1 при этом во всех экспериментах составляла 1.5 м, а L_2, соответственно 5 м. Наполнение бассейна жидкостью осуществляется с помощью специальных клапанов, расположенных на дне бассейна, позволяющих жидкости распространяться вдоль дна без завихрений и перемешивания слоев различной плотности. Стратификация жидкости достигалась за счет различной солености наливаемых слоев. Сначала заливалась жидкость наименьшей плотности до необходимого уровня, затем начиналось наполнение более плотных слоев. Схематическое изображение начальных условий экспериментов представлено на рис. 1.

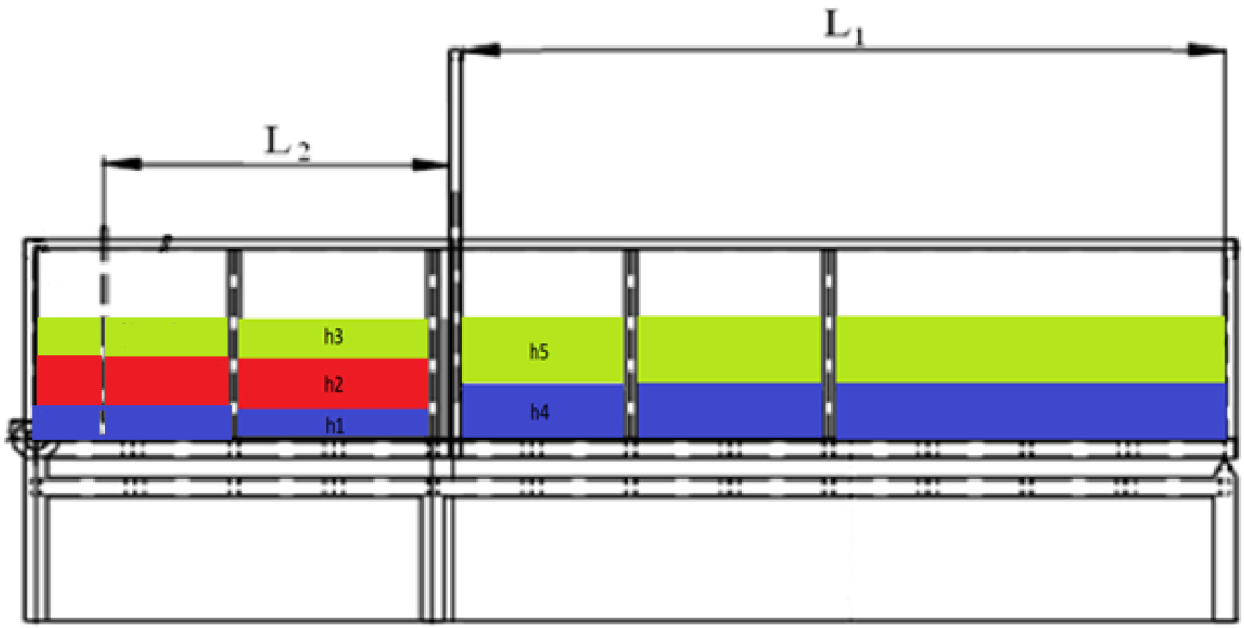


Рис. 1. Схематическое изображение условий экспериментов в гидродинамическом бассейне

Здесь h_1, h_2, h_3 - уровни слоев жидкости в левой емкости бассейна; h_4, h_5 – уровни слоев жидкости в правой части бассейна; L_1 и L_2 , соответственно, - длина левой и правой полуёмкости бассейна.

Эксперименты проводились по двум сценариям:

1) В левую емкость заливались три слоя жидкости разной плотности. После этого запускалась работа весельного волнопродуктора и отслеживалось возмущение границы внутренних слоев и внешней водной поверхности (рис. 2).
2) В левую емкость заливалась трехслойная жидкость разной плотности, в правую – двухслойная жидкость. Суммарные уровни водяного столба в правой и левой емкости были одинаковы. После этого поднималась вертикальная перегородка и происходила интрузия среднего слоя левой емкости бассейна в правую емкость (Рис. 3-4).

На рис. 2 показан видеокадр, записанный камерой при проведении эксперимента по первому сценарию. В левую емкость бассейна была залита трехслойная жидкость, после чего был запущен волнопродуктор, совершавший периодические колебания с частотой 1 Гц. Характеристики слоев представленны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики слоев стратифицированной жидкости.

Слой	Толщина	Соленость	Плотность	Температура
Верхний слой (h_3)	0.05м	0.0 psu	1000 кг/м³	25.0 C°
Промежуточный слой (h_2)	0.12м	36.0 psu	1012.4 кг/м³	25.0 C°
Нижний слой (h_1)	0.18м	20.0 psu	1024.3 кг/м³	25.0 C°

В процессе эксперимента наблюдалась достаточно сильная стратификация жидкости.

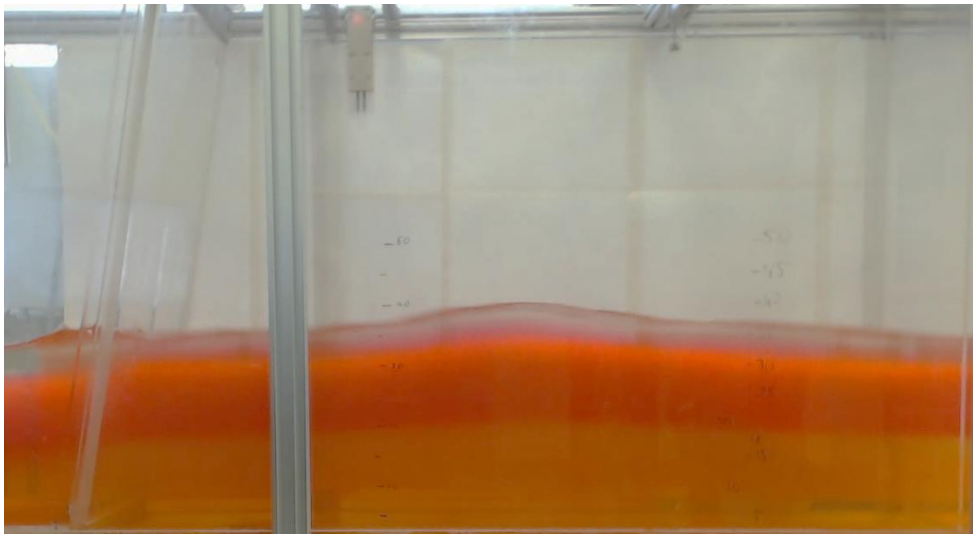


Рис. 2. Колебания водной поверхности и внутренних граничных слоев в эксперименте с трехслойной жидкостью

В следующем эксперименте проводилось изучение интрузии промежуточного слоя левой емкости бассейна в правую емкость с двухслойной жидкостью.

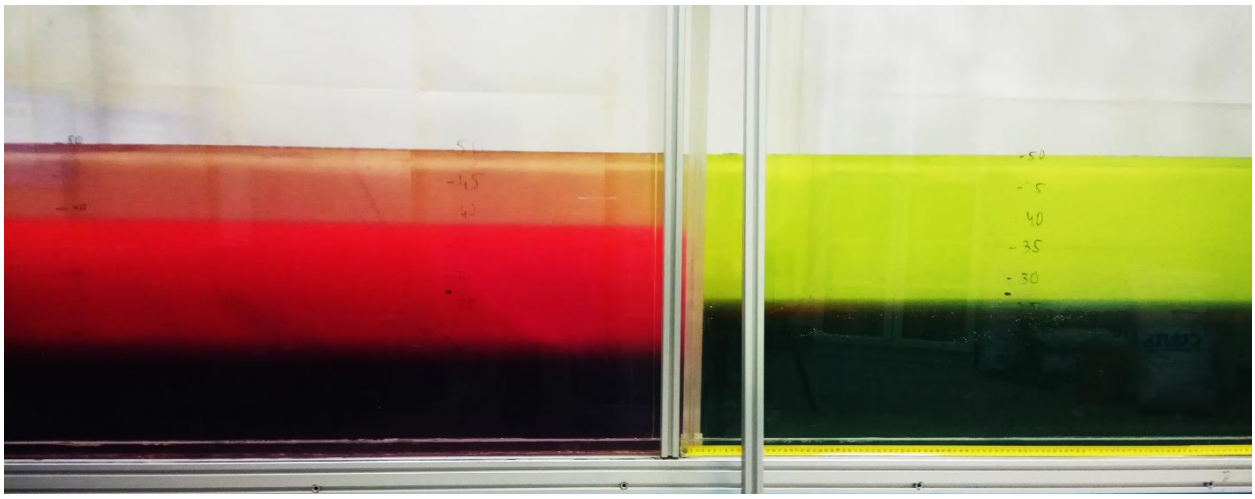


Рис. 3. Эксперимент по изучению интрузии в начальный момент времени

Характеристики слоев слева и справа от герметичной стенки представлены в табл. 2 и табл 3.

Таблица 2

Характеристики слоев стратифицированной жидкостислева от герметичной стенки

Слой	Толщина	Соленость	Плотность	Температура
Верхний слой (h_3)	0.125м	0.0 psu	1000 кг/м³	13.4 С°
Промежуточный слой (h_2)	0.225м	17.0 psu	1012.4 кг/м³	13.5 С°
Нижний слой (h_1)	0.15м	35.0 psu	1026.3 кг/м³	13.5 С°

Таблица 3

Характеристики слоев стратифицированной жидкости справа от герметичной стенки

Слой	Толщина	Соленость	Плотность	Температура
Верхний слой (h_5)	0.26м	0.0 psu	1000 кг/м³	13.9 C°
Нижний слой (h_4)	0.24м	35.0 psu	1026.2 кг/м³	14.0 C°

С целью исключения ошибок в измерении плотности, образцы жидкостей были отправлены в химическую лабораторию, в которой была проведена экспертиза и определена плотность каждого из слоев жидкости. Для каждого образца были проведены три независимые экспертизы с учетом замеренной температуры.

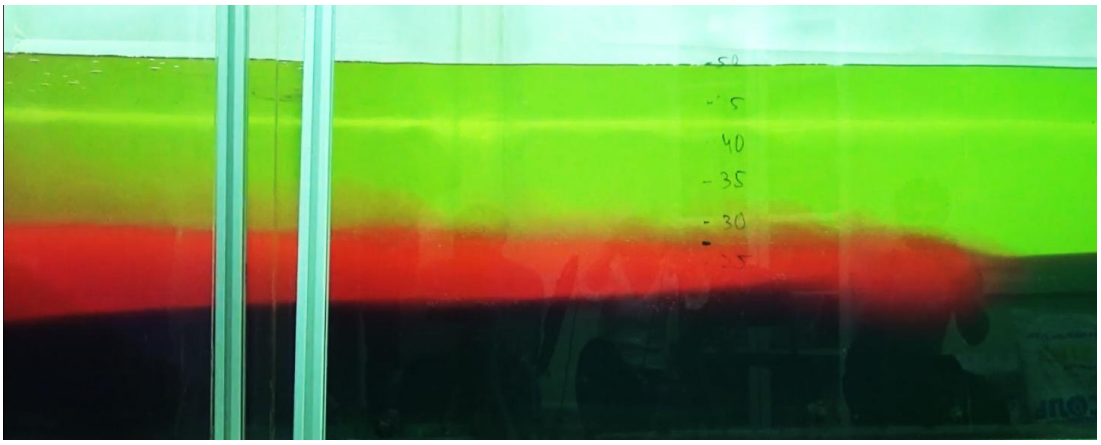


Рис. 4. Интрузия внутреннего слоя в трехслойной стратифицированной жидкости

Внутренние волны, в зависимости от плотности и температуры, могут принимать разные формы, соответствующие первой и второй моде. В рамках первой моды они могут быть положительной или отрицательной полярности. В рамках второй моды внутренние волны могут быть выпуклыми или вогнутыми.

В процессе проведения эксперимента (при описанных выше условиях) формировалась уединенная внутренняя волна, которая соответствовала второй моде, имея выпуклую форму. Дойдя до края лабораторной установки, волна отразилась от стенки и представляла собой волновой пакет (рис. 5).

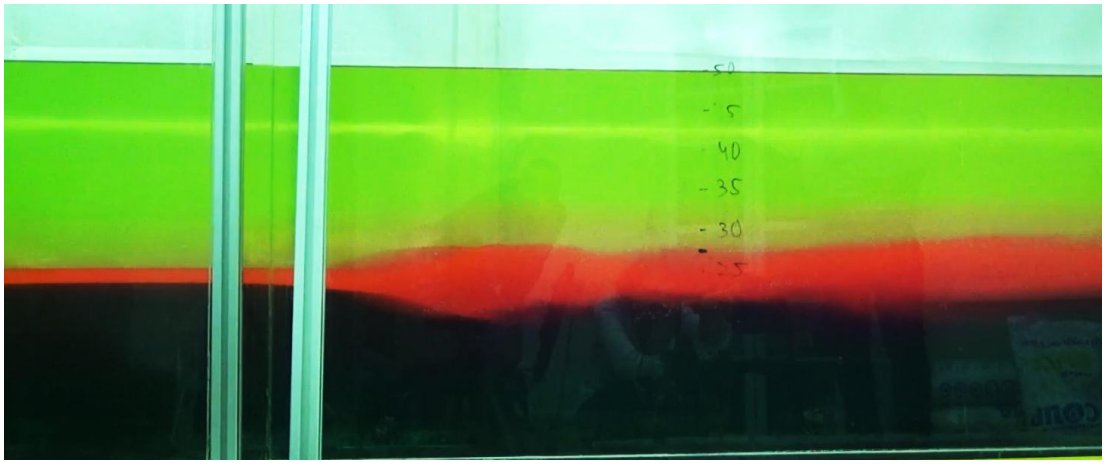


Рис. 5. Переотраженная от стенки бассейна уединенная волна второй моды во внутреннем слое трехслойной стратифицированной жидкости

Определение волновых характеристик

Определение основных характеристик генерируемых внутренних волн, таких как частота, амплитуда, скорость и т.п., может быть выполнено с помощью обработки видео, полученного в ходе эксперимента. При проведении описанных выше опытов использовалась система из четырех видеокамер, регистрирующих распространение волн по всей длине гидродинамического бассейна. В ходе распознавания колебаний интересующего нас слоя используются следующие операции покадровой обработки видео: сегментация изображения, бинаризация изображения и определение границ и контуров интересующей области.

При выполнении операции сегментации изображения происходит разделение на области исходного изображения. Для выделяемых областей должен выполняться критерий однородности, например, примерно одинаковая яркость и/или цвет. В данном случае сегментация выполнена с помощью порогового разделения, при которой производится сопоставление значения яркости каждого пикселя изображения с заданным значением порога (т.н. бинаризация изображения).

Результат операция порогового разделения - бинарное изображение с радикально уменьшенным количеством информации, содержащейся на изображении. Таким образом, исходное цветное изображение с несколькими уровнями яркости преобразуется в черно-белое изображение, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1

В данном случае при обработке видео эксперимента используется работа с полноцветным кадром в нотации BGR (Blue — Green — Red). Изменяя значения верхнего и нижнего порога с помощью слайдеров для каждого цвета со значением от 0 до 255, можно бинаризовать изображение конкретно под определенный цвет или оттенок цвета в некотором диапазоне. Задав верхний и нижний порог под необходимый цвет на выходе функции inRange библиотеки OpenCv, получаем бинарную матрицу, где значащие пиксели имеют значение 1, остальные незначащие пиксели являются 0.

Дальнейшая работа связана с контурным анализом. При помощи детектора границ Canny обрабатывается бинаризованная матрица. Как только границы обозначены, можно перейти к поиску контуров — в зависимости от того, как хорошо удалось выполнить бинаризацию по цвету, можно получить различного качества набор контуров. Можно получить отличного качества замкнутый контур вокруг искомого объекта или получить насыщенную ложными вхождениями картину, артефакты в виде точек и т. д. Плавность линий и четкость границ обуславливается дополнительным использованием размытия изображения, повышения градиента.

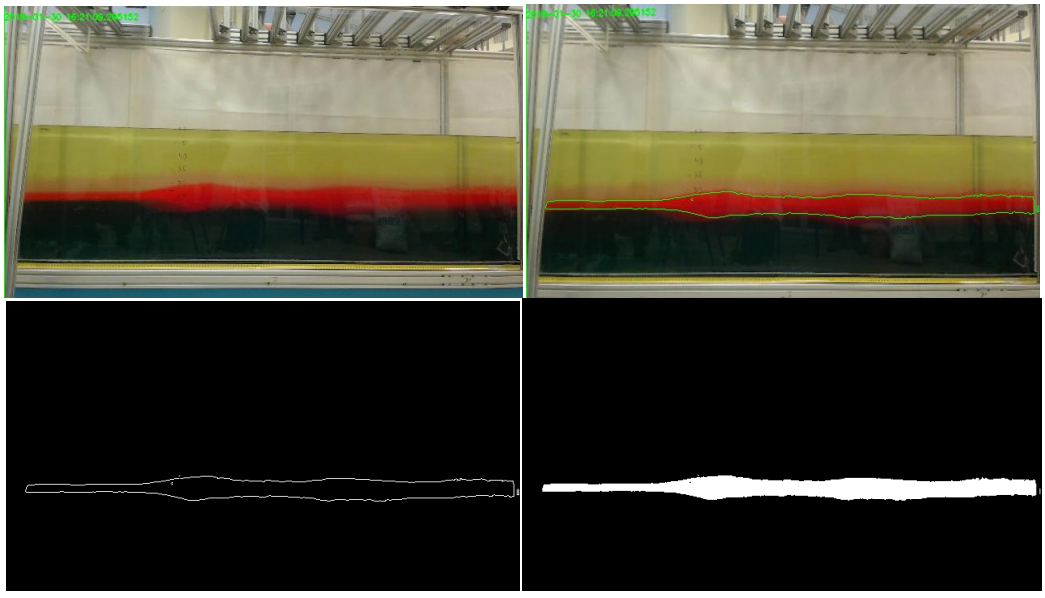


Рис. 6. Пример распознавания промежуточного слоя при интрузии в стратифицироавнной жидкости

Результаты

Проведены лабораторные эксперименты по генерации внутренних волн в стратифицированной жидкости в гидродинамическом бассейне научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф в НГТУ им. Р.Е. Алексеева**.** Стратификация жидкости достигалась за счет различной солености слоев. Наблюдалась слабая диффузия и тонкие границы перехода между слоями. Подобрана система видеокамер, позволяющая регистрировать волновые возмущения вдоль всего гидродинамического бассейна со склейкой видеокадров и синхронизацией по времени. Написан скрипт, позволяющий распознавать волны в подкрашенной жидкости внутри бассейна, с помощью которого стало возможным выделение таких волновых характеристик как амплитуда волны, частота, скорость распространения, крутизна, обрушение и т.д.

Представленные результаты научно-исследовательской работы получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1127.2017.5).

Библиографический список

1. Гаврилов Н. В., Ляпидевский В. Ю., Ляпидевская З. А. «Трансформация внутренних волн большой амплитуды над шельфом» / Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2015, Т. 8, № 3, 32-43.
2. Гаврилов Н. В., Ляпидевский В. Ю. «Уединенные волны конечной амплитуды в двухслойной жидкости» / Прикладная механика и техническая физика. 2010, Т. 51, N◦- 4, 26-38.
3. Kurkina O. E., Kurkin A. A., Rouvinskaya E. A., and Soomere T. «Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid» / Nonlin. Processes Geophys., 2015, 22, 117–132.
4. M. J. Mercier, R. Vasseur1, and T. Dauxois Resurrecting dead-water phenomenon» / Nonlin. Processes Geophys., 2011, 18, 193–208.

A.A. Rodin, N.M. Likhodeev, V.D. Kuzin, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin

LABORATORY MODELING OF INTERNAL WAVES IN MULTILAYER LIQUID

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

A laboratory simulation of the dynamics of internal waves over a flat bottom has been carried out. The paper describes the laboratory experiments on the generation, propagation and interaction of internal waves in a three-layer liquid. The results of wave intrusion in laboratory conditions are presented. A method for registering wave characteristics by processing a video recording of an experiment is presented.

Key words: multilayer liquid, intrusion, laboratory experiment, solitary wave, multilayer liquid.

УДК. 53.072

С.П. Никитенкова[1)], Л.В. Сильвестрова[2)], Д.А. Ковригин[2)]

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ИЗ ПРЯМОЙ В ПРЯМУЮ ПО ДАННЫМ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЯТИЯ ИЛИ ОПРОВЕРЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ ФИШЕРА-СТЬЮДЕНТА

[1)]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
[2)]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В качестве объекта исследования выбрано семейство кусочно-линейных отображений из прямой на прямую. Параметры этой модели восстанавливаются, исходя из данных предоставляемыми временными рядами изучаемого процесса. Для исследования привлекается метод наименьших квадратов, идентификация характерных фрагментов кусочно-линейного отображения осуществляется на основе принятия или опровержения стандартных статистических гипотез Фишера–Стьюдента. Окончательный результат выдается после проведения процедуры осреднения полученных параметров модели по ансамблю ее временных реализаций.

Ключевые слова: кусочно-линейное отображение, параметрическая идентификация, критерий Фишера

Введение

Математически, изучается модель хаотических автоколебаний, характеризуемая неустойчивым по Ляпунову устойчивым по Пуассону кусочно-линейным дискретным отображением из прямой на прямую. Физически, эта модель представляет собой прототип сложных колебательных процессов, наблюдаемых как в природе, так и технике. Яркими представителями таких природных объектов со сложной и запутанной динамикой являются гейзеры и геотермальные источники [1–3]. Движение жидкостей в энергетических и топливных магистралях в условиях нештатных режимов работы также зачастую подвергается хаотизации, из-за вспенивания, локальных фазовых превращений, кавитации, образования твердотельной крошки вследствие коррозии и многих других причин. Несмотря на множественность факторов, почти не подающихся контролю, такие динамические системы обладают единым общим свойством, а именно; тенденцией к нарастанию физических переменных, каковыми являются давление, температура, концентрация фаз и прочее, и к сдерживанию роста этих переменных, что, собственно, и приводит к хаотическим автоколебаниям. Изменение параметров динамической системы, управляемое или происходящее по естественным причинам, к примеру, от износа, может привести к бифуркации таких автоколебаний. В рамках единой модели могут наблюдаться стационарные режимы, типа полного вспенивания; периодические колебания, типа паровых снарядов; хаотические биения, типа развитого процесса кипения и газообразования. Знание связи между параметрами модели и параметрами технической системы открывают путь к ее эффективному управлению в прагматическом аспекте. Поскольку описание таких процессов на языке полных уравнений гидродинамики и газовой динамики встречается с практически непреодолимыми трудностями даже для численного счета, то представляется актуальной задача построения упрощенной модели, которая описывает адекватно реальный процесс, пусть даже с потерей его некоторых несущественных деталей.

Объект исследования

В качестве такой модели выбрано семейство кусочно-линейных отображений из прямой T_n на прямую T_{n+1}; к примеру, без особого ограничения общности, можно исследовать следующее отображение

$$T_{n+1} = \begin{cases} a_1 T_n + b_1, 0 \leqslant T_n \leqslant T; \\ a_2 T_n + b_2, T \leqslant T_n \leqslant 1, \end{cases} \quad (1)$$

с единственным «разрывом» в точке T. Здесь $a_{1,2}$ и $b_{1,2}$ – неизвестные параметры модели, подлежащие определению. Другими словами, параметры этой модели следует идентифицировать, исходя из данных предоставляемыми временными рядами изучаемого процесса. Конкретные реализации такого процесса представлены на рис. 1.

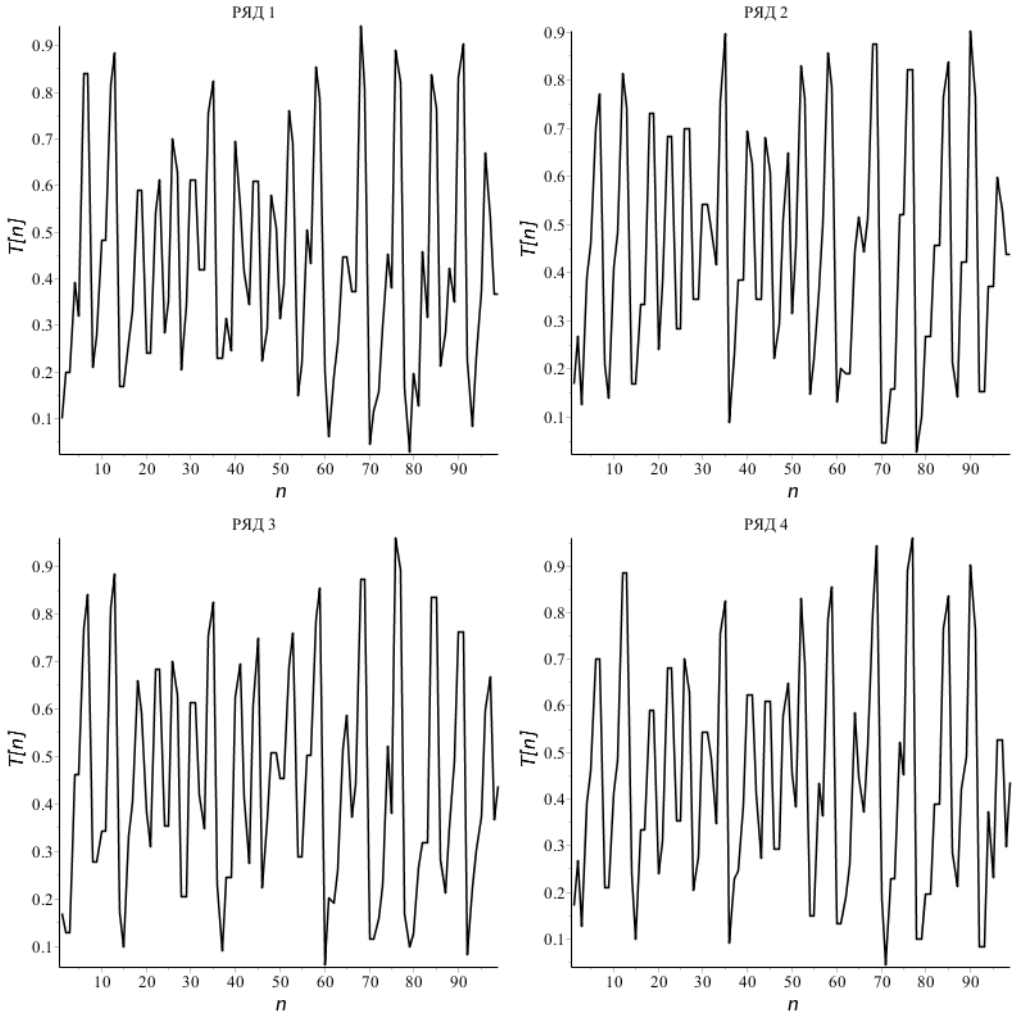


Рис. 1. Характерные осциллограммы биений безразмерной, нормированной на единицу, высоты пароводяного конденсата T_n в капиллярной трубке, соединенной с резервуаром кипящей воды в дискретные моменты времени n

Для исследования закономерностей, которые могут наблюдаться в реализациях таких временных рядов, привлекается метод наименьших квадратов, а именно; на основе принятия или опровержения стандартных статистических гипотез осуществляется идентификация характерных фрагментов кусочно-линейного отображения, которое могло бы породить

данные такого сорта. Окончательный результат выдается после проведения процедуры осреднения полученных параметров модели по всему ансамблю множества ее временных реализаций.

Методика расчета

Типичные этапы математических расчетов таковы. Вначале, данные временного ряда упорядочиваются парами (T_n, T_{n+1}), в попытке проследить корреляционную зависимость первого порядка, так, как это показано на рис. 2(а). По выявлении тесной корреляционной зависимости целесообразен регрессионный анализ данных, в предположении, что оператор точечного отображения является кусочно-линейным. Результат проведения парного анализа представлен на рис. 2(б).

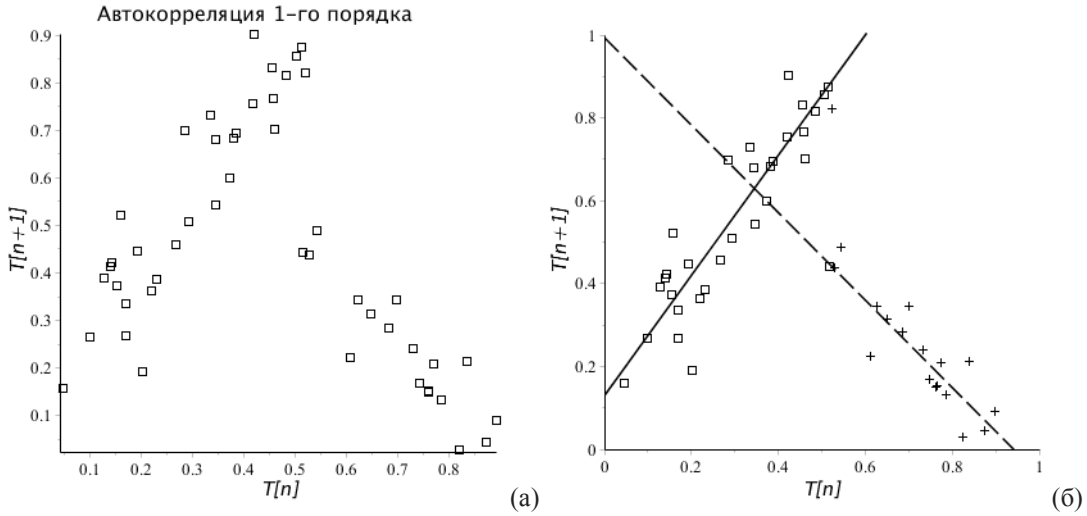


Рис. 2. Выявление автокорреляционной зависимости первого порядка для переменной T_n, представленной временным рядом (а). Дефрагментация автокорреляционных данных с помощью метода парного линейного анализа (б)

Распознавание фрагментов прямолинейных участков точечного отображения, представленного на рис. 2(б), осуществляется с применением методики принятия или опровержения гипотез Стьюдента–Фишера. Значение статистики Фишера, рассчитанное по стандартной формуле в случае, если регрессия оценивается, начиная с четырех наблюдений, и, вплоть до всего доступного объема данных в заданной временной реализации показано на рис. 4а. По результатам оценки регрессии получен коэффициент детерминации, график которого в зависимости от числа наблюдений показан на рис. 4б.

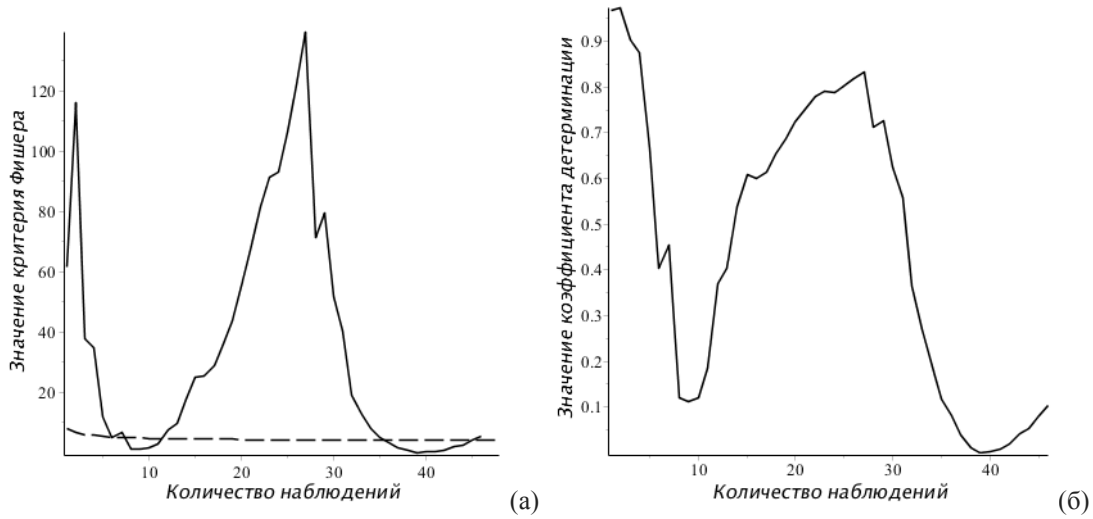


Рис. 4. Значение статистики Фишера (а), штриховая линия обозначает критическое значение статистики при 5% уровне значимости; коэффициент детерминации(б)

Синтез оператора точечного отображения приводит к следующей оценке неизвестных параметры модели$a_{1,2}$ и$b_{1,2}$: $a_1 = 1.809$; $b_1 = 0.026$; $a_2 = -0.850$; $b_2 = 0.891$.

Далее, аналогичным образом повторяется обработка всех имеющихся в распоряжении временных реализаций процесса. После осреднения результатов решения всех таких отдельных частных задач по всему ансамблю временных реализаций окончательный вид оператора точечного отображения принимает следующий вид

$$T_{n+1} = \begin{cases} 1.975T_n, 0 \leqslant T_n \leqslant 0.5; \\ -0.913T_n + 0.913, 0.5 \leqslant T_n \leqslant 1. \end{cases} \quad (2)$$

Выводы

Численные эксперименты, проведенные по описанной методике, дают превосходные результаты решения задачи идентификации параметров модели, несмотря на то, что заранее известные тестовые исходные временные ряды намеренно, в целях проверки качества моделирования, возмущались искусственным «гауссовым шумом» с разбросом ошибки, доходящей до десяти процентов от уровня полезного сигнала.

Библиографический список

1. Ланда, П.С., Гейзер как автоколебательная система / П.С. Ланда, Д.А. Власов // Доклады академии наук. А – 2007. – т. 416. – № 6. – с. 742.
2. Lasic,S. Geyser model with real-time data collection, *European Jour. of Physics*, vol. 27(4), pp. 995–1005, 2006.
3. Water Temperature Data for Constant Geyser, Yellowstone National Park URL: https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/yellowstone_monitoring_35.html

S.P. Nikitenkova[1)], L.V. Silvestrova[2)], D.A. Kovriguine[3)]

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A PIECEWISE LINEAR LINE-TO-LINE MAPPING FROM TIME SERIES BY ACCEPTING-REJECTING STATISTICAL FISHER-STUDENT HYPOTHESES

[1)]N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
[2)]Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alexeyev

As the object of investigation, we choose a family of piecewise linear mappings from a line to a line. The parameters of this model are restored, based on the data provided by the time series of the process under investigation. For the study, the least squares method is involved, identification of characteristic fragments of a piecewise linear mapping is performed by the acceptance or rejecting standard statistical Student–Fisher hypotheses. The final result is yielded by the averaging the obtained parameters over all the ensemble of temporal realizations.

Keywords: piecewise linear mapping, parametric identification, Fisher criterion.

УДК 532.59:51-73:004.942

Л.В. Талалушкина, О. Е. Куркина, А. А. Куркин, П. В. Лобовиков

КОНКУРЕНЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ И НЕОДНОРОДНОСТИ В РАМКАХ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ КДВ-ИЕРАРХИИ ДЛЯ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ С НЕРОВНЫМ ДНОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается задача о распространении локализованного возмущения на границе раздела в двухслойной жидкости над неровным дном, в рамках слабонелинейной модели уравнения Гарднера для неоднородной среды. Толщина верхнего слоя жидкости при этом считается постоянной. Возможны такие сочетания параметров среды, что при увеличении общей глубины бассейна параметр усиления уменьшается, но растет по модулю коэффициент квадратичной нелинейности, и мы можем наблюдать усиление волны в неоднородной среде при распространении в более глубоководную зону.

Ключевые слова: внутренние волны, слабонелинейная теория, двухслойная жидкость, уравнение Гарднера, неоднородная среда, неровное дно.

Внутренние гравитационные волны – вид волновых движений в слоистой (стратифицированной) жидкости (газе),плотность которой растёт с глубиной z . Внутренние волны распространены повсеместно как в океане, так и атмосфере земли. Задача изучения внутренних гравитационных волновых движений является достаточно актуальной в механике жидкости, интерес к которой на протяжении уже нескольких десятилетий остается на высоком уровне. Внутренние волны играют важную роль в динамике водных масс и экосистем: оказывают сильное влияние на перемешивание водных слоев, суспендирование и перемещение осадочных материалов, существенно определяют распределение питательных веществ и биологическую продуктивность.

Особенный интерес представляют локализованные возмущения, описываемые в слабонелинейном пределе фундаментальными неизлучающими решениями упрощенных моделей (эволюционных уравнений). Нелинейная теория внутренних волн развивалась по двум направлениям. В первом из них рассматривают установившиеся волны в рамках нелинейной краевой задачи, основанной на уравнении Дюбрей-Жакотин – Лонга [18]. Данный подход позволяет исследовать внутренние уединенные и периодические волны любой амплитуды. В рамках второго направления исследуются неустановившиеся волны малой, но конечной амплитуды с помощью уравнений типа Кортевега–де Вриза (КдВ), выведенного для внутренних волн, как в непрерывно стратифицированной, так и в слоистой жидкости. В работе [5] был сделан подробный вывод уравнения КдВ для внутренних волн, уравнение КдВ с переменными коэффициентами для внутренних волн в неоднородной среде представлено в работах [1,4,19]. Его обобщение с учетом кубической нелинейности (уравнение Гарднера) стало уже общепринятой моделью для описания внутренних волн как для модельных (например, двухслойной) стратификаций [13, 14, 16, 3], так и для реальных условий в океане [10, 11, 5-9, 15].

Основные уравнения

В настоящей работе ставится задача исследования динамики изменения амплитуды волнового поля при распространении локализованного возмущения на границе раздела в двухслойной жидкости над неровным дном в виде углубления, в рамках слабонелинейной модели уравнения Гарднера для неоднородной среды.

Динамика длинных нелинейных внутренних волн умеренной амплитуды в двухслойном океане переменной глубины описывается обобщенным уравнением Гарднера [10,11,29]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c(x)\frac{\partial \eta}{\partial x} + (\alpha(x)\eta + \alpha_1(x)\eta^2)\frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta(x)\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\eta}{2Mc^2}\frac{d(c^3 M)}{dx} = 0, \quad (1)$$

где η–смещение границы раздела, x– горизонтальная координата, $\alpha(x)$– коэффициент квадратичной нелинейности, $\beta(x)$ – коэффициент дисперсии в неоднородной среде,
Для двухслойной жидкости коэффициенты уравнения (1) имеют вид [12, 3]:

$$c(x) = \sqrt{\frac{H_1(x)H_2}{H_1(x)+H_2}\,g\,\frac{\Delta\rho}{\rho}},$$

$$\alpha = \frac{3}{2}\frac{c(H_1(x)-H_2)}{H_1(x)H_2}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{cH_1(x)H_2}{6},$$

$$\alpha_1(x) = -\frac{3c(x)}{8}\frac{H_1^2(x)+6H_1(x)H_2+H_2^2}{H_1^2(x)H_2^2}$$

где $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, ρ_1 – плотность нижнего, ρ_2 – верхнего слоя жидкости, H_2 – глубина верхнего слоя, которую считаем постоянной, $H_1(x) = -H_{10} + H(x)$ – переменная глубина нижнего слоя,H_{10} – невозмущенная глубина нижнего слоя,$H(x)$ – изменение дна.

Для дальнейшего анализа удобнее ввести сопровождающую систему отсчета с фазовой скоростью c линейных длинных волн, через замену $s = \int \frac{dx}{c(x)} - t$,s – время в сопровождающей системе отсчета. Сделаем замену:

$$\eta(s,x) = Q(x)\xi(s,x),\ Q = \sqrt{\frac{c^2(x_0)H(x_0)H_1(x)}{c^2(x)H(x)H_1(x_0)}},, \quad (3)$$

где $Q(x)$ – фактор линейного усиления при распространении от точкиx_0к точке x.

В результате уравнение (1) перепишется в виде

$$\xi_x + (\frac{\alpha(x)Q(x)}{c^2(x)}\xi + \frac{\alpha_1(x)Q^2(x)}{c^2(x)}\xi^2)\xi_s + \frac{\beta(x)}{c^4(x)}\xi_{sss} = 0, \quad (4)$$

где ξ – модифицированное смещение границы раздела.

На рис. 1 показаны зависимости обезразмеренных коэффициентов квадратичной $\alpha H(x)/c$ и кубической $\alpha_1 H^2(x)/c$ нелинейности от относительной толщины верхнего слоя H_2. При увеличении полной глубины (при наличии впадины на дне) относительная толщина верхнего слоя уменьшается, и оба коэффициента нелинейности растут по абсолютной величине (оставаясь отрицательными), причем растут не только безразмерные, но и размерные их значения. Поэтому с ростом полной глубины волновое поле становится более нелинейным, и

его амплитуда может возрастать, несмотря на то, что глубина жидкости увеличивается, и параметр усиления $Q(x)$ уменьшается.

В случае, когда глубина меняется медленно, солитон уравнения Гарднера (4) в случае однородной среды описывается выражением:

$$\xi(s, x_0) = \frac{A}{1 + B\cosh^2(\gamma s))}, \qquad (5)$$

где a–амплитуда волны, а параметры связаны соотношением:

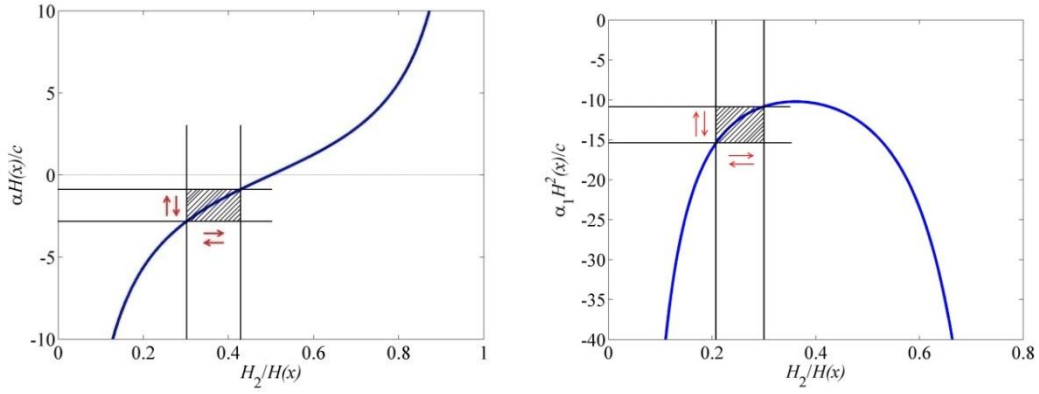
$$B = a\frac{\alpha_1}{\alpha} + 1,\ A = a(a\frac{\alpha_1}{\alpha} + 2),\ \gamma^2 = \alpha a(a\frac{\alpha_1}{\alpha} + 2)\frac{1}{6\beta}.$$

Форма солитона (5) зависит только от одного параметра – амплитуды. Уравнение Гарднера с переменными коэффициентами (4) не имеет точных решений, и в неоднородной среде начальная волна, заданная в форме(5), будет изменяться, однако при условии, что неоднородности плавные, эти изменения будут происходить медленно, и для решения (5) будет выполняться закон сохранения потока энергии [17,3].

Будем производить вычисления для дна, заданного углублением, описываемым выражением

$$H(x) = H_0 - \frac{a_h}{2}(-\tanh(a(x - x_1)) + \tanh(a(x - x_2))), \qquad (6)$$

где x_1 и x_2 – границы неровности дна, $1/a$ – характерная ширина переходной зоны, при a_h>0неровность представляет собой углубление, а при a_h< 0 имеем возвышенность на дне.



а) б)

Рис. 1. а) Коэффициент квадратичной нелинейности α ,б) Коэффициент кубической нелинейности α_1 уравнений(1), (4)

Результаты моделирования

Рассмотрим следующий пример конфигурации двухслойной жидкости: $H_1 = 40$ м, $H_2 = 30$ м, $\rho_1 = 1010$ кг/ м^3 $\rho_2 = 1000$кг/м^3. Дно будем задавать формулой (6), в виде углубления с такими параметрами: a=0.00055 1/м,x_1= 5500 м, x_2=3·x_1, с различными амплитудамиуглубления a_h. Эволюция волнового поля в рамках граничной задачи для уравнения (4) с условием в начальной точке (5) амплитудой 4.7 м, восстановленного по (3), показана на рис. 2. Видно, что

амплитуда волнового поля увеличивается при прохождении углубления на дне. Начальная уединенная волна в процессе адиабатической перестройки трансформируется в более узкую уединенную волну, но с большей амплитудой, с сопутствующей генерацией более коротковолнового и более медленного цуга волн.

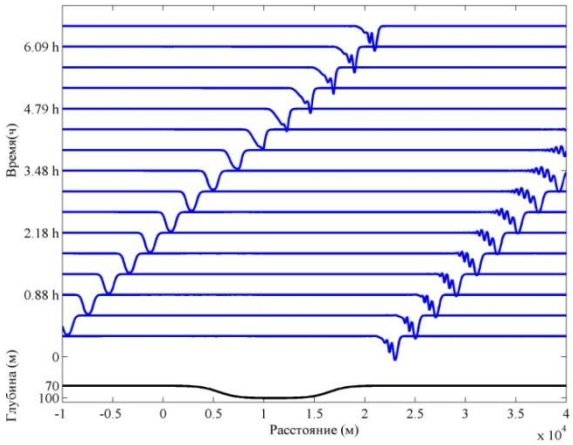
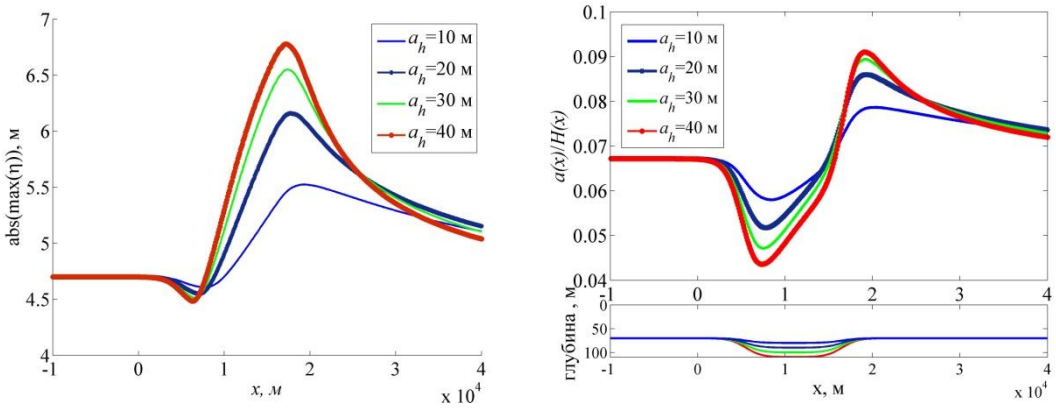


Рис. 2. Эволюция внутреннего волнового поля η(*x*,*t*), в начальной точке заданного выражением (5) с a_h =30 м, сдвиг по вертикали между кривыми равен 5 м



а) б)

Рис. 3. Изменение амплитуды волнового поля в рамках уравнения Гарднера(1) при различных амплитудах изменения дна: а) – для размерной амплитуды, б) – для нормированной на полную глубину жидкости

На рис. 3а показаны зависимости амплитуды волнового поля η(*x*, *t*) от расстояния для различных амплитуд углубления на дне в диапазоне от 10 до 40 м. Видно, что с увеличением глубины впадины увеличивается и амплитуда волнового поля. Однако нормировка амплитуды волнового поля на полную глубину жидкости приводит к тому, что сначала происходит уменьшение относительной амплитуды при прохождении склона вниз, а затем – увеличение ее при выходе из впадины (Рис. 3б). Относительные изменения амплитуды тем больше, чем больше глубина впадины.

Схема режимов изменения амплитуды волнового поля показана на рис. 4 на плоскости параметров $\mu = \dfrac{a}{H_0 + a_h - H_2}$ и $\varepsilon_h = \dfrac{a_h}{H_0}$. Видно, что для внутренних уединенных волн в двухслойной жидкости с неровным дном существуют зоны параметров с качественно различной динамикой: 1) уменьшение амплитуды при увеличении глубины дна (классический сценарий для поверхностных волн), 2) уменьшение амплитуды, а затем ее увеличение при прохождении подводной впадины, 3) увеличение амплитуды волны при увеличении глубины дна – такой режим возможен при увеличении начальной амплитуды волны, либо приувеличении глубины впадины.

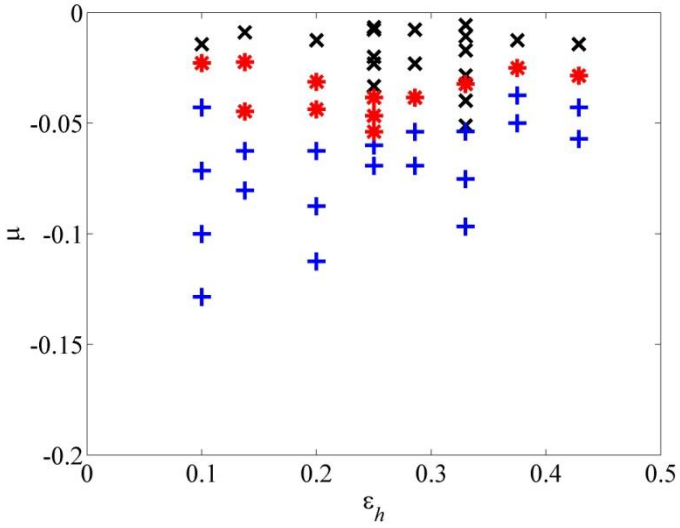


Рис. 4. Плоскость параметров μ и ε_h для случая углубления; × – уменьшение амплитуды волны, *– уменьшение и увеличение, + – увеличение амплитуды волны

Библиографический список

1. Пелиновский Е.Н., Шаврацкий С.Х., Раевский М.А. Уравнение Кортевега – де Вриза для нестационарных внутренних волн в неоднородном океане// Изв АН СССР ФАО. 1977, Т.13, №. 3, с.325–328.
2. Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н. Ламб К., Гримшоу Р., Холловэй П. Эффекты кубической нелинейности при распространении интенсивных внутренних волн. // ДАН. – 1999. – Т. 364. - № 6. – С. 824 – 827.
3. Талипова Т.Г., Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Пелиновский Е.Н. Распространение уединенных внутренних волн в двухслойном океане переменной глубины// Изв. РАН ФАО, 2015, Т. 51, №1, 103-112
4. Djordjevic V.D. and Redekopp L.G. On two-dimensional packets of capillary-gravity waves// Appl. Math. Phys, V. 79, 1977
5. Grimshaw, R. Evolution equations for long nonlinear internal waves in stratified shear flows, Stud. Appl. Math., 65, 159–188, 1981.
6. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. and Kurkin A. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves. // J. Phys. Ocean., 2004, 34: 2774-2779.
7. Grimshaw, R., Pelinovsky, E., Stepanyants, Y. and Talipova, T. Modelling internal solitary waves on the Australian NorthWest Shelf. // Marine and Freshwater Research, 2006 57: 265 272.

8. Grimshaw, R., Pelinovsky, E. and Talipova, T. Modeling internal solitary waves in the coastal ocean // Surveys in Geophysics, 2007, 28, 273-298.

9. Grimshaw R., Talipova T., Pelinovsky E., Kurkina O. Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration // Nonlin. Processes Geophys. , 2010. – p. 633-649.

10. Holloway P.E., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North&West Shelf // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27. № 6.P. 871–896.

11. Holloway P, Pelinovsky E., Talipova T. A Generalized Korteweg – de Vries Model of Internal Tide Transfor&mation in the Coastal Zone // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № C8. P. 18333–18350.

12. Koop C.G., Butler G. An investigation of internal solitary waves in a two–fluid system. // J. Fluid Mech., 1981, V. 112, P. 225 – 251.

13. Liu A., Holbrook J., Apel J. Nonlinear internal wave evolution in the Sulu sea // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15. P. 1613–1624.

14. Liu A.K., Chang Y.S., Hsu M. K., Liang N.K. Evolu&tion of nonlinear internal waves in the East and South China Seas // J. Geoph. Res. 1998. V. 103. № C4.P.7995–8008.

15. O'Driscoll, K. and Levine, M. Simulations and observation of nonlinear internal waves on the continental shelf: Korteweg–de Vries and extended Korteweg–de Vries solutions, Ocean Sci., 13, 749-763, https://doi.org/10.5194/os-13-749-2017, 2017.

16. Orr M.H., Mignerey P.C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C3. P. 3064.

17. Nakoulima, O, Zahibo, N, Pelinovsky, E., Talipova, T, Slunyaev, A and Kurkin, A (2004) Analytical and numerical studies of the variable-coefficient Gardner equation. Appl. Math. Comp., 152: 449-471.

18. Turkington, B., Eydeland, A., Wang, S. A computational method for solitary internal waves in a continuously stratified fluid. Stud. Appl. Math, 1991,V. 85, P. 93–127.

19. Zhou X., Grimshaw R. The effect of variable currents on internal solitary waves // Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1989, V.14, p.17–39.

L.V. Talalushkina, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, P.V. Lobovikov

COMPETITION OF NONLINEARITY AND INHOMOGENEITY IN THE FRAMEWORK OF WEAKLY-NONLINEAR KDV-TYPE MODELS FOR SOLITARY WAVES IN A TWO-LAYER FLUID AN UNEVEN BOTTOM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

We consider the problem of the propagation of a localized perturbation at the interface in a two-layer fluid over an uneven bottom in the framework of weakly nonlinear models of the Gardner equation for an inhomogeneous medium. The thickness of the upper layer of liquid is assumed to be constant. Such combinations of parameters of the medium are possible, that with an increase in the total depth of the basin, the amplification parameter decreases, but the coefficient of quadratic nonlinearity increases in modulus, and we can observe the amplification of the wave in an inhomogeneous medium when it propagates to the deeper zone.

Key words: internal waves, nonlinear theory, two-layer fluid, Gardner equation, variable bottom.

УДК 551.466.327

Р.В. Шамин, С.В. Ершков

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ВОЛН-УБИЙЦ В ОКЕАНЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Российский университет дружбы народов

Рассматривается возможность использования космических снимков морской поверхности для оценки вероятности возникновения аномально больших поверхностных волн (волн-убийц). Показано, что общедоступные космические снимки могут быть эффективно использованы для оценки опасности волн-убийц в океане.

Ключевые слова: волны-убийцы, морская зыбь, космические снимки, дистанционное зондирование Земли

Волны-убийцы представляют собой внезапные поверхностные волны экстремально большой амплитуды, которые возникают в Мировом океане вследствие нелинейной динамики поверхностных волн [1-2]. Такие волны представляют собой серьезную опасность для судоходства и морской инфраструктуры [3].

Методы изучения поверхностных волн на основе натурных наблюдений не позволяют оперативно обнаруживать волны-убийцы на больших областях в океане. Поэтому большую перспективу имеет изучение поверхностного волнения с помощью дистанционного зондирования, в первую очередь космического [4-5].

В настоящем докладе показано, что использование общедоступных космических снимков может быть использовано для обнаружения районов морской зыби и оценки параметров этих волн. Используя универсальные результаты о вероятности возникновения волн-убийц в районе морской зыби, можно получать приемлемые оценки вероятности возникновения волн-убийц в районах, где обнаружена морская зыбь.

Данные результаты могут быть использованы для построения оперативных прогнозов возникновения волн-убийц в районах океана по космическим наблюдениям.

Под волнами-убийцами в океане подразумеваются поверхностные волны аномально большой амплитуды. Такие волны могут достигать высоты более 30 метров и представлять реальную угрозу. В последнее время выходит большое количество работ, посвященных проблемам волн-убийц, в которых рассматриваются физические процессы, приводящие к формированию экстремальных волн, а также изучается статистика возникновения волн-убийц. Важнейшей практической проблемой является предсказание возникновения волн-убийц по наблюдениям за динамикой морской поверхности.

Волна-убийца регистрируется в том случае, когда высота максимальной волны в цуге волн превосходит значительную высоту волнения (средняя высота трети самых больших волн в цуге) более чем в двое. Пусть $H_{max}(t)$ - высота максимальной волны в момент времени t, а $H_s(t)$ - значительная высота волнения в момент t. Введем функцию

$$\nu(t) = \frac{H_{max}(t)}{H_s(t)},$$

которая является индикатором волны-убийцы. Мы будем говорит, что вмомент времени t^* наблюдается волна-убийца, если имеет место неравенство

$$\nu(t^*) \geq 2.1.$$

Критическое значение $\nu^* = 2.1$ выбрано эмпирически и используется во многих работах, посвященных волнам-убийцам [1].

В работах [6-8] были получены оценки вероятности возникновения волн-убийц на основе вычислительных экспериментов. Задача фактического обнаружения явления волны-убийцы в океане с помощью космического наблюдения является очень сложной, поскольку волны-убийцы живут очень короткое время (максимально несколько минут). Кроме того, для оптического обнаружения такой волны необходимо использовать очень дорогую аппаратуру.

В нашей работе мы используем космические снимки морской поверхности для определения районов морской зыби, поскольку именно в этих районах наиболее вероятно возникновение опасных волн-убийц. На основании доступных космических снимков можно не только определить районы морской зыби, но и оценить длину волны.В результате обработки таких снимков с помощью разработанного нами программного обеспечения можно оценивать длину волн зыби.

Аналогично нами было исследовано большое количество снимков морской поверхности из космоса в следующих районах:

- Тихий океан, восточное побережье Австралии;
- Тихий океан, западное побережье Северной Америки;
- Атлантический океан, восточное побережье Северной Америки;
- Атлантический океан, пролив Дрейка;
- Атлантический океан,побережье Ирландии;
- Южный океан, южнее Африки;
- Черное море.

Во всех этих районах нам удалось обнаружить районы, в которых распространялась морская зыбь. Кроме того, возможно оценивать длину этих волн. Результаты обработки космических снимков могут быть использованы для оценки вероятности возникновения волн-убийц можно использовать методы, основанные на результатах вычислительных экспериментов. В работе гл. 4, п. 11, [2] установлено, что вероятность возникновения волны-убийцы в отдельной точке в районе зыби может оценена по следующей формуле

$$T = \frac{p}{\lambda_0 \tau L}$$

где T – вероятность появления волны убийцы, p – период волны, τ – среднее время жизни экстремальных волн,L – длина волны, λ_0 – универсальная интенсивность возникновения волн убийц, которая равна $\lambda_0 = 6*10^{-9}$. Среднее время жизни оценивается следующим образом: $\tau = 108$ с, см. [9]. Период волны p вычисляется следующим образом

$$p = \frac{L}{V}$$

где V – скорость движения волны оценивается согласно линейное теории распространения поверхностных волн по формуле

$$V = \sqrt{\frac{g}{K}},$$

где g – ускорение свободного падения (g = 9,81 м/с^2), K – коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$K = \frac{2\pi}{L},$$

Проводя соответствующие оценки для реальных данных, полученных с помощью космических снимков, мы получали оценки вероятности возникновения опасных волн-убийц в различных районах Мирового океана.

Эти результаты согласуются с теоретическими оценками вероятности возникновения аномально больших волн с помощью распределения Рэлея, так в [10] подсчитано, что согласно распределению Рэлея волна, вдвое превышающая значительную высоту волнения, должна возникать раз в 3000 волн. В расчетном случае, например, когда период волны составляет

12,65 с, вероятность появления такой волны 21,7 часов или раз в 6173 волн. Полученная оценка совпадает с данными натурных экспериментов, приведенными в [11].

Выводы

В докладе рассмотрены вопросы использования космических снимков морской поверхности для оценки вероятности возникновения аномально больших поверхностных волн (волн-убийц). Использование космических снимков позволяет проводить оценку вероятности возникновения волн-убийц на больших площадях Мирового океана. Однако использование космических снимков, находящихся в общем доступе, практически не позволяет наблюдать отдельные волны. С другой стороны, такие снимки могут быть использованы для обнаружения районов, в которых распространяется морская зыбь.

В настоящем докладе показано, что использование космических снимков доступных на открытых ресурсах, могут быть использованы для обнаружения районов морской зыби и оценки параметров волн зыби. На основании этих оценок предложен метод для оценки вероятности возникновения волн-убийц в районах морской зыби.

Библиографический список

1. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009.
2. Шамин Р.В. Математические вопросы волн-убийц. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2016.
3. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010 // Nat. HazardsEarthSyst. Sci., 11, 2913-2924, doi:10.5194/nhess-11- 2913-2011, 2011.
4. Юдин А.В. Характеристики волн-убийц на основе вычислительных экспериментов. Орел: изд-во "Картуш", 2015. - 92 с.
5. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование земли. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012.
6. Захаров В.Е., Шамин Р.В. О вероятности возникновения волн-убийц // Письма в ЖЭТФ, 2010. т. 91. вып. 2. с. 68–71.
7. Захаров В.Е., Шамин Р.В. Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах // Письма в ЖЭТФ, 2012. т. 96, вып. 1, с. 68–71.
8. Chalikov D. Freak waves:Their occurrence and probability// Phys. Fluids, 2009, v.21 issue 7.
9. Шамин Р.В., Юдин А.В. Статистические характеристики аномально больших поверхностных волн на основе вычислительных экспериментов // Математическое моделирование. Т. 28. № 9. 2016. С. 31-42.
10. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. университет. 2004, 158 с.
11. Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011, т. 4, №4, с. 35–42.

R.V. Shamin, S.V. Ershkov

ON THE POSSIBILITY OF ESTIMATION OF THE HAZARDS OF ROGUE WAVES IN THE OCEAN ON COSMIC PICTURES

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva,
Peoples' Friendship University of Russia

The possibility of using cosmic images of the sea surface to estimate the probability of anomalously large surface waves (rogue waves) is considered. It is shown that public space images can be effectively used to assess the danger of rogue waves in the ocean.

Key words: roguewaves, swell, cosmic pictures, remote sensing of the Earth.

УДК 551.466.3

Е.Г. Шургалина

ВЛИЯНИЕ ТОЛСТОГО СОЛИТОНА НА ДИНАМИКУ СОЛИТОННОГО ГАЗА В РАМКАХ УРАВНЕНИЯ ГАРДНЕРА

Институт прикладной физики РАН,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Настоящая работа посвящена исследованию солитонной турбулентности в интегрируемых уравнениях типа Кортевега – де Вриза. Теоретическая модель основана на расширенном уравнении Кортевега – де Вриза (уравнении Гарднера), где учитываются и квадратичная и кубическая нелинейности. Рассмотрен случай отрицательной кубической нелинейности, когда так называемые толстые солитоны могут играть значительную роль. Даны аналитические оценки вклада толстого солитона в статистические моменты (среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс). Произведено сравнение динамики солитонного газа в рамках уравнения Гарднера с КдВ моделью (когда отсутствует кубическая нелинейность). Основное внимание сфокусировано на высших статистических моментах. Представлено влияние толстых солитонов на асимметрию и эксцесс волновых полей.

Ключевые слова: солитон, солитонная турбулентность, уравнение Гарднера, уравнение Кортевега – де Вриза, статистические моменты, толстый солитон, численное моделирование

Введение

Уранение Гарднера широко используется в различных областях физики, таких как физика плазмы, физика жидкостей и квантовая теория поля. Эта модель представляет собой комбинацию уравнения Кортевега-де Вриза (КдВ) и модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза (мКдВ) и включает как квадратичный, так и кубический нелинейные члены. Эти уравнения полностью интегрируются с использованием обратной задачи рассеивания. Особое значение для приложений играют точные решения - солитоны. Если кубический нелинейный член отрицателен, то солитоны имеют одинаковую полярность. Солитон ограничен по амплитуде значением 1 и предельный солитон называют толстым. Внутренние солитоны могут вызвать повреждение подводных лодок, трубопроводов и инициировать смещение донных осадков, которые влияют на стабильность морских платформ. Солитонные структуры интенсивных внутренних волн часто наблюдаются в разных областях Мирового океана [1-2]. В прибрежных океанических зонах нелинейные внутренние волны обычно генерируются приливами и часто имеют форму осциллирующих фронтов (солиборов), близких к последовательности солитонов [3-6]. В результате, взаимодействия внутренних солитонов приводят к солитонной турбулентности, которая является частью более общей проблемы волновой турбулентности в интегрируемых системах, активно обсуждаемой сейчас в нелинейной физике, в основном на примерах классического уравнения Кортевега-де Вриза и нелинейного уравнения Шредингера. Солитонная турбулентность активно обсуждается для поверхностных волн на глубокой воде [7-9], а также на мелкой воде [10-12]. Исследование солитонного газа в рамках моделей КдВ и мКдВ представлено в [13-16]. Особое внимание уделено вероятности появления волн-убийц. В настоящей работе мы расширяем исследование солитонного газа до модели Гарднера, когда существование толстых солитонов меняет динамику солитонного газа.

Математическая модель

Уравнение Гарднера имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+(\alpha u+\alpha_1 u^2)\frac{\partial u}{\partial x}+\beta\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}=0, \quad (1)$$

где α - коэффициент квадратичной нелинейности, α_1 – коэффициент кубической нелинейности, β – коэффициент дисперсии. Оба коэффициента нелинейности могут быть положительными и отрицательными в зависимости от плотностной стратификации.

Каноническая форма уравнения (1), используемая при расчетах в данной работе, имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+6u(1-u)\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}=0, \quad (2)$$

Точное солитонное решение уравнения (2) принимает следующий вид:

$$u=\frac{4K^2}{1+\sqrt{1-4K^2}\cosh\left(2K\left(x-x_0\right)\right)}, \quad (3)$$

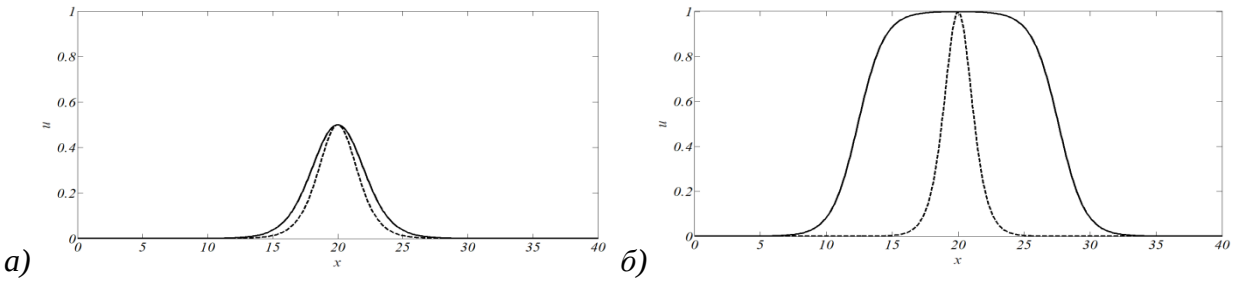
где параметр K, $0<K<1/2$ характеризует амплитуду солитона:

$$A=\frac{4K^2}{1+\sqrt{1-4K^2}}, \quad 0<A<1. \quad (4)$$

Скорость солитона равна $V=4K^2$. В случае малых амплитуд солитон имеет форму солитона Кортевега – де Вриза (рис. 1а). С другой стороны, солитон ограничен по амплитуде:

$$A_{\lim}=\frac{\alpha}{|\alpha_1|}=1. \quad (5)$$

Солитоны с амплитудой $A>0.6$ могут рассматриваться как ‘‘широкие’’, а при $A\to 1$. солитон называется толстым (рис.1б).



а) *б)*

Рис. 1 Сравнение форм солитонов: пунктирная линия – солитон КдВ, сплошная линия – солитон Гарднера

В свою очередь толстый солитон удобно представить суперпозицией кинка и антикинка [17]:

$$u(x,t)=\frac{1}{2}\left(\tanh Z_+-\tanh Z_-\right), \quad Z_\pm=K_1\left(x-4K_1^2t\pm\delta_1\right), \quad \delta_1=\frac{1}{2K_1}\operatorname{arctan h}\left(2K_1\right), \quad (6)$$

δ_1 соответствует полу-ширине предельного солитона.

Вклад толстого солитона в моменты волновых полей

Необходимыми элементами статистической волновой теории являются моменты волновых полей. В данном параграфе получены аналитические формулы зависимости моментов волнового поля (среднего, дисперсии, асимметрии и эксцесса), состоящего из толстого солитона, от размера расчетной области (L). Они необходимы для понимания роли толстого солитона в солитонном газе.

Обозначим ширину толстого солитона как

$$L_s = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u dx}{A} = \frac{4\mathrm{a}\tanh\left(\sqrt{\frac{A}{2-A}}\right)}{A}. \quad (7)$$

Среднее волнового поля может быть найдено как

$$< u >= \frac{1}{L}\int_0^L u(x)dx \le \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx = \frac{4\mathrm{atanh}\left(\sqrt{\frac{A}{2-A}}\right)}{L} = A\frac{Ls}{L}. \quad (8)$$

Дисперсия волнового поля есть:

$$\sigma^2 = \frac{1}{L}\int_0^L u^2(x)dx - < u >^2 \approx \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x)dx - \left[\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx\right]^2 =$$

$$= \frac{2}{L}\left(2\mathrm{atanh}\sqrt{\frac{A}{2-A}} - \sqrt{A(2-A)}\right) - \left(\frac{4\mathrm{atanh}\left(\sqrt{\frac{A}{2-A}}\right)}{L}\right)^2 = \quad (8)$$

$$= \frac{L_s}{L} - \left(\frac{L_s}{L}\right)^2 - \frac{2A}{L}\coth\left(\frac{A}{4L_s}\right)$$

Асимптотическая формула для дисперсии: $\sigma^2 = \frac{L_s}{L}$.

Асимметрия находится как

$$Sk = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{(u(x) - < u >)^3 dx}{\sigma^3} \approx \frac{1}{\sigma^3}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx - 3\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x)dx\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx + 2\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx\right)^3\right) =$$

$$= \frac{1}{\sigma^3}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx - \frac{6}{L}\left(2\mathrm{atanh}\sqrt{\frac{A}{2-A}} - \sqrt{A(2-A)}\right) < u > +2 < u >^3\right) \quad (10)$$

Асимптотическая формула для (10) есть $Sk \approx \frac{1}{\sigma^3}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx\right) = \sqrt{\left(\frac{L}{L_s}\right)^3}\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx}{L} \approx \sqrt{\frac{L}{L_s}}$.

Эксцесс волнового поля:

$$Kur = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{(u(x) - < u >)^4 dx}{\sigma^4} \approx$$

$$\approx \frac{1}{\sigma^4}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^4(x)dx - 4\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx + 6\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx\right)^2\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x)dx - 3\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)dx\right)^4\right) =$$

$$= \frac{1}{\sigma^4}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^4(x)dx - 4\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^3(x)dx < u > + \frac{12}{L}\left(2\mathrm{atanh}\sqrt{\frac{A}{2-A}} - \sqrt{A(2-A)}\right) < u >^2 - 3 < u >^4\right) \quad (11)$$

Асимптотическая формула для эксцесса: $Kur = \frac{1}{\sigma^4}\left(\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{+\infty} u^4(x)dx\right) \approx \frac{L}{L_s}$.

Интегралы $\int_{-\infty}^{+\infty} u^3 dx$ и $\int_{-\infty}^{+\infty} u^4 dx$ могут быть найдены численно.

Динамика солитонного газа, содержащего толстый солитон

Чтобы определить роль толстого солитона в общей динамике солитонного газа, введем параметр I_0, определяющийся отношением «массы» всего поля к «массе» толстого солитона:

$$I_0 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u_{solitons}}{\int_{-\infty}^{+\infty} u_{thick_soliton}}. \quad (12)$$

Рис. 2 демонстрирует зависимость высших статистических моментов от данного параметра. Выберем два значения параметра I_0 на данных кривых, соответствующих большому и маленькому значению моментов: I_0=1 и I_0=4 (обозначены кружками на рисунке).

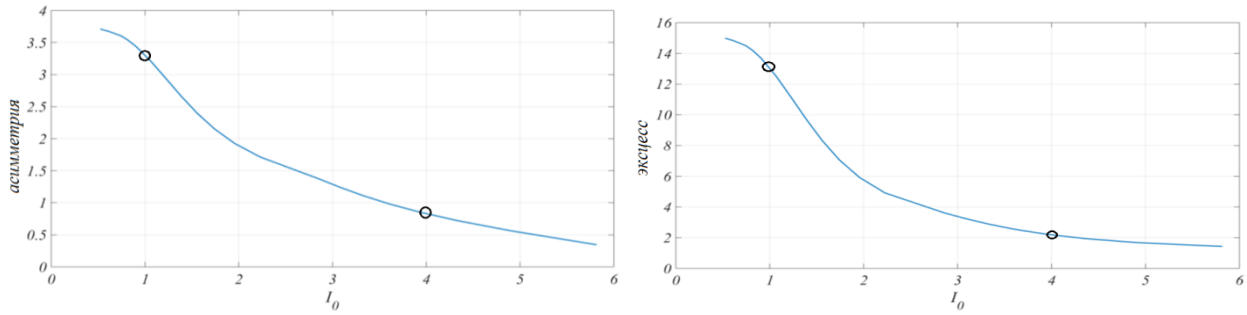


Рис. 2 Зависимость асимметрии и эксцесса от I_0.

Солитонные поля, соответствующие I_0=1 и I_0=4 представлены на рис. 3. В первом случае все солитоны имеют достаточно большие амплитуды, а во втором – толстый солитон значительно выделяется на фоне маленьких солитонов.

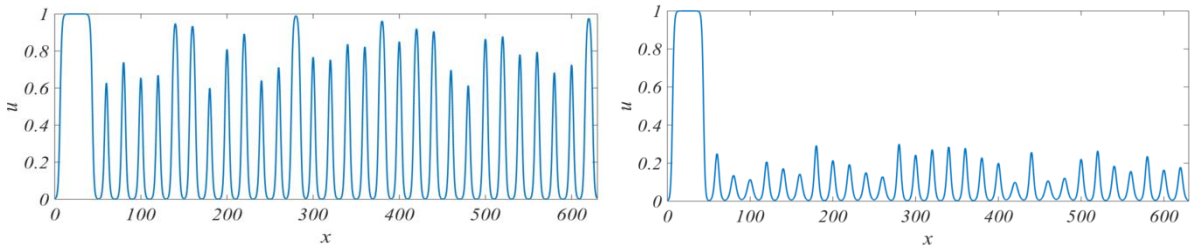


Рис.3 Солитонные поля с I_0=1 (справа) и I_0=4 (слева)

С помощью численного моделирования было проведено сравнение высших статистических моментов (асимметрии и эксцесса) двух волновых полей, представленных на рис. 3, в дополнение также представлены результаты моделирования КдВ-поля с аналогичными амплитудами солитонов (соответствующие случаю I_0=4). Было показано, что асимметрия и эксцесс КдВ полей всегда больше этих параметров, чем в случае уравнения Гарднера. Однако когда масса толстого солитона сравнима с массой остального поля, асимметрия и эксцесс сильно возрастают по сравнению со случаем, когда рассматривается то же поле, где толстый солитон заменен на солитон с малой амплитудой (рис. 4). В случае же, когда масса толстого солитона меньше массы остального поля в 4 раза, значения высших статистических моментов различается примерно на 2% (в случае присутствия толстого солитона и без него) (рис.5).

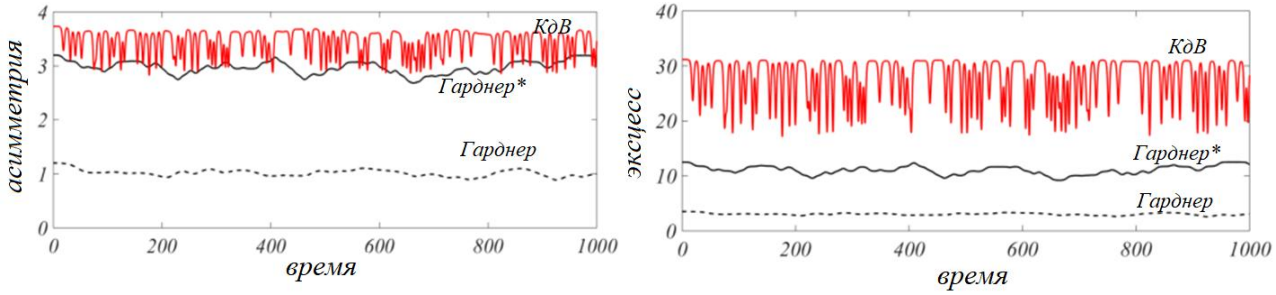


Рис.4 Зависимость асимметрии и эксцесса от времени (верхняя кривая соответствует случаю КдВ, средняя, обозначенная как «*Гарднер» соответствует полю, содержащему толстый солитон, а нижняя пунктирная – то же поле, но толстый солитон заменен солитоном малой амплитуды, I_0=1)**

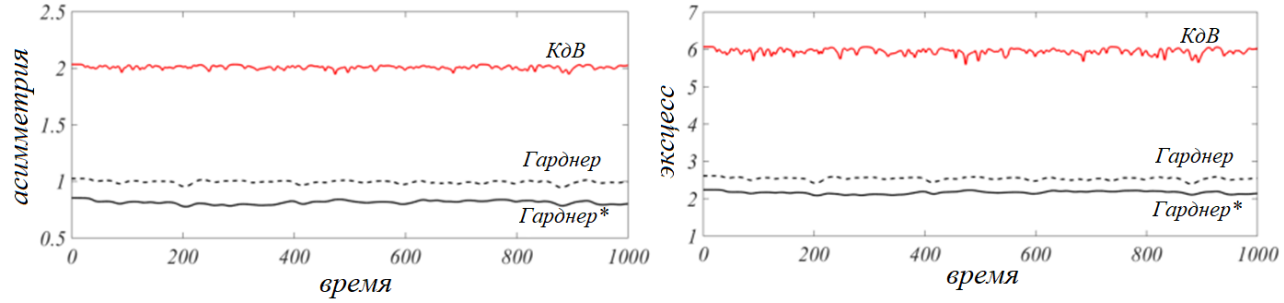


Рис.5 Зависимость асимметрии и эксцесса от времени (верхняя кривая соответствует случаю КдВ, средняя, обозначенная как *«Гарднер*»* соответствует полю, содержащему толстый солитон, а нижняя пунктирная – то же поле, но толстый солитон заменен солитоном умеренной амплитуды, I_0=4)

Заключение

В данной работе изучается динамика солитонного газа в рамках уравнения Гарднера с отрицательной кубической нелинейностью. Аналитически найдены значения четырех моментов волновых полей, содержащих толстый солитон, и их асимптотики. С помощью введенного параметра, определенного как отношение «массы» (первого интеграла) солитонного поля (без учета толстого солитона) к «массе» толстого солитона, было определено, когда толстый солитон сильно влияет на характеристики волновых полей, а когда его роль незначительна. Так, при значении этого безразмерного параметра больше четырех (то есть когда масса толстого солитона занимает менее 25% «общей массы волнового поля»), его вклад в высшие статистические моменты минимален (изменение эксцесса солитонного поля с толстым солитоном и без него рано примерно 2%). В то время как при значении введённого параметра, равного 1 (то есть масса толстого солитона равна массе всего остального поля), значения эксцесса солитонного газа с присутствием толстого солитона и без него отличаются в 3 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-32-60012, 18-02-00042, 16-05-00049.

Библиографический список

1. Pingree, R.D. Solitary internal waves in the Celtic Sea / G.T. Mardell // Progress in Oceanography. 1985. V. 14. P. 413–441.
2. New, A.L. (1992) Local generation of internal soliton packets in the central Bay of Biscay / R.D. Pingree // Deep-Sea Res. 1992. V. 39. P. 1521-1534
3. Pelinovsky, E.N. Criteria for the transition from a breaking bore to an undular bore / Shurgalina E.G., Rodin A.A. // Izvestya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51, № 5. P. 530-533.
4. Kurkina, O. Nonlinear disintegration of sine wave in the framework of the Gardner equation / Rouvinskaya E., Talipova T., Kurkin A., Pelinovsky E. // Physica D. 2016. V. 333. P. 222–234.

5. Talipova, T. Numerical Modeling of the Internal Dispersive Shock Wave in the Ocean / Pelinovsky E., Kurkina O., Kurkin A. // Shock and Vibration. 2015. 875619.
6. Ostrovsky, L. Beyond the KdV: Post-explosion development / Pelinovsky E., Shrira V., Stepanyants Y. // Chaos. 2015. V. 25. 097620.
7. Agafontsev D.S. Integrable turbulence generated from modulational instability of cnoidal waves / V.E. Zakharov // Nonlinearity. 2016. V. 29. № 11. P. 3551-3578.
8. Akhmediev N. Breather turbulence versus soliton turbulence: Rogue waves, probability density functions, and spectral features / J.M. Soto-Crespo, N. Devine // Phys. Rev. E. 2016. V. 94. 022212.
9. Soto-Crespo, J.M. Integrable Turbulence and Rogue Waves: Breathers or Solitons? / N. Devine, N. Akhmediev // Phys Rev Lett. 2016. V. 116. №10. 103901.
10. Osborne, A.R. Soliton basis states in shallow-water ocean surface waves / E. Segre, G. Boffetta // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 592-595.
11. Osborne, A.R. Behavior of solitons in random-function solutions of the periodic Korteweg – de Vries equation. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 3115-3118.
12. Costa, A. Soliton Turbulence in Shallow Water Ocean Surface waves / A.R. Osborne, D.T. Resio, S. Alessio, E. Chirivi', E. Saggese, K. Bellomo, C.E. Long // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. 108501.
13. Dutykh, D. Numerical simulation of a solitonic gas in KdV and KdV-BBM equations / E. Pelinovsky // Physical letters A. 2014. V. 378. № 42. P. 3102-3110.
14. Pelinovsky, E. KDV soliton gas: interactions and turbulence, In: Challenges in Complexity: Dynamics, Patterns, Cognition (editors: I. Aronson, N. Rulkov, A. Pikovsky, L. Tsimring) / E. Shurgalina // Springer. 2017. P. 271-281.
15. Шургалина Е.Г. Динамика ансамбля нерегулярных волн в прибрежной зоне / Е.Г. Пелиновский // Н.Н.: НГТУ. 2015. 179с.
16. El G.A. Critical density of a soliton gas. Chaos. 2016. V. 26. № 2. P. 1–7.
17. Gorshkov, K.A. Perturbation theory for kinks and its application for multisoliton interactions in hydrodynamics / L.A. Ostrovsky, I.A. Soustova, V.G. Irisov // Physical Review E. 2004. V.69. 016614.

Shurgalina E.G.

THE INFLUENCE OF THICK SOLITON ON SOLITON GAS DYNAMICS WITHIN THE FRAMEWORK OF GARDNER EQUATION

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The present work is dedicated to the study of solitonic turbulence in integrable systems of Korteweg – de Vries type equation. The theoretical model is based on extended version of the Korteweg-de Vries equation (Gardner equation) which takes into account both quadratic and cubic nonlinearity. The case of negative cubic nonlinearity when so-called “thick” or “table-top” solitons may play the essential role is considered. Analytical assessments of input of thick soliton in statistical moments (mean, variance, skewness and kurtosis) are given and confirmed by numerical modeling. The comparison of the dynamics of soliton gas with the Korteweg – de Vries (KdV) model (when there is no cubic nonlinearity) is presented. The main attention is focused on the higher statistical moments of wave fields. The influence of thick solitons on skewness and kurtosis of wave field is demonstrated.

Key words: soliton, soliton turbulence, Gardner equation, Korteweg – de Vries equation, statistical moments, thick soliton, numerical modeling

КРАТКАЯ СПРАВКА О НИЖЕГОРОДСКОЙ РАДИОЛАБОРАТОРИИ

(по материалам сайта музея Нижегородской радиолаборатории http://radiolaboratorija.ru/**)**

Официальным днём основания Нижегородской радиолаборатории считается 2 декабря 1918 года, когда В. И. Ленин подписал «Положение о радиолаборатории с мастерской».

Предпосылки

Стратегически важными для страны задачами, над решением которых сосредоточились учёные радиолаборатории, были налаживание отечественного электровакуумного производства и развитие радиотелефонии.

И уже, чуть более чем через полгода было налажено серийное производство приёмных ламп "ПР-1" с высоким вакуумом. Это был важный виток в истории Российской радиотехники. Теперь Россия могла полностью отказаться от покупки зарубежных ламп.

Помимо производства радиоламп в радиолаборатории необходимо было разработать вспомогательные устройства, например, необходимо было придумать источник постоянного тока высокого напряжения, этим занималась лаборатория Вологдина. В ней сумели создать первый в истории безопасный ртутный выпрямитель, тогда как на западе от исследований в этом направлении отказались.

Подразделения и направления разработок

Лаборатория М. А. Бонч-Бруевича. Разработкой методов использования электронных ламп в радиотелефонной связи занималась лаборатория под руководством М. А. Бонч-Бруевича. Лаборатории удалось наладить серийный выпуск электронных ламп. С весны 1919 года Нижегородская лаборатория выпускала до 1000 ламп в год.

Параллельно с серийным выпуском, лаборатория работала над повышением мощности электронных ламп. В январе 1920 года Бонч-Бруевичем была разработана лампа с массивным алюминиевым анодом для лучшего отвода тепла. Мощности лампы оказалось достаточно для того, чтобы создать радиопередатчик, обеспечивающий связь Нижнего Новгорода с Москвой.

Конструкция лампы не позволяла увеличить мощность лампы настолько, чтобы удовлетворить требованиям поставленной перед изобретателями задачи по созданию «радиотелефонной станции с радиусом действия 2000 вёрст»[2] (более 2100 км). Молодая Советская республика испытывала недостаток металлов, использовавшихся в зарубежных лампах. Бонч-Бруевич предложил новый оригинальный способ — водяное охлаждение медного анода, который позволил повысить мощность ламп до 1 кВт.

Дальнейшим улучшением конструкции стало увеличение поверхности анода, для чего он был сделан четырёхкамерным, в каждой камере — свои катод и сетка. Уникальная конструкция позволила решить задачу, долгое время считавшуюся на Западе неразрешимой. Уже осенью 1920 года на Ходынской радиостанции в Москве был установлен радиотелефонный передатчик из Нижегородской лаборатории с мощностью 5 кВт, а в 1922 — 12 кВт. Радиостанция получила наименование «Центральная радиотелефонная станция им. Коминтерна».

В 1923 году рассеиваемая мощность разработанных электронных ламп достигла 25 кВт, в 1925—1926 — 100 кВт. К 1928 году в 25 городах страны стояли разработанные в лаборатории дешёвые универсальные передатчики мощностью 1,2 кВт.

Лаборатория В.В.Татаринова. В 1919 году в качестве руководителя одной из лабораторий НРЛ был привлечен Владимир Васильевич Татаринов, преподаватель физики в Нижегородском университете. Он стал пионером в области создания методики и аппаратуры для исследования антенн на малых моделях в лабораторных условиях. В лаборатории были решены вопросы питания антенн бегущей волной. В частности, Татариновым был предложен простой способ настройки фидеров на бегущую волну при помощи так называемого «индуктивного мостика». В 1925—1926 гг. появились первые коротковолновые направленные антенны.

Лаборатория В.П.Вологдина. Группа учёных под руководством инженера В.П. Вологдина начала работу в 1919 году. Группа занималась исследованием применения высокочастотных

машин в радиотелефонии. В результате испытаний было установлено, что ВЧ-машины мало пригодны для передачи человеческого голоса. Лаборатория сосредоточилась на создании передатчиков для радиотелеграфирования.

Другим направлением исследований Вологдина стал поиск необходимого для питания анода электронной лампы источника постоянного тока высокого напряжения. Традиционно использующаяся для этих целей динамо-машина была слишком сложна для создания в установленные правительством сроки. В марте 1922 года Вологдин закончил оригинальный трёхфазный ртутный выпрямитель, который позволял получить постоянный ток напряжением 10 кВ.

Лаборатория А.Ф.Шорина. Исследованиями усилительных схем и разработкой усилителей пишущего приёма занималась группа под руководством А. Ф. Шорина, созданная в 1920 году. Впервые в мире здесь были применены быстродействующие буквопечатающие аппараты типа Бодо. Лаборатория разрабатывала громкоговорящие установки для радиотелефонии.

Реорганизация и перевод в Ленинград

1 октября 1925 года Нижегородская радиолаборатория была выведена из подчинения Радиоотделу НКПиТ и передана Научно-техническому отделу Высшего совета народного хозяйства (НТО ВСНХ СССР).

В 1928 году было принято решение о передаче всех исследований и разработок вместе с их коллективом из Нижегородской радиолаборатории в Центральную радиолабораторию треста заводов слабых токов в Ленинграде. 1 октября 1928 года, Нижегородская радиолаборатория была перевезена в Ленинград, где, после объединения с Ленинградской радиолабораторией, появилась Центральная радиолаборатория (ЦРЛ) Треста заводов слабых токов.

Наследники НРЛ в Нижнем Новгороде

В Нижнем Новгороде на базе НРЛ была организована Центральная военно-индустриальная радиолаборатория (ЦВИРЛ), которая в 1939 году преобразована в Горьковский Государственный Союзный завод № 326 имени М. В. Фрунзе и частично НИИ-11, ставший позднее Горьковским научно-исследовательским приборостроительным институтом (до 30 июня 2017 г. ФНПЦ ННИПИ «Кварц» имени А.П Горшкова). Именно в научно-технической библиотеке ННИПИ «Кварц» хранились оригинальные фонды научной библиотеки НРЛ.

Выдающиеся достижения и международное признание

Самыми значительными изобретениями в истории радиолаборатории были: передатчик "Новый Коминтерн", коротковолновые направленные антенны. Была построена теория коротких волн, открыты полупроводники, которые на 30 лет опередили свою эпоху, первые попытки телевещания.

Нижегородская радиолаборатория была дважды награждена орденом Трудового Красного Знамени в 1922 и 1928 годах. В 1924 году радиолаборатории было присвоено имя В. И. Ленина.

Международное признание. В 1923 году Нижегородскую радиолабораторию посетили руководители немецкой фирмы «Телефункен» (*Telefunken*) Дж. Граф фон Арко (*Georg Graf von Arco*) и профессор А. Мейснер, которые отметили явный прогресс по изготовлению мощных электронных ламп по сравнению с Америкой, Англией и Францией.

В 1925 году электронные лампы Бонч-Бруевича демонстрировались на Скандинавско-Балтийской выставке в Стокгольме, обратив на себя внимание прессы и радиотехнических журналов.

В Нижегородской лаборатории работал молодой учёный О.В. Лосев, в 1922 году открывший кристаллический гетеродин (кристадин), ставший экспериментальным обоснованием теории запорного слоя и современного учения о полупроводниках, фактически предтечей теории современной полупроводниковой элементной базы, в том числе микроэлектроники и светодиодной техники и технологий.

УДК 004:01

А.В. Зенькович

ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНИК М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА – Д.В. АГЕЕВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

С 1932 по 1940 год М.А. Бонч-Бруевич заведовал кафедрой радиотехники в Ленинградском электротехническом институте связи. В эти годы в нем под его непосредственным руководством учился студент и аспирант Д.В. Агеев – будущий выдающийся ученый и педагог. С 1949 года он работал в НГТУ и создал в городе научную школу в области радиотехники.

Ключевые слова: М.А. Бонч-Бруевич, Д.В. Агеев, подготовка кадров, создание факультета, научной школы.

Введение

Деятельность Нижегородской радиолаборатории и ее научного руководителя Михаила Александровича Бонч-Бруевича – предмет гордости страны и особенно нашего города. По существу были заложены основы для развития Нижнего Новгорода как одного из центров научных исследований и производства радиоаппаратуры, сыгравшей важную роль в Великой Отечественной войне.

После войны научную деятельность в области радиотехники в Нижнем Новгороде, начатую М.А. Бонч-Бруевичем, продолжил его ученик – выдающийся ученый Дмитрий Васильевич Агеев.

Учеба в Ленинграде

Дмитрий Васильевич Агеев родился 21 февраля 1911 года в Петрограде в семье рабочего. Исключительные творческие способности и целеустремленность проявились у него в полной мере, когда он был еще студентом ЛЭИС. Будучи третьекурсником, он в 1933 году по своей инициативе самостоятельно написал первую научную работу «Обобщение метода Ньютона вычисления корней уравнения», опубликованную в 1934 году в сборнике трудов ЛЭИС. Она была упомянута в вышедшей в 1937 году книге «Успехи советской математики за 20 лет». В 1934 году студент Агеев написал новую работу, а затем на семинаре услышал доклад доцента (впоследствии академика) Ю.Б. Кобзарева на ту же тему. Их совместная статья «О переходных процессах в резонансном усилителе», опубликованная в 1935 году в «Журнале технической физики», открыла новое направление – исследование переходных процессов.

Затем студент Д.В. Агеев начал работать в области помехоустойчивости радиоприема и получил в ней самые существенные результаты. Они были обобщены в выполненной под руководством М.А. Бонч-Бруевича дипломной работе «Методы борьбы с помехами при радиоприеме», признанной государственной комиссией выдающейся. По результатам этой работы в сборнике ЛЭИС №10 за 1935 год была опубликована большая статья «Основы теории линейной селекции». В ней автором предложены и исследованы принципы разделения сигналов, нашедшие самое широкое применение. Эта статья легла в основу первой части диссертации, написанной Д.В. Агеевым в 1938 году. Частично аналогичные результаты американские ученые Л.А. Заде и К.С. Миллер получили в 1952 году [1].

Во второй части была решена проблема пропускной способности «эфира» – канала связи. Американские ученые К.Э. Шеннон и Н. Винер определили пропускную способность канала связи в 1948 году [2,3].

В феврале 1939 года данная диссертация была защищена в качестве кандидатской в Совете ЛЭИС и рекомендована к защите в качестве докторской в правомочном на это Совете. Молодой ученый счел неэтичным дважды защищать одну и ту же работу. В развитие ее второй части он разработал теорию групповой передачи сигналов и в 1940 году защитил ее в качестве докторской диссертации в ЛЭТИ.

Фундаментальные результаты теоретических исследований, выполненных Д.В. Агеевым в 1935-1940 годах, до последнего времени не были опубликованы. О них знал только узкий круг отечественных ученых, за рубежом они не были известны. Только в 2017 году в связи со 100-летием Нижегородского государственного технического университета кандидатская диссертация Д.В. Агеева была издана небольшим тиражом [4].

Указанные выше результаты, как оказалось, опережали на 40-50 лет технические возможности их реализации в полной мере. Однако они четко указывали цели и направления развития техники.

В нашей стране, начиная с 1942 года, результаты теоретических исследований Д.В.Агеева были положены в основу создания на базе имевшейся тогда техники секретной системы мобильной связи для высших эшелонов власти. Более подробная информация об этой системе и сведения о Дмитрии Васильевиче Агееве (не полностью соответствующие действительности) содержатся в телевизионном фильме 2005 года канала Культура «Мобильный для Лубянки».

Д.В. Агеев о своем учителе

«Михаила Александровича Бонч-Бруевича я впервые увидел в 1934 году. Он пришел к нам, студентам четвертого курса радиотехнического факультета Ленинградского электротехнического института связи, впоследствии получившего его имя, читать курс лекций по дисциплине «Распространение электромагнитных волн».

В аудиторию вошел плотный мужчина выше среднего роста. У него выпуклые округлые выразительные глаза. Волосы на висках седые, хотя в то время ему только 46 лет.

Михаил Александрович, руководя научным кружком студентов, одобрил наше желание исследовать колебания в нелинейных системах и предложил несколько тем для работы кружка. Но он также сказал нам, что если мы хотим вести научную работу в радиотехнике, то мы должны расширять свои математические знания с помощью самостоятельного изучения специальных разделов высшей математики. И добавил, что это надо делать непременно в молодые годы.

При чтении лекций Михаил Александрович применял оригинальный метод. На доске и стене были развешаны принесенные им листы бумаги, на которых изображены поясняющие рисунки, формулы, уравнения. Он сказал, что в течение некоторого времени будет объяснять нам содержание первой части учебного материала, а мы в это время должны внимательно слушать, стараясь вникнуть в суть излагаемой темы, но при этом ничего не писать. Затем он предоставит возможность задавать вопросы и ответит на них. И только после этого будет дано специальное время для конспектирования первой темы его лекции. Потом он перейдет ко второй и последующим темам лекции. Излагая сущность темы, Михаил Александрович широко использовал поясняющие рисунки, делал упор на анализе физического механизма явления. Математические формулы играли в его лекциях важную, но не главную роль. Он был убежден, что без понимания физики явления формулы теряют свою ценность. На лекциях все время приходилось напряженно думать, но лектор именно этого и добивался.

В 1935 году я выполнял под руководством М.А. Бонч-Бруевича дипломную работу. Я не часто посещал Михаила Александровича, так как стеснялся отвлекать его от работы. Но каждое посещение моего руководителя давало мне большой импульс для дальнейшей работы. И не только потому, что беседа с ним давала возможность выяснить или уточнить решение различных задач, но также и потому, что каждый раз я уходил от него с твердым намерением сделать все для того, чтобы быть достойным похвалы этого человека.

В 1935 году я окончил ЛЭИС и был оставлен в аспирантуре. В течение первого года моим научным руководителем был профессор А.А. Пистолькорс, а в последующие годы – член-корреспондент АН СССР М.А. Бонч-Бруевич. Его характерная особенность как научного руководителя состояла в том, что он всячески стимулировал собственную творческую мысль аспиранта. Однажды я пришел к нему на консультацию и рассказал о предложенной мною идее решения проблемы, над которой я работал. Михаил Александрович усомнился в правильности решения и

предложил мне самому найти ошибку. По пути домой я нашел ее. А когда на следующей консультации сообщил о причине моего заблуждения, Михаил Александрович сказал (я тогда записал его мнение): «Не переживайте свои ошибки. Они неизбежны и даже полезны, если только их немного, и из них делаются правильные выводы. Успехи окрыляют и воодушевляют. Но одновременно притупляют бдительность, так как человек начинает некритически относиться к своим предложениям. Ошибки же стимулируют самокритику и осмотрительность».

К концу 1938 года диссертация была закончена и передана моему руководителю. В январе 1939 года он позвонил мне и предложил в ближайшее воскресенье приехать к нему домой к 12 часам. У него я застал одного доцента, которого он попросил принять участие в обсуждении моей диссертации.

Михаил Александрович предложил мне подробно рассказать о содержании работы, начиная с введения, первой главы; отвечать на его вопросы он попросил и меня и приглашенного им доцента. На обсуждение всей диссертации потребовалось четыре воскресенья, и каждый раз оно занимало примерно 3-4 часа. Вот это была подлинная защита диссертации! Но на нее М.А. Бонч-Бруевич пожертвовал все свободные от основной работы дни января 1939 года. Так относился Михаил Александрович к научной истине, воспитанию специалистов, к своим обязанностям научного руководителя.

М.А. Бонч-Бруевич был своеобразным ученым, по крайней мере. в трех отношениях. Прежде всего, он был разносторонним деятелем радиотехники, охватывал многие ее отрасли. Он написал и опубликовал 84 работы, в числе которых несколько больших монографий и учебники для вузов и техникумов. Во-вторых, он никогда не удовлетворялся чисто математическим описанием явления, стремился раскрыть его физическую сущность, понять физический механизм процесса. В-третьих, Михаил Александрович был не только ученым но и великим инженером с изумительной интуицией, инженером-творцом, изобретателем, конструктором, технологом, испытателем. Он сделал 60 изобретений и многие свои идеи передал ученикам и сотрудникам, например, идею создания конструкции многокамерного магнетрона – инженерам Алексееву и Малярову.

Личность М.А. Бонч-Бруевича – выдающегося ученого, изобретателя, инженера, в высшей степени добросовестного, доброго человека является вдохновляющим примером служения родине, отечественной науке и технике.»

Работа в г. Горьком и ее результаты

В сентябре 1949 года доктор технических наук Д.В.Агеев выбрал в качестве места работы Горьковский индустриальный институт, сейчас Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева. В нем прошли почти 40 лет его неустанной творческой научной и педагогической работы. Он возглавлял кафедру радиотехники, был деканом радиотехнического факультета, с 1959 года до вынужденного ухода на пенсию в 1988 году заведовал кафедрой радиоприемных устройств.

Круг научных интересов и научной деятельности профессора Д.В. Агеева был необычайно широк. Он внес существенный вклад в ряд направлений теоретической радиотехники, создал и развил новые направления. Над теорией помехоустойчивости радиоприема он продолжал работать всю жизнь. Была создана теория следящего приема ЧМ сигналов, используемых в радиорелейной и спутниковой связи. В развитой Д.В. Агеевым теории спектральных представлений особое место занимает теорема о спектрально-временных соотношениях. Она выходит далеко за рамки общепринятых представлений, является парадоксальной. Во время ее изложения на Всесоюзной сессии НТО РЭС им. А.С. Попова ведущие ученые страны пытались найти ошибки в ее доказательстве, не поняли, не приняли ее. Только спустя 20 лет теорема Д.В. Агеева была подтверждена в книгах ученых.

К направлениям, развитым Д.В. Агеевым, относятся теория резонанса в линейных системах с постоянными и переменными параметрами, в одной из нелинейных систем, общая теория усиления сигналов, теория ключевых методов усиления, теория аппроксимации сигналов, теория приближенных методов определения искажений, теория дискретизации сигналов, теория модуляции и детектирования, проведено исследование понятий амплитуда и частота.

Дмитрий Васильевич Агеев – ученый в самом высоком смысле этого слова. Теоретические научные исследования были его главным делом, он всегда был переполнен новыми идеями и замыслами. Ежедневно все свое свободное от работы время, в том числе выходные и отпуск, он посвящал этому любимому делу. В нем плодотворно сочетались глубокое проникновение в физическое содержание исследуемого явления и прекрасное владение математическим аппаратом для его описания. Целеустремленность и высокая работоспособность, творческая одаренность и высокий интеллект позволяли Дмитрию Васильевичу выбирать интересующую его проблему и доводить ее решение до требуемого результата.

Дмитрий Васильевич был полностью лишен тщеславия. В отличие от почти всех ученых для него главным, приносящим удовлетворение, был результат исследования, а не его публикация. Он не считал целесообразным тратить время на подготовку публикаций, оформление документов. Закончив одно исследование, он сразу брался за другое. Будучи предельно добропорядочным и скромным, он не допускал, чтобы работу по оформлению за него делал кто-то другой. В общении с людьми, будь то студент или коллега, никогда не было и тени превосходства, только доброжелательность.

Понимая необходимость передачи своих колоссальных знаний и опыта другим, Дмитрий Васильевич выбрал для этого уникальный, насколько известно, не примененный ни одним из ученых способ. В течение 13 лет еженедельно или раз в две недели он читал лекции для аспирантов, преподавателей, радиоинженеров города, т.е. для всех желающих, в которых излагал новые полученные им результаты. Он разрешал слушателям использовать их в своих исследованиях. Это был мастер-класс самого высокого научного уровня, школа творчества, научного поиска, логики научного исследования, использования различного, в том числе нового, математического аппарата.

С каждой лекцией слушатели поднимались на ступеньку вверх по лестнице знаний. Они поражались и восхищались оригинальностью решения сложных задач, доступностью изложения, ясным физическим смыслом полученного результата. У них появлялось и крепло желание заниматься научной работой и, естественно, иметь научным руководителем Дмитрия Васильевича. Выпускникам, оставленным в институте для обучения в аспирантуре и поступившим в нее соискателям-преподавателям он щедро раздавал свои новые идеи (темы диссертаций), указывая направления и пути их развития. В дальнейшем к Дмитрию Васильевичу устремился поток аспирантов-заочников и соискателей с заводов, научно-производственных объединений и промышленных НИИ города со своими задачами и проблемами, решать которые им помогал научный руководитель. За почти 40 лет неустанной творческой научной и педагогической деятельности профессора Д.В. Агеева в Горьковском политехническом институте (ГПИ) под его научным руководством 55 человек защитили кандидатские диссертации, а 14 из них затем и докторские. 32 ученика Дмитрия Васильевича, в том числе 7 докторов наук, были преподавателями радиотехнического факультета. Во всех основных НИИ, научно-производственных объединениях и на заводах города работали по несколько учеников Дмитрия Васильевича, в том числе доктора наук.

Теоретические исследования Дмитрия Васильевича в большом числе научных направлений в радиотехнике и связи проложили столбовую дорогу, по которой вслед за своим научным руководителем пошли 55 его учеников. Поставленные крепко на ноги, они стали сами прокладывать параллельные дороги. Главная из них – радиолокация, которая до последних лет была засекреченной. В этом направлении наиболее успешно работали Ю.И. Пахомов и А.А. Зачепицкий. Сегодня в университете исследования продолжают их ученики под руководством А.Г. Рындыка. В радиофизическом институте под руководством А.А. Горбачева проведены работы по нелинейной радиолокации. Импульсную технику развивал Л.А. Моругин и сотрудники возглавляемой им кафедры.

В области радиоизмерений активно работал А.В. Зенькович, вопросы теории спектрально-временного анализа сигналов и систем успешно решались в Горьковском госуниверситете под руководством Ю.Н. Бабанова. В итоге в семидесятые годы прошлого века сформировалась и далее быстро развивалась горьковская научная школа профессора Д.В. Агеева в области радиотехники.

Дмитрий Васильевич внес самый существенный вклад в становление и развитие радиотехнического факультета, по существу, он создал факультет. В течение 25 лет он сам и 32 его ученика (преподаватели факультета), в том числе доктора технических наук, заведующие четырьмя ведущими кафедрами, определяли уровень научной и учебно-методической работы, который непрерывно повышался. По значению новых научных идей и изобретений, по количеству и качеству научных работ, по числу монографий, выпущенных центральными издательствами, по квалификации научно-педагогических кадров, по качеству подготовки радиоинженеров наш факультет встал в один ряд со старейшими радиотехническими факультетами страны.

Библиографический список

1. Zade L.A., Miller K.S. Fundamental Aspects of Multiplexing. Proc. IRE,1952, №9.
2. Shannon C.E., A Mathematical Theory of Communication // BSTJ, 1948, № 3.
3. Wiener N. Cybernetics. N.Y.: Wiley, 1948.
4. Агеев Д.В. Теория селекции и проблема пропускной способности «эфира». НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2017. – 231 с.

A.V. Zenkovich

D.V.AGUEEV, A DISTINGUISHED APPRENTICE OF M.A. BONCH-BRUEVICH

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

In 1932 -1940 M.A. Bonch-Bruevich was the head of the chair in radio engineering at Leningrad Electrotechnical Communication Institute. A prominent scientist-to-be, D.V. Agueev was at that time a student and then postgraduate at the Institute under his personal supervision. Since 1949 D.V. Agueev worked at Nizhny Novgorod State Technical Univercity, he established the scientific school in radio engineering.

Keywords: M.A. Bonch-Bruevich, D.V. Agueev, personnel training, establishing a department, scientific school.

УДК 378+621.37

А.В. Зенькович

ВЫДАЮЩИЕСЯ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССОРА Д.В. АГЕЕВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Профессор Д.В.Агеев подготовил 32 кандидата технических наук преподавателя факультета. В дальнейшем 7 из них стали докторами наук, пятеро возглавили кафедры. Фактически он создал радиотехнический факультет, вывел его на уровень лучших в стране. Профессор Д.В.Агеев создал теорию обучения и на ее основе разработал активный метод лекционного обучения студентов технических вузов. Практическое применение им в течение 4 лет нового метода подтвердило его преимущества перед общепринятым. Кафедра радиоприемных устройств, заведующим которой был профессор Д.В.Агеев, в течение многих лет была передовой в институте.

Ключевые слова: подготовка кадров, создание факультета, теория и метод обучения, передовая кафедра.

Введение

В связи с недавним 100-летием Нижегородского государственного технического университета были особо отмечены люди, составляющие его гордость и славу, добившиеся в своей деятельности в области науки и техники выдающихся результатов мирового уровня. Это создатель принципиально новых видов транспортной техники Ростислав Евгеньевич Алексеев, имя которого носит университет, основоположник теории связи, создатель новых направлений в теоретической радиотехнике и радиотехнического факультета профессор Дмитрий Васильевич Агеев, создатель атомной энергетики и физико-технического факультета Игорь Иванович Африкантов, создатель новой техники, полярный исследователь Аркадий Федорович Николаев.

Далее рассматривается педагогическая и учебно-методическая деятельность профессора Д.В. Агеева, существенно дополняющая его выдающуюся научную деятельность. Сначала кратко о ней. Фундаментальные научные результаты теоретических исследований были получены Д.В. Агеевым в далекие предвоенные годы. Основы теории связи студент Д. Агеев изложил в дипломной работе и в статье [1] в 1935 году. Как отмечено в книге [2], частично эти результаты американские ученые Л.А. Заде и К.С. Миллер [3] получили в 1952 году. Пропускную способность канала связи аспирант Д.В. Агеев определил в 1938 году [4] за 10 лет до работ американских ученых К.Е. Шеннона [5] и Н. Винера [6] .В 1940 году кандидат технических наук Д.В. Агеев разработал теорию групповой передачи сигналов. Приоритет в этих вопросах принадлежит России, профессору ГПИ им. А.А. Жданова (НГТУ) Д.В. Агееву.

Дмитрий Васильевич Агеев – ученый в самом высоком смысле этого слова.
Теоретические научные исследования были его главным делом. Ежедневно все свое свободное от работы время, в том числе выходные и отпуск, он посвящал этому любимому делу. В нем плодотворно сочетались глубокое проникновение в физику явлений и прекрасное владение математическим аппаратом для их описания и анализа. Неиссякаемое стремление познать непознанное, неустанный труд, искра божия таланта, могучий интеллект, всепроникающая глубина анализа и неумолимая логика, широчайшая эрудиция позволили Дмитрию Васильевичу создать и развить 10 направлений в теоретической радиотехнике, выбирать интересующую его проблему и с нуля доводить ее решение до нужного для практики результата. Он был полностью лишен тщеславия, главным для него был результат исследования, а не его публикация. Закончив одно исследование, он сразу брался за другое.

Понимая необходимость передачи своих колоссальных знаний и опыта другим, Дмитрий Васильевич для этого уникальный не примененный ни одним из ученых способ. В течение 13 лет еженедельно или раз в две недели он читал лекции для аспирантов, преподавателей и радиоинженеров города, для всех желающих, в которых излагал новые полученные им результаты. Всего бы-

ло прочитано более 250 лекций. Это был мастер-класс высочайшего научного уровня, школа творчества, научного поиска, логики научного исследования. С каждой лекцией слушатели поднимались вверх по лестнице знаний. Они поражались и восхищались оригинальностью решения сложных задач, доступностью изложения, ясным физическим смыслом полученного результата. У них возникало и крепло желание заниматься научной работой и ,естественно, иметь научным руководителем Дмитрия Васильевича. К нему устремился поток аспирантов-заочников и соискателей из НИИ и предприятий города. В итоге 55 его учеников защитили кандидатские диссертации, а 14 из них затем и докторские. В НИИ и на предприятиях работали по 4-5 учеников профессора Д.В. Агеева, в том числе доктора наук. В Горьком сформировалась научная школа Д.В. Агеева в области радиотехники, охватывающая в отличие от научных школ других ученых большое число развитых им направлений.

Ученики и не только они считали Дмитрия Васильевича гением. В науке и технике эта неофициальная характеристика относится к людям, получившим результаты мирового уровня, кажущиеся ошибочными, неприемлемыми, выходящими за рамки общепринятых представлений. Писатель С. Цвейг утверждал: «Прекрасна истина, кажущаяся неправдоподобной». Такие истины представил миру Р.Е. Алексеев. А.С. Пушкин написал об этом так.

О сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух
И опыт, сын ошибок трудных
И гений, парадоксов друг

Дмитрий Васильевич доказал парадоксальную теорему, на первый взгляд противоречащую здравому смыслу. Теорема не была понята и принята учеными, когда автор изложил ее в Москве на Всесоюзной научной сессии. Лишь спустя 15 лет ученые подтвердили ее в двух книгах.

Студент-третьекурсник Д. Агеев опубликовал математическую статью [7], которая была упомянута в книге об успехах математики за 20 лет советской власти. Учась на 4 курсе, он совместно с доцентом (впоследствии академиком) Ю.Б. Кобзаревым опубликовал статью [8], открывшую новое направление – исследование переходных процессов. Рассмотренная выше дипломная работа была официально признана ГЭК выдающейся, Д. Агеев был премирован.

Подготовка научно-педагогических кадров, создание факультета

В 1949 году доктор технических наук Д.В. Агеев выбрал в качестве места работы Горьковский индустриальный институт. В нем специальность и кафедра «Радиотехника» были на электротехническом факультете, из преподавателей только один В.Я. Сморгонский имел степень кандидата технических наук. Дмитрий Васильевич возглавил кафедру и начал работу по подготовке научных кадров. Была организована аспирантура по радиотехническим специальностям, началось издание научных трудов, регулярное проведение научных семинаров. Был резко увеличен объем научной работы, вырос ее уровень. Совету электротехнического факультета под председательством профессора Д.В. Агеева было предоставлено право присуждения степени кандидата технических наук. Первая защита диссертации, подготовленной самостоятельно Г.В. Глебовичем, состоялась в 1951 году. Свои новые идеи и научные результаты Дмитрий Васильевич щедро раздавал аспирантам-выпускникам института и соискателям-преподавателям. Каждому из них он отдал частичку своего таланта, он помогал довести идеи до завершения. Он отказывался от совместных с учениками публикаций, доверяя им самостоятельно публиковать полученные под его руководством результаты. Наибольшее внимание и поддержку он оказал первым из них: Ю.С. Лезину, В.В. Маланову, Л.А. Моругину. В дальнейшем они стали докторами наук и заведующими кафедрами, кроме того Ю.С. Лезин – ректором института, а В.В.Маланов – проректором по научной работе.

В 1952 году по настоянию профессора Д.В. Агеева был восстановлен радиотехнический факультет. Он был учрежден еще в 1936 году, но в 1938 году преобразован в специальный факультет, а в 1947 – в электротехнический. Потребность в радиоинженерах была велика, на электротехническом факультете были 2 группы «электриков» и в 1950 году 6, а в 1951 – 8 групп «ра-

дистов». На возрожденном факультете из разросшейся кафедры радиотехники выделились две новые кафедры: радиоприемных устройств (зав.кафедрой профессор Д.В. Агеев) и радиопередающих устройств (зав.кафедрой доцент В.Я. Сморгонский). С 1955 года по 1959 профессор Д.В. Агеев был деканом факультета. Со времени восстановления радиотехнический факультет является самым большим в институте, сейчас это относится к ИРИТу в университете.

Из 55 подготовленных под научным руководством профессора Д.В. Агеева кандидатов технических наук 32 – преподаватели кафедр факультета. Из них в дальнейшем 7 стали докторами наук и 5 – заведующими кафедрами. Тем самым Дмитрий Васильевич внес самый существенный вклад в становление и развитие радиотехнического факультета. В течение примерно 30 лет он сам и его ученики определяли уровень научной и учебно-методической работы, который непрерывно повышался. По значению новых научных идей и изобретений, по количеству и качеству научных работ, по числу монографий и учебных пособий, выпущенных центральными издательствами большими тиражами, по квалификации научно-педагогических кадров, по качеству подготовки радиоинженеров наш факультет (институт) стал в один ряд со старейшими радиотехническими факультетами страны.

Теория и активный метод лекционного обучения студентов технических вузов

Заведующий кафедрой, ведущий лектор двух радиотехнических дисциплин профессор Д.В. Агеев имел многолетний опыт преподавания в вузах страны. Гениальные люди гениальны во всем. Он понимал, в чем состоят недостатки существующей системы обучения, которую был вынужден использовать он сам. Он не мог остаться равнодушным к этому и направил свои творческие способности, интеллект и эрудицию на совершенствование системы обучения. Этой творческой работой профессор Д.В.Агеев занимался более 10 лет. К развитой им теории обучения относятся исследования, позволяющие получить научно обоснованные ответы на многие важные для обучения вопросы. В частности, что такое эффективность обучения, каковы объективные критерии ее качественной и количественной оценки, что такое метод обучения, как влияет выбор важнейших целей обучения и другие. На основе теории профессор Д.В. Агеев разработал активный метод лекционного обучения студентов технических вузов [9]. В существующей системе лекция служит для понимания и в некоторой мере запоминания изучаемого материала с оценкой на экзамене. При использовании активного метода цели обучения таковы. Во-первых, научить студентов самостоятельно изучать материал по учебникам и книгам, а не получать его от лектора в «разжеванном» виде. Во-вторых, научить творчески мыслить, то есть применять знания с использованием учебников и книг для решения творческих задач. Лекция служит для решения таких задач с помощью лектора с пояснением всей последовательности логических умозаключений, приводящих к решению. В конце каждой лекции проводится контрольная работа, в течение 15-20 минут все студенты потока решают одну творческую задачу. На следующей лекции рассматривается правильное решение контрольной задачи. Работы проверяются и оцениваются. В случае неявки студент получает нулевой балл. Окончательная оценка определяется как среднее между средним баллом за контрольные работы и баллом за экзамен. На экзамене все студенты группы в течение полутора часов решают две одни и те же задачи, одну творческую, другую с преобладанием фактического материала. Для реализации такого оптимального варианта активного метода требуется увеличение времени на самостоятельную работу студентов и сокращения времени лекций. Пока этого перераспределения времени нет, используется несколько упрощенный квазиоптимальный вариант метода. Только половина фактического материала дисциплины изучается студентами самостоятельно, наиболее важная часть изучается на лекции. На лекции решается одна творческая задача. Контрольные работы и экзамен проводятся как и при оптимальном варианте.

Активный метод лекционного обучения имеет следующие несомненные преимущества. Цели обучения соответствуют требованиям будущей работы студентов. В полной мере реализуются самостоятельность, активность и систематичность работы студентов, почти стопроцентным становится посещение лекций. Создается постоянная обратная связь между студентами и лекто-

ром, возможность воспитательного действия на студентов. Постоянно решая задачи, студенты фактически готовятся к экзамену, приобретают уверенность в своих силах, экзамен проходит в спокойной обстановке.

В течение 4 лет профессор Д.В.Агеев при чтении лекций по курсу «Усилительные устройства» в порядке эксперимента применял квазиоптимальный вариант активного метода обучения в учебном потоке из 5 групп. За семестр студенты выполняли 33 контрольные работы и решали 2 задачи на экзамене. Все преимущества нового метода были полностью подтверждены на практике.

Дмитрий Васильевич в центральных журналах опубликовал две статьи о разработанном им активном методе лекционного обучения [10, 11]. В 1984 году он прочел для преподавателей вузов города курс лекций объемом 40 часов на тему «Проблемное обучение и активный лекционный метод». Созданную им теорию и разработанный на ее основе активный метол обучения профессор Д.В.Агеев подробно изложил в подготовленной к изданию рукописи монографии [9]. В качестве эпиграфа к ней взято имеющее глубокий смысл утверждение «Примененье – мать ученья», созвучное общеизвестному. В рукописи приведены доказательства того, что эффективность разработанного активного метода является наиболее высокой по сравнению с другими принципиально возможными методами обучения. В ней дан детальный анализ результатов практического применения нового метода, приведены статистические данные об оценках контрольных работ и экзаменов 400 студентов. Приведены также результаты проведенной дискуссии, то есть самые острые вопросы и критические замечания, высказанные при обсуждении рукописи, и ответы автора на них. На подробный автореферат рукописи монографии были получены положительные отзывы заведующих кафедрами вузов городов Москвы, Ленинграда, Минска, Харькова, Одессы, Горького. В отзывах отмечалось соответствие активного метода требованиям по повышению качества подготовки молодых специалистов и желательность скорейшего опубликования монографии. Дмитрий Васильевич предвидел и ощутил на себе трудности внедрения нового метода. Любая хорошая теория может быть дискредитирована плохой практикой ее осуществления.В данном случае препятствиями, которые необходимо преодолеть, являются психологический барьер – установившаяся традиция, отсутствие задачников с детальным рассмотрением методов решения творческих задач, недостаток времени для самостоятельной работы студентов.

К сожалению, профессор Д.В. Агеев не смог опубликовать монографию. В 1988 году кафедра радиоприемных устройств была расформирована и профессор Д.В. Агеев был вынужден уйти на пенсию.

Кафедра «Радиоприемные устройства»

Со времени создания кафедры 36 лет профессор Д.В. Агеев был заведующим кафедрой, а все преподаватели были его учениками. С начала семидесятых годов прошлого века в течение многих лет это была единственная в институте кафедра, все преподаватели которой имели ученые степени. В дальнейшем 4 преподавателя из 8 в указанной последовательности стали профессорами: В.Ф. Рябков, А.В. Зенькович, В.Н. Ногин, Н.Б. Догадин. Последний начал работу на кафедре в должности лаборанта.

На кафедре активно проводилась научная работа. ее результаты имели признание в нашей стране и за рубежом. В первую очередь это фундаментальные результаты теоретических исследований профессора Д.А. Агеева. Некоторые из них были доведены до внедрения в ходе хоздоговорных работ, проводимых на кафедре под его руководством. В центральных издательствах вышли в свет 5 научных монографий сотрудников кафедры, было сделано 10 докладов на пленарных заседаниях Всесоюзных конференций. Было опубликовано более 260 научных статей, получено 107 авторских свидетельств на изобретения [12].

На международных зарубежных конференциях сотрудниками кафедры было сделано 7 докладов, частично опубликованных в трудах конференций. Разработанные на кафедре приборы демонстрировались на международных выставках в Москве и Женеве. Начиная с 1977 года, кафедра под руководством профессора Д.В. Агеева провела на базе ГПИ четыре Всесоюзных конференции по новой технике радиоприемных устройств. Автор данной статьи с 1978 по1988 год был органи-

затором и научным руководителем тематического семинара «Измерения в технике радиоприема», проводимого 2 раза в год в Москве в павильоне «Физика» АН СССР. Уникальным является годовой экономический эффект внедрения результатов его докторской диссертации. В радиоизмерительной отрасли (15 типов серийно выпускаемых приборов) и в отрасли радиовещания (11 разработанных на кафедре установок) он в соответствии с актами внедрения составил 10,6 млн рублей, то есть в современных ценах около 1 млрд. рублей. Разработанные автором статьи методы были включены в программу дисциплины «Электрорадиоизмерения» для вузов по специальности «Радиотехника».

Выдающимся результатом учебно-методической работы профессора Д.В. Агеева является создание им теории обучения, разработка на ее основе активного метода лекционного обучения студентов технических вузов, его практическое применение в течение 4 лет, подтвердившее все преимущества нового метода. Дмитрий Васильевич был ведущим лектором дисциплин «Радиоприемные устройства» и «Усилительные устройства», он написал два 100-страничных учебных пособия для спецкурсов по ним. Преподавателями кафедры по этим дисциплинам были написаны соответствующие программам учебные пособия, опубликованные центральными издательствами большими тиражами (1972 год – 30000 экз., 1992 – 3600 экз.). Тиражом 40000 экз. в 1985 году было издано учебное пособие по электрорадиоизмерениям, в которое со ссылкой на автора вошли разработанные на кафедре методы измерения. В дальнейшем по этой дисциплине в институте был издан комплекс учебно-методических материалов объемом 23 печатных листа. В связи с наличием в городе головного приборостроительного института страны лаборатория радиоизмерений кафедры по глубине охвата тем дисциплины и числу используемых студентами приборов существенно превосходила аналогичные лаборатории всех вузов. По всем дисциплинам кафедры было издано 17 внутривузовских пособий объемом 5 и более печатных листов.

Изложенные выше результаты научной и учебно-методической работы кафедры под руководством профессора Д.В. Агеева в значительной мере обеспечивали факультету в течение многих лет первое место среди факультетов института.

Выводы

Выдающиеся результаты педагогической и учебно-методической деятельности профессора Д.В. Агеева состоят в следующем.

1. Уникальная подготовка научно-педагогических кадров – 32 преподавателей факультета, в том числе в дальнейшем 7 докторов наук, из которых 5 заведовали кафедрами. По существу это создание факультета, выведение его в один ряд со старейшими радиотехническими факультетами страны.

2. Создание теории обучения, разработка на основе нее активного метода лекционного обучения студентов технических вузов. Практическое применение нового метода в течение 4 лет, подтвердившее все его преимущества перед известным. Подготовка рукописи монографии с подробным изложением всех полученных результатов, заслужившей много положительных отзывов.

3. Активное личное участие и руководство кафедрой, имевшей самые высокие результаты в научной и учебно-методической работе. Эти результаты в значительной мере обеспечивали факультету в течение многих лет первое место среди факультетов института.

Библиографический список

1. Агеев, Д. В. Основы теории линейной селекции / Д.В. Агеев // Науч.-техн. сб. Ленингр. электротехн. ин-та связи.-1935.-№ 10.
2. Быховский, М.А. Пионеры информационного века / М.А. Быховский //История развития теории связи. Сер. История электросвязи и радиотехники. М.: ЗАО «РИЦ» «Техносфера», 2006. – 376с.
3. Zade L.A., Miller K.S. Fundamental Aspects of Multiplexing. Proc. IRE, 1952, №9.
4. Агеев, Д.В. Теория селекции и проблема пропускной способности «эфира» / Д.В. Агеев // НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - Н.Новгород, 2017. – 231с.
5. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication //BSTJ, 1948, № 3.
6. Wiener N. Cybernetics.-N.Y.: Wiley, 1948.
7. Агеев, Д.В. Обобщение метода Ньютона вычисления корней уравнения / Д.В. Агеев // Науч.-техн. сб. Ленингр. электротехн. ин-та связи. - 1934, №4-5.
8. Агеев, Д.В., Кобзарев, Ю.Б. О переходных процессах в резонансном усилителе / Д.В. Агеев, Ю.Б. Кобзарев // Журнал технической физики - 1935. - Т. 5, Вып. 8
9. Агеев, Д.В. Активный метод лекционного обучения студентов технических вузов / Д.В. Агеев // -146 с. (Рукопись, архив кафедры)
10. Агеев, Д.В. Активный лекционный метод / Д.В. Агеев // ЭКО - 1983. №1. С. 149-153.
11. Агеев, Д.В. Внимание – активный метод / Д.В. Агеев // Студенческий меридиан. 1984. № 3.
12. Ногин, В.Н. Ранняя история радиофакультета и история кафедры «Радиоприемные устройства» Горьковского политехнического института (ныне НГТУ) / Ногин В.Н. // История разработок и производства радиоэлектронных средств с 1915 года на предприятиях Нижнего Новгорода. Под ред. Е.Л. Белоусова, Б.Д. Увяткина, В.Л. Ягодкина - Н.Новгород. 2001. С. 397-421.

A.V. Zenkovich

OUTSTANDING RESULTS OF PROFESSOR D.V. AGUEEV'S EDUCATIONAL AND METHODICAL WORK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Professor D.V. Agueev had trained 32 candidates of science (Ph.D.) – lecturers of department. Later seven of them became Doctors of Science and five got chairs in radio engineering. In fact he created the radio engineering department and made it comparable with the best departments of the country. Professor D.V. Agueev also created the theory of education, he developed the active method of delivering lectures and applied it practically for 4 years. His chair took the leading position at the institute.

Key words: training of personnel, creating of department, active method of education, leading chair.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
ИСТ-2018

ТРУДЫ
XXIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Ответственный за выпуск: директор ИРИТ **А.В.Мякиньков**
Редактирование и компьютерная верстка: **В.П.Хранилов**

Подписано в печать 31.03.18. Формат CD.
Электронное издание. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 81,0. Уч.-изд. л. 75,56. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Институт радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ
Адрес университета:
603950, Нижний Новгород, ул.Минина, 24.