

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (97)

Нижний Новгород 2012

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2012. № 4 (97). – 377 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора),
Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора), В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор)
Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев, О.М. Власова,
В.В. Глебов, А.М. Грошев, А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, О.С. Кошелев, В.Ф. Кулепов,
А.А. Куркин, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов, В.П. Хранилов,
С.Н. Хрунков, Е.А. Чернышов, В.М. Галкин

УДК 050(06)
ББК 9я54

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2012

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

TRANSACTIONS
of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

№4 (97)

Nizhni Novgorod 2012

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2012. № 4 (97). – 377 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD:

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina
(Executive Editor), T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor)
Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, O.M. Vlasova,
V.V. Glebov, A.M. Groshev, A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, O.S. Koshelev, V.F. Kulepov,
A.A. Kurkin, I.O. Leushin, M.G. Mikhalenko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,
S.V. Khvatov, Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

Electronic version of the journal:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Nizhni Novgorod State Technical University
n.a. R.Y. Alexeev, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Катин С.В., Кашин А.В., Козлов В.А., Кунилов А.Л. Потенциальная помехоустойчивость станций ближней радиолокации с СШП-шумовыми сигналами.....	11
Рудоясова Л.Г., Шишков Г.И., Щербakov В.В. Тонкие резистивные пленки в устройствах СВЧ и КВЧ.....	21
Агашин О.С., Корелин О.Н. Методы цифровой обработки речевого сигнала в задаче распознавания изолированных слов с применением сигнальных процессоров.....	32
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	45
Пелиновский Д.Е., Гиниятуллин А.Р., Панфилова Ю.А. О решениях упрощенной модели динамической эволюции контактных линий.....	45
Асеева Н.В., Громов Е.М., Тютин В.В. Стабилизация солитонов в средах с пространственным вынужденным рассеянием Рамана и пропорциональными неоднородностями дисперсии и нелинейности.....	61
Зайцев А.И., Костенко И.С., Леоненков Р.В., Кузнецов К.И., Гиниятуллин А.Р., Панфилова Ю.А. Организация натуральных наблюдений поверхностного волнения в прибрежной зоне о. Сахалин.....	74
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	83
Викулов А.В., Кочешков А.А. Анализ и моделирование динамических свойств информационных систем.....	83
Бронфельд Г.Б. Некоторые возможности формального представления структуры знаний.....	91
Базин А.С. Автоматизированное тестирование программных комплексов.....	101
Шапошников Д.Е., Ушакова М.Н. Моделирование электрических распределительных сетей на основе концепции иерархических распределенных канальных систем.....	111
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	117
Медунецкий В.М., Солк С.В. Проектирование как исходный процесс обеспечения качественных показателей наукоёмких и высокотехнологичных изделий.....	117
Кабалдин Ю.Г., Крегинин О.В., Серый С.В., Шатагин Д.А. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании.....	123
Кабалдин Ю.Г. Квантовая модель трещинообразования в металлических материалах при усталостном нагружении.....	133
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	142
Кольцов В.А., Лотов В.Н., Победоносцев А.Б., Тимофеев А.В. Автоматизация перегрузки топлива ядерного реактора на быстрых нейтронах.....	142
Бирюков В.В., Грачев В.А. Применение методов теории цепей для решения задачи о возбуждении щелевой антенны.....	150
Варенцов А.В., Зяблицев Д.В., Пронин А.Н., Легчанов М.А., Шипов Д.Л. Исследования локальной гидродинамики и межъячейкового массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR.....	160

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	168
Корчажкин М.Г., Кузьмин Н.А., Кустиков А.Д. Совершенствование нормативов технической эксплуатации городских автобусов.....	168
Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Галкин Д.А., Зайцев А.С., Зезюлин, В.С. Макаров Д.В. Экспериментальные исследования поворота многоосных колесных машин...	175
Огороднов С.М., Синичкин С.Г. Расчет усилителя рулевого управления с шаговым электрическим двигателем для транспортных средств.....	182
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	192
Васильев В.А., И.Д. Романов, Е.А. Романова, Романов А.Д. История развития подводных лодок с воздухознезависимыми энергоустановками в России и СССР.....	192
Роннов Е.П., Анисимова В.В. Особенности архитектурно - конструктивного типа и их учет при оптимизации обстановочных судов внутреннего плавания.....	202
Захаров И.Л., Химич В.Л., Тарасов А.Н., Захаров Л.А. Повышение технических показателей перспективного поршневого многотопливного ДВС с переменной степенью сжатия на ранней стадии проектирования.....	207
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	214
Дарьенков А.Б., Плехов А.С. Информационный подход к разработке интеллектуальных систем управления энергосберегающими электроприводами.....	214
Анисимов С.А., Лоскутов А.Б., Полозов И.В., Смирнов А.И., Соснина Е.Н. Разработка протокола маршрутизации в распределенных энергетических гридах следующего поколения.....	224
Алтунин Б.Ю., Карнавский И.А., Кралин А.А. Имитационная модель системы управления статком для симметрирования сетевых токов.....	232
Соснина Е.Н., Маслеева О.В. Оценка шумов воздействия трансформаторной подстанции 10/04 кВ на окружающую среду.....	237
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	242
Изотов В.А., Акутин А.А., Федулова Ю.С. Практическое опробование методики расчета дождевой литниковой системы для алюминиевых сплавов.....	242
Кечин В.А., Киреев А.В. Исследование коррозионных и электрохимических свойств алюминиевых протекторных материалов с различным содержанием водорода.....	248
Астащенко В.И., Швейв А.И., Родькин И.М., Швейва Т.В., Родькина А.В. Подготовка деталей автомобиля из легированной стали к холодной пластической деформации	256
Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Петрова Н.В., Журавлев А.Ф., Моляков А.А. Некоторые вопросы и особенности применения металлофосфатных смесей для получения отливок из черных металлов и сплавов.....	262
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	266
Рогожин В.В., Ананьева Е.Ю., Бенсон В.В., Михаленко М.Г. Повышение работоспособности цитратного электролита никелирования.....	266
Элькинд К.М., Трунова И.Г. Связь гидратации с явлениями переноса в водных растворах электролитов.....	272

Волков В.В., Бильдюкевич А.В., Филиппов А.Н., Воротынцев И.В., Дибров Г.А., Усоский В.В., Касперчик В.В., Василевски В.П., Новицкий Э.Г. Композиционные половолоконные мембраны с диффузионными слоями из политриметилсилпропи- на.....	280
Воротынцев А.В., Кодомцева А.В. Получение высокочистого метилсилана при взаимодействии метилтрихлорсилана с гидридом бария.....	287
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	293
Корнилов Д.А. Эффективное стратегическое управление бизнесом с учетом экспресс оценки стоимости бизнеса	293
Яшин С.Н., Лебедев Ю.А., Кошелев Е.В., Купцов А.В. Формирование экономического механизма постепенного обновления парка оборудования компании.....	305
Иванов А.А., Иванова Н.Д. Особенности применения ACTIVITY-BASED COST SYSTEM И BALANCED SCORECARD на российских предприятиях.....	314
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	321
Фоменков А.А. Советские славянофилы и национал-большевики – две группировки «русской партии» в период застоя: общее и различия.....	321
Смирнов Ю.В., Малов С.В. Реализм в философии и методологии истории: проблема реконструкции объекта.....	328
Багаев А.В. Организация жизни общества.....	336
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	342
Валетов В.А., Медунецкий В.В. Характерные особенности формирования функциональных поверхностей пресс-форм на электроэрозионном оборудовании для изготовления конструкционных элементов приборов.....	342
Вавилов В.Д. Датчик угловых перемещений на основе гигантского магниторезистивного эффекта.....	347
Долгов А.Н. Анализ применимости фильтров низких частот в микроэлектромеханических системах.....	353
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	358
Елисеев М.Е., Пронин Д.М., Репников А.А., Сангалова М.Е. Томчинская Т.Н. Подсистема анализа очагов интерактивной карты аварийности.....	358
Кузнецов А.А., Пермяков С.А. О естественной нормализации диаграммы ритма сердца.....	363
Кривонос Л. Н., Лукьянов В.А. Экстремальные кривые в 4-мерном пространстве конформной связности.....	369

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Katin S.V., Kashin A.V., Kozlov V.A., Kunilov A.L. Potential interference resistance close radars with UWB-noise signals.....	11
Rudojasova L.G., Shishkov G.I., Sherbakov V.V. Fine rezistivnye films in device SVF and KVF.....	21
Agashin O., Korelin O. General methods of digital processing of the speech signal in case of isolated words recognition problem.....	32
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	45
Pelinovsky D.E., Giniyatullin A.R., Panfilova Y.A. On solutions of a reduced model for the dynamical evolution of contact lines.....	45
Aseeva N.V., Gromov E.M., Tyutin V.V. Soliton's stabilization in media with spatial stimulated raman scattering and proportional inhomogeneous of dispersion and self - phase modulation.....	61
Zaitsev A.I., Kostenko I.S., Leonenkov R.V., Kuznetsov K.I., Giniyatullin A.R., Panfilova Y.A. Organizing in situ measurments of surface waves in the coastal zone of sakhalin island.....	74
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	83
Vikulov A.V., Kocheshkov A.A. Analysis and modelling of informational systems dynamical properties.....	83
Bronfeld G. Opportunities of formal representation for knowledge structure.....	91
Bazin A.S. Automated testing of software systems.....	101
Shaposhnikov D.E., Ushakova M.N. Electrical distribution networks modelling based on the concept of hierarchical distribution channel system.....	111
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	117
Medunetskiy V.M., Solk S.V. Designing as initial process of providing quality indicators of scientific and hi-tech products.....	117
Kabaldin G., Kretinin O.V., Sery S.V., Shatagin D.A. Nanostructuring contact surface carbide tools in cutting.....	123
Kabaldin J.G. Quantum model of cracking in metal materials when fatigue loading.....	133
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	142
Koltsov V.A., Lotov V.N., Pobedonostsev A.B., Timofeev A.V. Automation of refueling procedure of fast-neutron reactor.....	142
Birukov V., Grachev V. Solving problem of excitation slot antennas using circuit theory...	160
Varentsov A.V., Zyablitshev D.V., Pronin A.N., Legchanov M.A., Shipov D.L. Investigation of local hydrodynamics and intercellular mass transfer around guide channels of pwr reactors fuel assemblies.....	160

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	168
Korchazhkin M.G., Kuzmin N.A., Kustikov A.D. Improvement of normatives of technical operation of city buses.....	168
Barakhtanov L.V., Belyakov V.V., Galkin D.A., Zaytsev A.S., Zezyulin D.V., Makarov V.S. Experimental investigations of rotation of multi-axis wheeled vehicles.....	175
Ogorodnov S., Sinichkin S. Design of vehicle's steering booster with stepper electric motor.....	182
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	192
Vasiliev V.A., Novels I.D., Romanov E.A., Romanov A.D. History of development of submarines with airindependent power installations in russia AND THE USSR.....	192
Ronnov E.P., Anisimova V.V. Features architecturally-constructive type and their account by optimization of inland-waterway vessels for placing and maintenance of facilities of navigation equipment.....	207
Zakharov I.L., Khimich V.L., Tarasov A.N., Zakharov L.A. Improving performance technical perspective piston multifuel engine with variable compression ratio at an early stage...	207
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	214
Darienkov A.B., Plehov A.S. Information approach to development intellectual managerial system energy economy electrical drive.....	214
Anisimov S.A., Loskutov A.B., Polozov I.V., Smirnov A.I., Sosnina E.N. Routing protocol development in the distributed next generation electrical power grid.....	224
Altunin B.U., Karnavskiy I.A., Kralin A.A. Simulation model of statcom's system control for balancing the current network.....	232
Sosnina E.N., Masleeva O.V. The noise impact assessment of transformer substation 10/04 kV to environment.....	237
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	242
Izotov V. A., Akutin A. A., Fedulova Y. S. The practical testing of executable sizes calculation methodology of shower gate for alu alloy.....	242
Kechin V.A., Kireev A.V. Study of the corrosion and electrochemical properties of aluminum, the tread material with different hydrogen content.....	248
Astashchenko V.I., Shveev A.I., Rodkin I.M., Shveeva T.V., Rodkina A.V. Preparation of the alloyed steel for cold plastic deformation of details of the car.....	256
Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Petrova N. V., Zhuravlev A.F., Molyakov A.A. Some questions and features of application of metalphosphatic mixes for receiving otlivok from ferrous metals and alloys.....	262
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	266
Rogozhin V.V., Ananieva E.Y., Benson B.B., Mikhalenko M.G. Improving the efficiency citric electrolyte nickel plating.....	266
Elkind K.M., Trunova I.G. Communication hydration of transport phenomena in aqueous electrolyte solution.....	272
Volkov V.V., Bildukevich A.V., Filippov A.N., Vorotyntsev I.V., Dibrov G.A., Usoskiy V.V., Kasperchik V.P., Vasilevsky V.P., Novitsky E.G. Composite hollow fiber membranes with diffusion layers from poly[1-(trimethylsilyl) 1-propyne].....	280

Vorotyntsev A.V., Kadomtceva A.V. Obtaining high purity methylsilane interaction methyltrichlorosilane with barium hydride.....	287
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	293
Kornilov D.A. Effective strategic business management and estimation of cost.....	293
Yashin S.N., Lebedev Yu.A., Koshelev E.V., Kuptsov A.V. Formation of the economic mechanism of gradual updating of company's equipment park.....	305
Ivanov A.A., Ivanova N.D. Activity-based cost system and balanced scorecard application peculiarities on the russian enterprises.....	314
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	321
Fomenkov A.A. Soviet slavophiles and national-bolsheviks – two groups of «russian party» during stagnation period: the general and the difference.....	321
Smirnov Y.V., Malov S.V. Realism in philosophy and methodology of history: problem of object reconstruction.....	328
Bagaev A.V. The organization of life society.....	336
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	342
Valetov V.A., Medunetskiy V.V. Special features of forming functional surfaces of molds using electric discharge equipment for devices constructional elements manufacturing	342
Vavilov V.D. Sensor of the angular displacement on base gigantic magnitoresistiv effect....	347
Dolgov A.N. Application notes for low-pass filters in mems.....	353
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	358
Eliseev M. E., Repnikov A. A., Pronin D. M., Sangalov M.E., Tomchinskaya T. N. Sub-system of the analysis of centers of the interactivemap of traffic accidents.....	358
Kuznetsov A.A., Permjakov S.A. About natural normalization of the l.heart rhythm diagram.....	363
Krivososov L.N., Lukianov V.A. Extreme curves on 4-dimentional conformally connected space.....	369

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.396.96

С.В. Катин, А.В. Кашин, В.А. Козлов, А.Л. Кунилов

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СТАНЦИЙ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ С СШП-ШУМОВЫМИ СИГНАЛАМИ

Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова

Исследована потенциальная помехоустойчивость СШП-шумовых РЛС с обработкой сигналов взаимно-корреляционным методом и методом двойного спектрального анализа при воздействии широкого класса активных преднамеренных и непреднамеренных помех. Получены численные оценки коэффициентов подавления для рассматриваемых видов активных помех и определены наиболее опасные из них.

Ключевые слова: СШП-шумовые РЛС, активные помехи, помехоустойчивость, компьютерное моделирование.

Введение

Сложность электромагнитной обстановки, обусловленная расширением номенклатуры используемых излучающих радиоэлектронных средств (РЭС), а также совершенствованием технических средств и методов ведения радиоэлектронной борьбы (РЭБ), приводит к необходимости поиска новых принципов построения радиолокационных систем, обладающих высокой скрытностью, электромагнитной совместимостью (ЭМС), помехоустойчивостью и информативностью.

Одним из перспективных направлений построения РЛС ближнего обнаружения с подобными характеристиками является применение СШП-шумовых сигналов, обеспечивающих потенциальную возможность однозначных и высокоточных измерений дальности и скорости объектов. Согласно существующему определению, к СШП-сигналам относятся такие сигналы, отношение ширины спектра которых к центральной частоте спектра превышает 0,25 [1]. Обработка шумовых СШП-сигналов в РЛС может осуществляться как взаимно-корреляционным методом (ВКО), так и методом двойного спектрального анализа (ДСА) [2].

Метод ВКО основан на сравнении в каналах дальности коррелятора отражённого сигнала с задержанной копией зондирующего сигнала и является традиционным при создании оптимальных приёмников большинства типов РЛС с узкополосными сигналами.

Метод ДСА построен на принципе измерения спектра модуляции спектра суммарного сигнала передатчика и отражённого сигнала. Первые публикации по данному принципу относятся к середине 60-х годов прошлого века, когда была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность обработки шумоподобных сигналов методом ДСА [2]. Предложенный метод получил дальнейшее развитие в работах, посвящённых оценкам точностных и энергетических характеристик РЛС, проблемам борьбы с отражениями от местных предметов, и т.д. [3-5]. В настоящее время в связи с развитием цифровой и микропроцессорной техники метод ДСА рассматривается как наиболее перспективный.

Несмотря на увеличение количества публикаций по тематике СШП-шумовой радиоло-

кации, в открытой печати отсутствуют сведения о завершённых разработках образцов РЛС. Осторожность в подходе к практическому применению данных сигналов в радиолокационной аппаратуре обусловлена, не в последнюю очередь, отсутствием информации о возможной потере её работоспособности при воздействии активных помех, создаваемых как излучающими СВЧ РЭС (РЛС, РРЛ, GPS, ГЛОНАСС, сотовая связь и т.д.), так и средствами радиоэлектронного противодействия (РЭП) в условиях ведения РЭБ.

Целью настоящей работы является представление результатов исследований потенциальной помехоустойчивости СШП-шумовых РЛС ближнего обнаружения, полученных в рамках решения задач обеспечения их ЭМС и РЭБ.

Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования для двух вариантов построения СШП-шумовых РЛС: с обработкой сигнала методом ДСА и методом ВКО. Ширина спектра шумового зондирующего сигнала составляла $\Delta f_0 = 0,3$ ГГц при центральной частоте $f_0 = 1$ ГГц, дальность до цели - $R = 5$ м. По результатам моделирования оценивались численные значения коэффициентов подавления для всех рассматриваемых видов помех (отношение помеха/сигнал на входе РЛС, при котором на выходе сигнал примерно равен помехе).

В качестве моделей сигналов излучающих СВЧ РЭС использовались:

- непрерывный шумовой сигнал (НШ) с $f_0 = 1$ ГГц и $\Delta F_{\text{НШ}} = 50$ МГц;
- импульсно-модулированный сигнал (ИМ) с несущей частотой $f_0 = 1$ ГГц, длительностью радиоимпульса $\tau_u = 1$ мкс и периодом следования $T_{\text{сл}} = 10$ мкс.

Предполагалось, что станция РЭП создаёт помехи следующего вида [6]:

- заградительная непрерывная шумовая помеха (НШП) во всей полосе СШП-шумовой РЛС;
- заградительная импульсно-шумовая помеха (ИШП) во всей полосе СШП-шумовой РЛС с длительностью импульса $\tau_u = 1$ мкс, периодом следования $T_{\text{сл}} = 10$ мкс;
- заградительная непрерывная ЧМ-помеха (ЧМП) с перестройкой частот по всему диапазону за время $T_{\text{ЧМ}} = 5$ мкс;
- ретранслированная помеха (РП) с задержкой зондирующего сигнала в станции РЭП на время $\tau_3 = 0,1$ мкс.

Для повышения достоверности получаемых результатов моделирование осуществлялось сериями по десять запусков в каждой.

СШП-шумовая РЛС с обработкой сигнала методом ДСА

Функциональная схема СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведена на рис. 1.

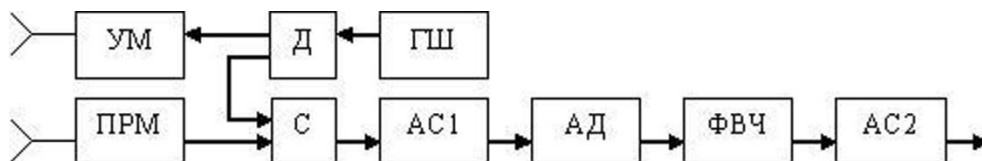


Рис. 1. Функциональная схема СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА

На схеме (рис. 1) приняты следующие обозначения: ГШ – задающий генератор шума; Д – делитель сигнала; УМ – выходной усилитель мощности передатчика; ПРМ – широкополосный приёмник; С – сумматор сигнала передатчика с выходным сигналом ПРМ; АС1 – анализатор спектра последовательного типа; АД – амплитудный детектор; ФВЧ – фильтр верхних частот; АС2 – анализатор спектра параллельного типа.

Метод ДСА основан на процедуре определения спектра модуляции спектра суммарного сигнала ГШ и отражённого сигнала на выходе сумматора С, реализуемой последовательным

АС1 и параллельным АС2 анализаторами спектра. Подробно принцип работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА рассмотрен в [5].

Разработанная на основе функциональной схемы рис. 1 структурная схема модели СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА представлена на рис. 2.

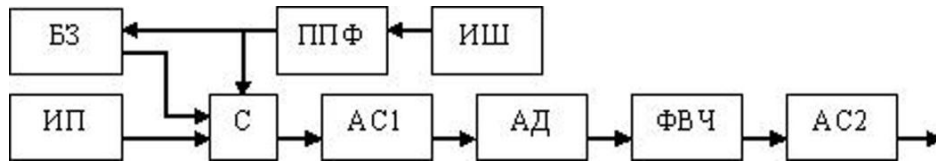


Рис. 2. Структурная схема модели СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА

На схеме рис. 2 приняты следующие обозначения: ИШ – источник нормального «белого» шума; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; БЗ – блок задержки; ИП – источник помех; С – сумматор; АС1 – анализатор спектра последовательного типа; АД – амплитудный детектор, ФВЧ – фильтр высокой частоты, АС2 – анализатор спектра параллельного типа.

Результаты моделирования, поясняющие метод ДСА, приведены на рис. 3.

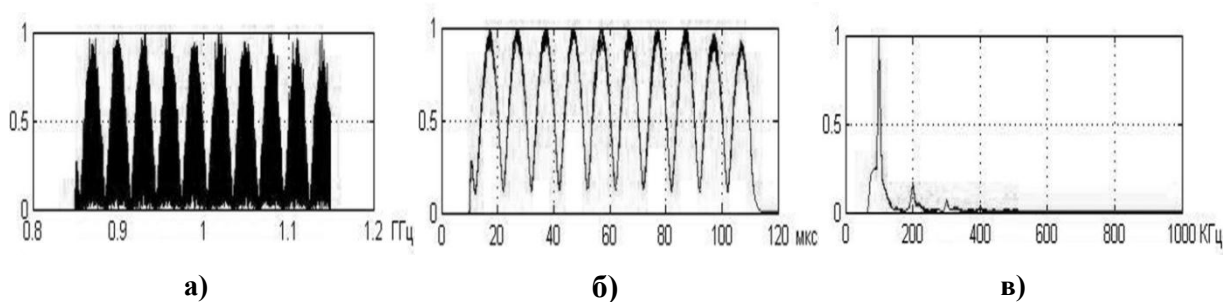


Рис. 3. Результаты моделирования:

a – спектр на выходе сумматора С; *б* – осциллограмма на выходе АД; *в* – спектр на выходе ФВЧ

Как видно на спектрограмме рис. 3, *a*, спектр суммарного сигнала сгруппирован относительно центральной частоты спектра зондирующего сигнала $f_0 = 1$ ГГц, при этом расстояние (период модуляции спектра) Δf_C между его максимумами составляет $\Delta f_C = 30$ МГц.

Осциллограмма рис. 3, *б* отражает перенос модуляции спектра суммарного сигнала из частотной области во временную с помощью последовательного анализатора спектра АС1 (перестраиваемого по частоте узкополосного фильтра) и последующее выделение огибающей с помощью АД. Время перестройки (анализа) АС1 T_A составляло $T_A = 100$ мкс.

На рис. 3, *в* приведён спектр колебания на выходе ФВЧ, регистрируемый параллельным анализатором спектра АС2. Частота этого колебания f_M определяется по формуле [2]

$$f_M = \frac{2RS_S}{c}$$

и для дальности $R = 5$ м и скорости перестройки $S_S = \Delta f/T_A = 3$ МГц/мкс составляет $f_M = 100$ кГц.

СШП-шумовая РЛС с обработкой сигнала методом ВКО

Функциональная схема СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведена на рис. 4.

На схеме (рис. 4) приняты следующие обозначения: ГШ – задающий генератор шума; Д – делитель сигнала ГШ; УМ – выходной усилитель мощности передатчика; ШЛЗ – широкополосная многоотводная линия задержки; ПРМ – широкополосный приёмник; МК – многоканальный коррелятор.

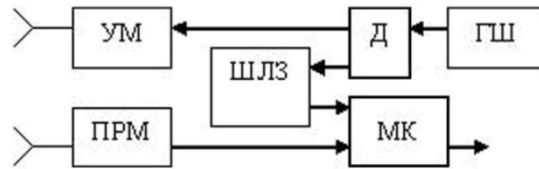


Рис. 4. Функциональная схема СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО

Метод ВКО основан на принципе определения взаимно-корреляционной функции отражённого и опорного сигналов, реализуемом многоканальным коррелятором.

Разработанная на основе функциональной схемы рис. 4 структурная схема модели СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО представлена на рис. 5.

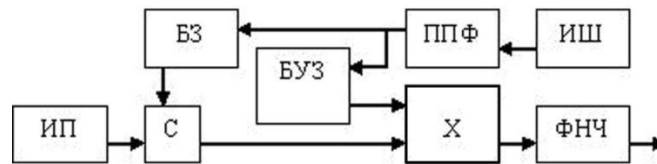


Рис. 5. Структурная схема модели СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО

На схеме (рис. 5) приняты следующие обозначения: ИШ – источник нормального «белого» шума; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; БЗ – блок задержки; ИП – источник помех; С – сумматор; БУЗ – блок управляемой задержки; Х – перемножитель, ФНЧ – фильтр низкой частоты.

При проведении моделирования исследовалась взаимно-корреляционная функция, полученная по результатам анализа напряжений на выходе каналов дальности МК.

Результаты моделирования, поясняющие метод ВКО, приведены на рис. 6.

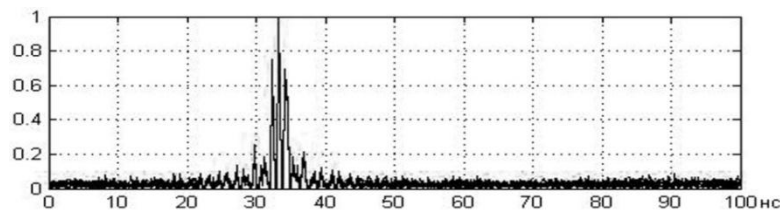


Рис. 6. График взаимно-корреляционной функции

Как видно на графике (рис. 6), на всём интервале задержек МК наблюдается только один корреляционный максимум, соответствующий каналу дальности $R = 5$ м.

Непрерывно-шумовая помеха (НШ) в полосе частот $\Delta F_{ш} = 50$ МГц

Данная модель помехи имитирует излучение РЭС типа РРЛ и станций сотовой связи.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 7.

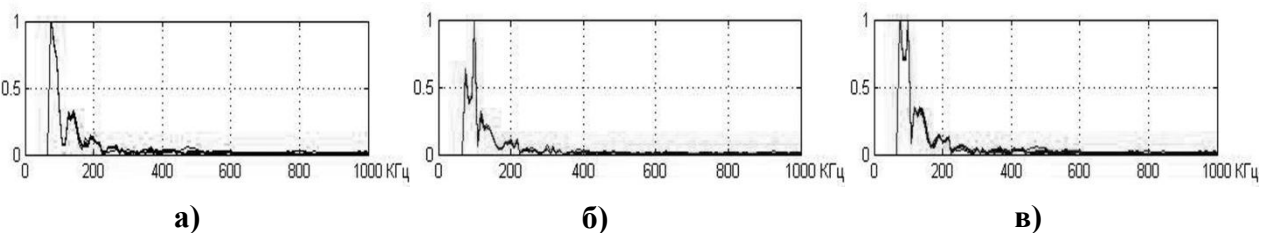


Рис. 7. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

а – на входе только помеха; б – на входе сигнал плюс помеха; в – на выходе сигнал/помеха = 1

На рис. 7, *а* видно, что спектр помехи на выходе ФВЧ имеет огибающую вида $\sin x/x$ с максимумом на частоте среза ФВЧ $F_{\text{ФВЧ}} = 60$ кГц.

Спектр на рис. 7, *б* имеет два максимума, из которых один находится на частоте $F_M = 100$ кГц, соответствующей дальности $R = 5$ м, второй - на частоте $F_{\text{ФВЧ}} = 60$ кГц и обусловлен наличием помехи. При этом отношение помеха/сигнал на входе составляет 10 дБ.

На рис. 7, *в* сигнал и помеха на выходе ФВЧ примерно равны, при этом отношение помеха/сигнал на входе составляет 16 дБ и является предельным.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 8.

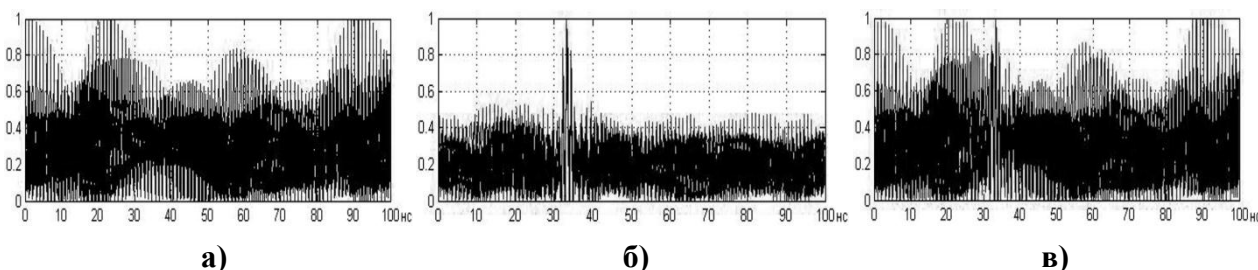


Рис. 8. Графики взаимно-корреляционной функции:

а – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха = 1

График взаимно-корреляционной функции, приведённый на рис. 8, *б*, построен при отношении помеха/сигнал на входе, равном 18 дБ, на рис. 8, *в* – при отношении 24 дБ (предельный уровень). Сравнение графиков рис. 8 показывает, что с увеличением уровня помех возрастают корреляционные шумы, обусловленные взаимодействием двух не коррелированных между собой узко- и широкополосного случайных процессов.

Импульсно-модулированная помеха (ИМ) ($f_0 = 1$ ГГц, $\tau_u = 1$ мкс, $T_{\text{сл}} = 10$ мкс)

Данная модель помехи имитирует излучение РЭС типа радиоимпульсных РЛС, GPS и ГЛОНАСС. Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 9.

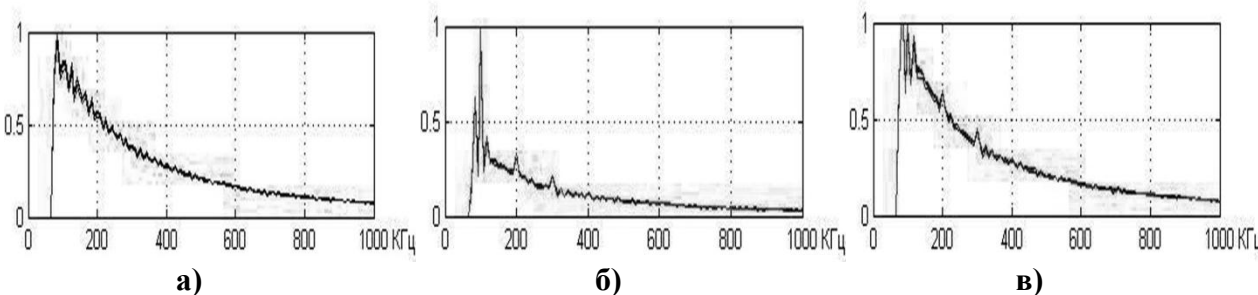


Рис. 9. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

а – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха = 1

На рис. 9, *а* видно, что спектр на выходе ФВЧ имеет монотонно спадающую огибающую с максимумом на частоте среза ФВЧ $F_{\text{ФВЧ}} = 60$ кГц.

Спектр на рис. 9, *б* имеет максимумы на частоте среза ФВЧ $F_{\text{ФВЧ}} = 60$ кГц и частотах $F_M = 100$ кГц, 200 кГц, 300 кГц, соответствующих дальностям $R = 5$ м, 10 м и 15 м. При этом отношение помеха/сигнал на входе составляет 14 дБ.

На рис. 9, *в* сигнал и помеха на выходе ФВЧ примерно равны, при этом отношение помеха/сигнал на входе составляет 24 дБ и является предельным.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 10.

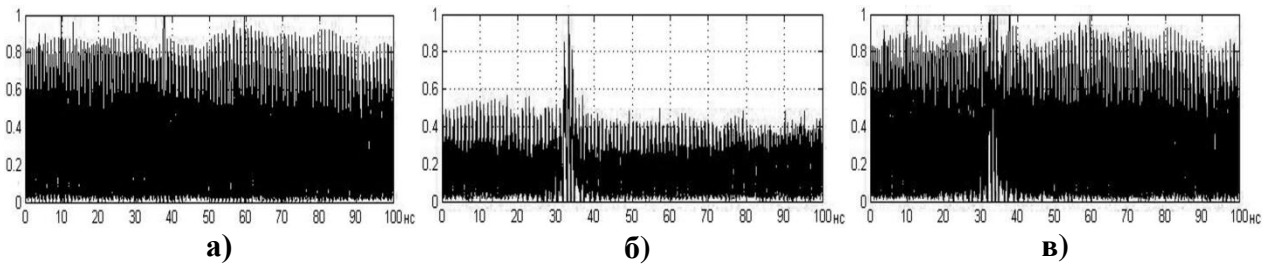


Рис. 10. Графики взаимно-корреляционной функции:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха = 1

График взаимно-корреляционной функции, приведённый на рис. 10, *б*, построен при отношении помеха/сигнал на входе, равном 18 дБ, на рис. 10, *в* – при отношении 34 дБ (предельный уровень). Сравнение графиков рис. 10 показывает, что с увеличением уровня помехи возрастают корреляционные шумы, обусловленные взаимодействием двух некоррелированных между собой узкополосного детерминированного сигнала и широкополосного случайного процесса.

Непрерывно-шумовая помеха (НШП) в полосе частот $\Delta F_{\text{ш}} = 0,3$ ГГц

Данная помеха излучается станцией РЭП и является заградительной. Модель данной помехи может быть использована также при исследовании стойкости СШП-шумовых РЛС к перекрёстным помехам при одновременной работе их в составе ансамбля.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 11.

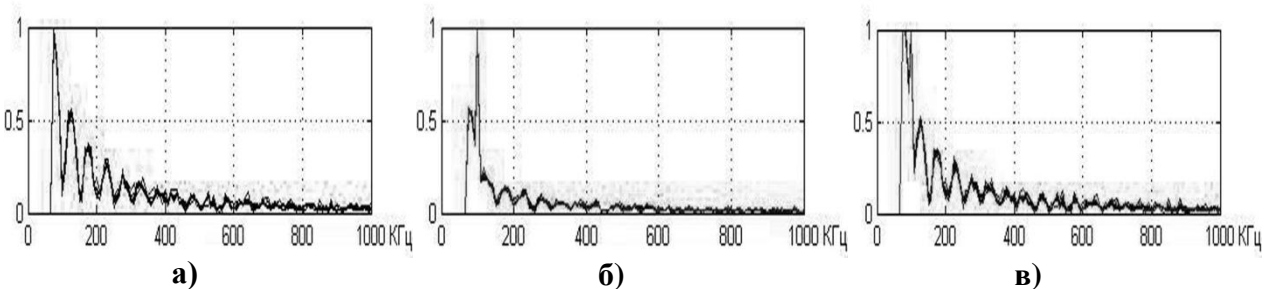


Рис. 11. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха = 1

На рис. 11, *a* видно, что при наличии помехи спектр на выходе ФВЧ имеет огибающую вида $\sin x/x$ с максимумом на частоте среза ФВЧ $F_{\text{ФВЧ}} = 60$ кГц.

Спектрограмма, приведённая на рис. 11, *б*, получена при отношении помеха/сигнал на входе, равном 6 дБ, на рис. 11, *в* – при отношении 10 дБ (предельный уровень).

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 12.

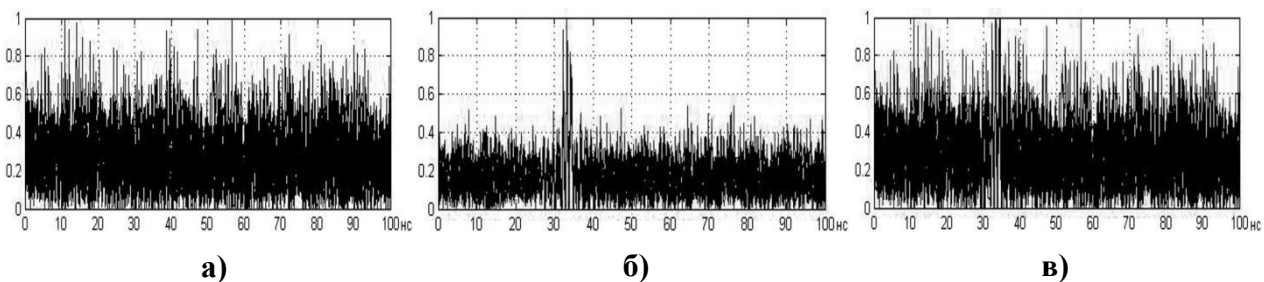


Рис. 12. Графики взаимно-корреляционной функции:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха = 1

График, приведённый на рис. 12, б, построен при отношении помеха/сигнал на входе, равном 17 дБ, на рис. 12, в – при отношении 21 дБ (предельный уровень).

Сравнение графиков рис. 12 с графиками рис. 8 показывает, что с расширением спектра шумовой помехи возрастают корреляционные шумы, обусловленные взаимодействием двух не коррелированных между собой широкополосных случайных процессов.

Импульсно-шумовая помеха (ИШП) в полосе $\Delta F_{\text{ш}} = 0,3$ ГГц ($\tau_{\text{И}} = 1$ мкс, $T_{\text{СЛ}} = 10$ мкс)

Данная помеха излучается станцией РЭП и является заградительной.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 13.

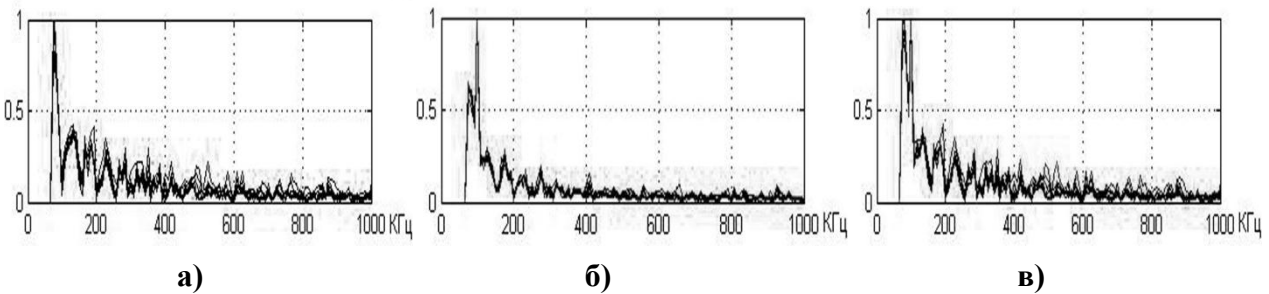


Рис. 13. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

а – на входе только помеха; б – на входе сигнал плюс помеха; в – на выходе сигнал/помеха = 1

Спектрограмма, приведённая на рис. 13, б, получена при отношении помеха/сигнал на входе, равном 17 дБ, на рис. 13, в – при отношении 19 дБ (предельный уровень).

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 14.

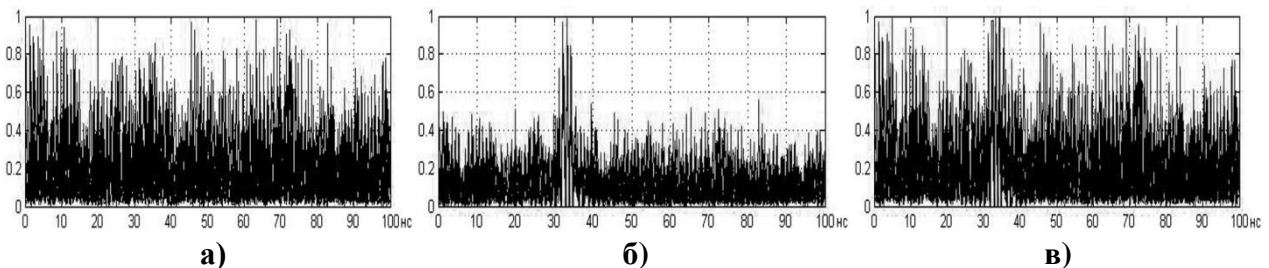


Рис. 14. Графики взаимно-корреляционной функции:

а – на входе только помеха; б – на входе сигнал плюс помеха; в – на выходе сигнал/помеха = 1

График, приведённый на рис. 14, б, построен при отношении помеха/сигнал на входе, равном 21 дБ, на рис. 14, в – при отношении 27 дБ (предельный уровень). Взаимно-корреляционная функция имеет единственный максимум.

Непрерывная ЧМ-помеха (ЧМП) в полосе $\Delta F_{\text{ш}} = 0,3$ ГГц ($T_{\text{ЧМ}} = 5$ мкс)

Данная помеха излучается станцией РЭП и является заградительной.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 15.

Спектрограмма, приведённая на рис. 13, б, получена при отношении помеха/сигнал на входе, равном 10 дБ, на рис. 15, в – при отношении 14 дБ (предельный уровень).

По форме спектрограммы, приведённые на рис. 15, близки к приведённым на рис. 13 для непрерывно-шумовой помехи в полосе частот $\Delta F = 0,3$ ГГц.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 16.

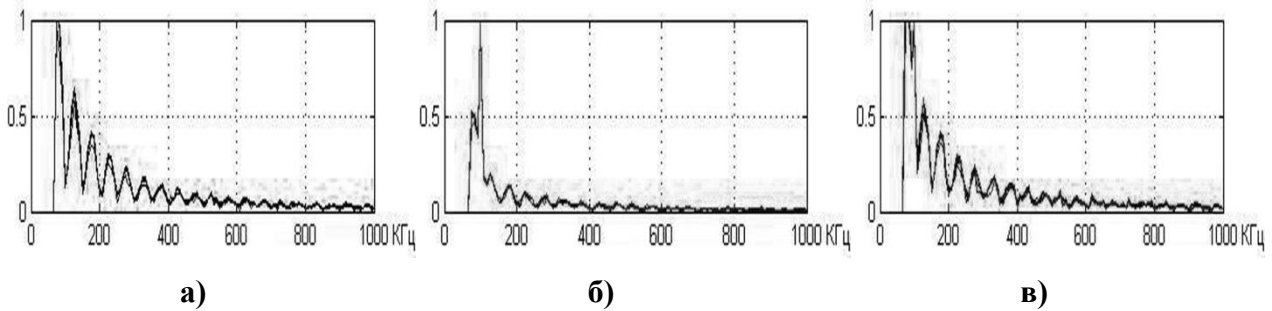


Рис. 15. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха =1

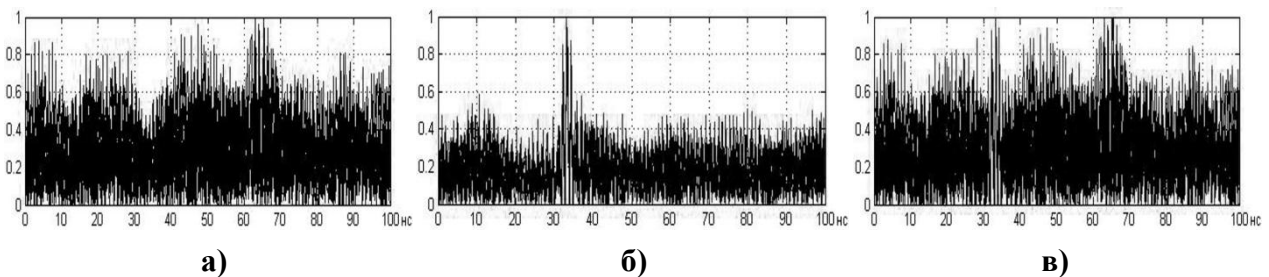


Рис. 16. Графики взаимно-корреляционной функции:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха =1

График, приведённый на рис. 16, *б*, построен при отношении помеха/сигнал на входе, равном 19 дБ, на рис. 16, *в* – при отношении 25 дБ (предельный уровень). Взаимно-корреляционная функция имеет единственный максимум.

Ретранслированная помеха ($\tau_3 = 0,1$ мкс)

Данная помеха формируется станцией РЭП из принимаемого зондирующего сигнала РЛС. Задержанный и усиленный в станции РЭП принятый сигнал переизлучается в направлении на СШП-шумовую РЛС.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ДСА приведены на рис. 17.

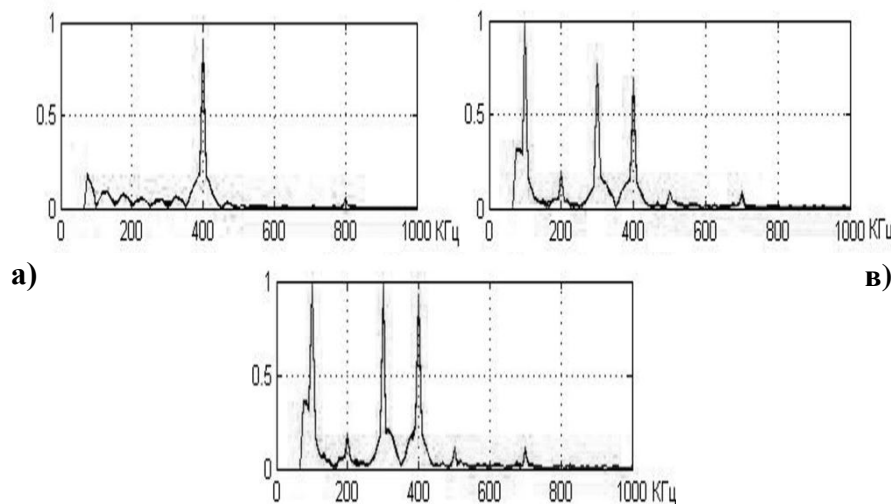


Рис. 17. Спектры сигналов и помех на выходе ФВЧ:

a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха; *в* – на выходе сигнал/помеха =1

Спектрограмма, приведённая на рис. 17, б, получена при уровне входной помехи, равном уровню входного сигнала, на рис. 17, в – при отношении помеха/сигнал на входе, равном 2 дБ (пределный уровень).

Анализ результатов, приведённых на рис. 17, показывает:

- при отсутствии на входе отражённого сигнала СШП-шумовая РЛС воспринимает помеху как полезный сигнал на увеличенной дальности $R_V = 20$ м ($F_V = 400$ кГц);
- при одновременном приёме отражённого сигнала и помехи в спектре модулирующего сигнала на выходе ФВЧ, кроме спектральных составляющих $F = 100$ кГц и $F_V = 400$ кГц, соответствующих дальностям $R = 5$ м и $R_V = 20$ м, наблюдается комбинационная составляющая $F_K = F_V - F = 300$ кГц, соответствующая дальности $R_K = 15$ м.

Результаты моделирования работы СШП-шумовой РЛС с обработкой сигнала методом ВКО приведены на рис. 18.

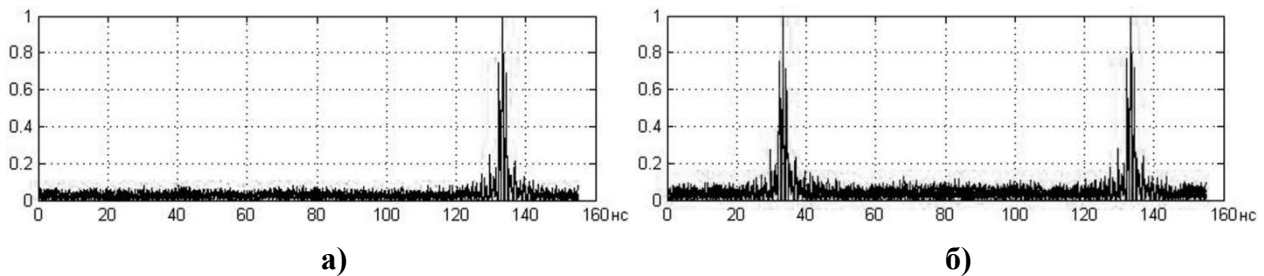


Рис. 18. Графики взаимно-корреляционной функции:
a – на входе только помеха; *б* – на входе сигнал плюс помеха

График, приведённый на рис. 18, б, получен при уровне входной помехи, равном уровню входного сигнала. На рис. 18, б видно, что на выходе МК в каналах дальности $R = 5$ м и $R_V = 20$ м наблюдаются максимумы отраженных сигналов, т. е. помеха и сигнал не различимы.

Пределные значения уровней рассмотренных помех, нормированных к уровню отражённого шумового сигнала на входе РЛС (коэффициенты подавления), даны в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты подавления

	НШ $\Delta F = 50$ МГц	ИМ $\tau_u = 1$ мкс	НШП $\Delta F = 0,3$ ГГц	ИШП $\tau_u = 1$ мкс	ЧМП $\Delta F = 0,3$ ГГц	РП $\tau_3 = 0,1$ мкс
ДСА	16 дБ	24 дБ	10 дБ	19 дБ	14 дБ	2 дБ
ВКО	24 дБ	34 дБ	21 дБ	27 дБ	25 дБ	0 дБ

Из табл. 1 следует, что:

- наибольшую опасность для СШП-шумовых РЛС представляют ретранслированные помехи;
- СШП-шумовая РЛС с обработкой сигнала методом ВКО более устойчива к действию активных помех.

Заключение

Для предложенных моделей СШП-шумовых РЛС исследована устойчивость к действию основных видов активных помех, создаваемых излучающими СВЧ РЭС и станциями РЭП. Показано, что обработка сигнала методом ВКО обеспечивает, по сравнению с методом ДСА, более высокую помехоустойчивость РЛС.

Количественные оценки потенциальной помехоустойчивости СШП-шумовых РЛС

показали, что, независимо от метода обработки отражённых сигналов, наибольшую опасность могут представлять ретранслированные помехи.

Полученные результаты позволяют:

- оценить перспективы построения как наземных, так и бортовых СШП-шумовых РЛС, функционирующих в реальной электромагнитной обстановке с учётом применения конкретных средств РЭП;
- определить в зависимости от условий применения и назначения СШП-шумовых РЛС оптимальные способы обработки отражённых сигналов (ДСА или ВКО).

Библиографический список

1. **Щербак, Н.** Сверхширокополосная радиолокация // Электроника: НТБ, 2001. № 4. С. 38–46.
2. Пуарье. Возможность использования шумового квазимонохроматического сигнала в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. 1969. № 7. С. 12–22.
3. **Калинин, В.И.** Эффективность двойного спектрального анализа в шумовой радиолокации при действии отражений от местных предметов / В.И. Калинин, В.В. Чапурский // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 3. С. 303–313.
4. **Калинин, В.И.** Сверхширокополосная шумовая радиолокация на основе антенных решёток с рециркуляцией сигналов / В.И. Калинин, В.В. Чапурский // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1266–1277.
5. Расчёт соотношения сигнал/шум для радиолокационной станции, работающей по методу двойного спектрального анализа шумового сигнала / Залогин Н.Н. [и др.] // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 2. С. 278–286.
6. **Мырова, Л.О.** Модель радиоэлектронного подавления и обеспечения помехоустойчивости радиорелейных и тропосферных средств связи нового поколения / Л.О. Мырова, А.И. Янкин, А.В. Мигула // Технологии ЭМС. 2012 № 2 (41) С. 73–78.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

S.V. Katin, A.V. Kashin, V.A. Kozlov, A.L.Kunilov

POTENTIAL INTERFERENCE RESISTANCE CLOSE RADARS WITH UWB-NOISE SIGNALS

Measuring system research institute n. a. Yu.Ye. Sedakov, Nizhny Novgorod

Purpose: The objects of the paper are investigations of interference resistance UWB-noise radars with cross-correlation signal processing and double spectral analysis method under effect of deliberate and non-deliberate interferences.

Design/methodology/approach: The radar model and interference signal model are given.

Findings: It is possible, for example, to apply the results for estimation of possibility UWB-noise radars designing, with may be used under effect of active interferences.

Research limitations/implications: UWB-noise radars with cross-correlation signal processing is more available compared with UWB-noise radars, based on double spectral analysis method

Originality/value: The present study provides a starting-point for creation of practical designing method for specialists and engineers.

Key words: UWB-noise radars, active interferences, interference resistance, computer modeling.

УДК 621.372.8

Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков

ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЛЕНКИ В УСТРОЙСТВАХ СВЧ И КВЧ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны физические основы работы и даны технические характеристики коаксиальных фиксированных широкополосных аттенуаторов.

Ключевые слова: резистивные пленки, волноводы, дисперсионные характеристики, пластинчатые резисторы, фиксированные аттенуаторы, ослабление, погрешности.

Введение

Тонкие (много меньше толщины скин-слоя) резистивные пленки широко применяются в СВЧ уже достаточно давно [1].

Резистивные пленки на плоских диэлектрических пластинах (подложках) используются в волноводной технике в качестве нагрузок, фиксированных и переменных аттенуаторов, а также в высокоточных поляризационных аттенуаторах.

Основой коаксиальных нагрузок являются цилиндрические резисторы (сопротивления). На цилиндрических и шайбовых резисторах созданы коаксиальные аттенуаторы в диапазоне от постоянного тока до нижней границы СВЧ-диапазона.

Тонкие резистивные пленки используются в качестве поглощающих элементов в составе СВЧ гибридно-интегральных схем, в устройствах для непосредственного измерения мощности в СВЧ-диапазоне. Такие пленки на диэлектрических подложках применяются в качестве узлов связи в волноводных направленных ответвителях для обеспечения равномерности переходного ослабления и коэффициента направленности. Тонкие резистивные пленки нашли применение в конструкциях микрополосковых линий передачи в качестве элементов подавления высших типов волн [2].

Применение тонких резистивных пленок на диэлектрических подложках в круглых, эллиптических и прямоугольных волноводах явилось прорывом в создании наиболее распространенных устройств СВЧ и КВЧ широкополосных коаксиальных аттенуаторов.

Один из авторов данной статьи в 1960 году впервые в мировой практике для создания широкополосных коаксиальных аттенуаторов предложил использовать новую электродинамическую структуру: отрезок круглого волновода, в диаметральной плоскости перегороженного тонкой резистивной пленкой на диэлектрической подложке (пластинчатым резистором).

В дальнейшем для улучшения технических характеристик аттенуаторов (равномерности ослабления по частоте, степени согласования с внешним трактом) стали применять отрезки эллиптических волноводов.

Исследования прямоугольных волноводов с тонкими резистивными пленками на диэлектрических подложках привели к усовершенствованию аттенуаторов на полосковых линиях [3,4] и улучшению технических характеристик волноводных аттенуаторов.

Первоначально разработки пластинчатых резисторов и аттенуаторов на их основе базировались на экспериментальных исследованиях.

Расширение диапазона частот до 18 ГГц и выше потребовало проведения исследований на электродинамическом уровне неоднородных волноводных структур с резистивными пленками и диэлектриками, поскольку введение их в полые волноводы приводит к значительным качественным изменениям характеристик распространения волн.

Рассмотрим основные электродинамические характеристики в круглом, эллиптичес-

ском и прямоугольном волноводах с тонкими резистивными пленками на диэлектрических подложках.

Круглый волновод с резистивными пленками

Рассмотрим круглый волновод, диаметрально перегороженный диэлектрической пластиной с нанесенными по одну или обе ее поверхности тонкими резистивными пленками, который является основной электродинамической структурой, используемой на практике для создания широкополосных коаксиальных аттенуаторов.

На рис. 1 представлено поперечное сечение такого волновода с двумя резистивными пленками.

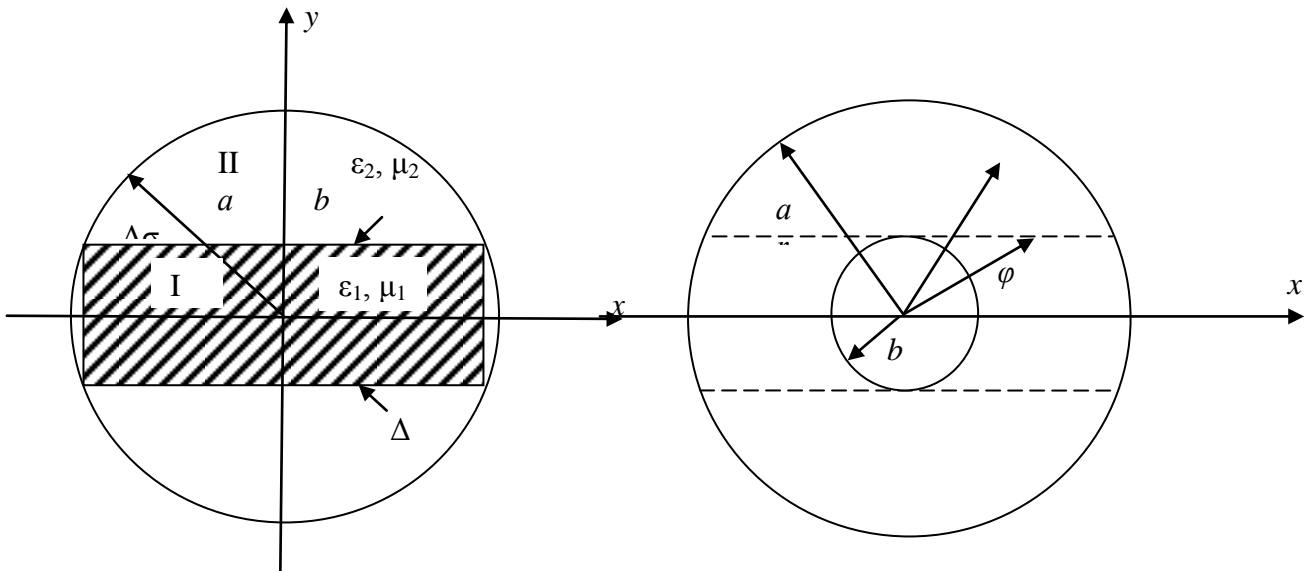


Рис. 1. Круглый волновод с резистивными пленками на диэлектрической подложке:
 a – радиус волновода; b – половина толщины подложки; $\epsilon_{1,2}, \mu_{1,2}$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости областей I, II; $\Delta\sigma$ – поверхностная проводимость пленок;
 Δ – толщина пленок

Будем считать, что стенки волновода идеально проводящие. Поскольку граничные условия на пленке могут быть удовлетворены только при использовании полных наборов собственных функций выделенных областей I и II, то электрические и магнитные вектора Герца, описывающие поля в этих областях, записываем в виде

$$\Pi_{z1}^e = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos k\pi x / 2a \cdot \sin \alpha_{1k} y \cdot e^{-i\beta z} \tag{1}$$

$$\Pi_{z1}^m = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \sin k\pi x / 2a \cdot \cos \alpha_{1k} y \cdot e^{-i\beta z}$$

$k=1,3,5\dots$ для области I;

$$\Pi_{z2}^e = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \chi_{1n}(\alpha_2 r) \cdot \sin(2n + 1)\varphi \cdot e^{-i\beta z} \tag{2}$$

$$\Pi_{z2}^m = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot \chi_{2n}(\alpha_2 r) \cdot \cos(2n + 1)\varphi \cdot e^{-i\beta z}$$

$n=0,1,2,3\dots$ для области II,

где

$$\chi_{1n}(\alpha_2 r) = \frac{J_{2n+1}(\alpha_2 r) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 a) - J_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 r)}{J_{2n+1}(\alpha_2 b) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 a) - J_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 b)},$$

$$\chi_{2n}(\alpha_2 r) = \frac{J_{2n+1}(\alpha_2 r) \cdot N'_{2n+1}(\alpha_2 a) - J'_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 r)}{J_{2n+1}(\alpha_2 b) \cdot N'_{2n+1}(\alpha_2 a) - J'_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 b)}$$

– линейные комбинации функций Бесселя $J_{2n+1}(\alpha_2 r)$ и Неймана $N_{2n+1}(\alpha_2 r)$, обеспечивающие выполнение граничных условий по поверхности волновода $r=a$ [5].

Волновые числа связаны соотношениями

$$\varepsilon_1 \mu_1 \omega^2 = \alpha_{1k}^2 + (\kappa\pi/2a)^2 + \beta^2, \alpha_{1k}^2 + (\kappa\pi/2a)^2 = \alpha_1^2, \varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 = \alpha_2^2 + \beta^2. \quad (3)$$

Поскольку рассматриваемая система имеет потери, продольное β и поперечные $\alpha_{1,2}$ волновые числа полагаем комплексными: $\alpha_{1,2} = \gamma_{1,2} + i\delta_{1,2}$, $\beta = \beta_1 + i\beta_2$, $\alpha_{1k} = \gamma_{1k} + i\delta_{1k}$.

Ввиду симметричности системы относительно оси x , для составления дисперсионного уравнения достаточно реализовать граничные условия только на одной из пленок.

На границе $y = b$ $r = \sqrt{x^2 + b^2}$, $\cos \varphi = x/\sqrt{x^2 + b^2}$, $\sin \varphi = b/\sqrt{x^2 + b^2}$.

Выражая компоненты поля, тангенциальные по отношению к этой границе, через вектора Герца, подставляем их в граничные условия, соответствующие методу поверхностного тока [6]:

$$E_{z1}(y = b) = E_{z2}(y = b), \quad E_{x1}(y = b) = E_{x2}(y = b), \quad (4)$$

$$H_{z1}(y = b) - H_{z2}(y = b) = -\Delta\sigma E_{x1}(y = b), \quad H_{x1}(y = b) - H_{x2}(y = b) = \Delta\sigma E_{z1}(y = b),$$

которые приводят к системе четырех функциональных уравнений:

$$\alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_{\kappa} \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b = \alpha_2^2 \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \cdot \sin(2n+1)\varphi, \quad (5)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} [\beta A_{\kappa} \kappa\pi/2a + \omega\mu_1 \alpha_{1\kappa} B_{\kappa}] \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b = - \sum_{n=0}^{\infty} [\beta A_n \alpha_2 \cdot N'_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \frac{\omega\mu_2}{\sqrt{x^2 + b^2}} \cdot (2n+1) B_n N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2})] \cdot \sin(2n+1)\varphi \cdot \cos \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\beta(2n+1)}{\sqrt{x^2 + b^2}} A_n * \right. \\ \left. * N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \omega\mu_2 \alpha_2 B_n N'_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \right] \cdot \cos(2n+1)\varphi \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

$$\alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} B_{\kappa} \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \cos \alpha_{1\kappa} b - \alpha_2^2 \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \cdot \cos(2n+1)\varphi = \\ = -i\Delta\sigma \sum_{\kappa=1}^{\infty} [\beta \kappa\pi/2a A_{\kappa} + \omega\mu_1 \alpha_{1\kappa} B_{\kappa}] \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b, \quad (7)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} [\omega\varepsilon_1 \alpha_{1\kappa} A_{\kappa} - \beta \kappa\pi/2a B_{\kappa}] \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \cos \alpha_{1\kappa} b - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\omega\varepsilon_2}{\sqrt{x^2 + b^2}} (2n+1) A_n * \right. \\ \left. * N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \beta \alpha_2 N'_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) B_n \right] \cdot \cos(2n+1)\varphi \cdot \cos \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} [\omega\varepsilon_2 \alpha_2 A_n * \\ * N'_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \frac{\beta(2n+1)}{\sqrt{x^2 + b^2}} B_n N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2})] \cdot \sin(2n+1)\varphi \cdot \sin \varphi = \\ = -i\Delta\sigma \alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_{\kappa} \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b. \quad (8)$$

Используя в соответствии с методом частичных областей условия ортогональности собственных функций на интервале $x \in [0 - a]$, переходим от системы функциональных уравнений (5–8) к бесконечной системе линейных однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_k, B_k, A_n, B_n .

Запись условия нетривиальности решений этой системы приводит к дисперсионному уравнению волн в рассматриваемом волноводе.

Выражая A_k и B_k через A_n и B_n , приходим к бесконечной системе линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_n и B_n :

$$\sum_{n=0}^{\infty} (R_{nk}A_n + S_{nk}B_n) = 0, \quad \sum_{n=0}^{\infty} (L_{nk}A_n + M_{nk}B_n) = 0, \quad (9)$$

где $R_{nk}, S_{nk}, L_{nk}, M_{nk}$ – сложные функции частоты, индексов волн, геометрических и электрических параметров структуры [7]. Результаты решения дисперсионного уравнения при заданных параметрах $\Delta\sigma, \epsilon_1, a$ и b приведены на рис. 2. Расчет проведен при удельном поверхностном сопротивлении пленки $R_{\Pi}=100 \text{ Ом}/\square$ ($R_{\Pi}=1/\Delta\sigma$).

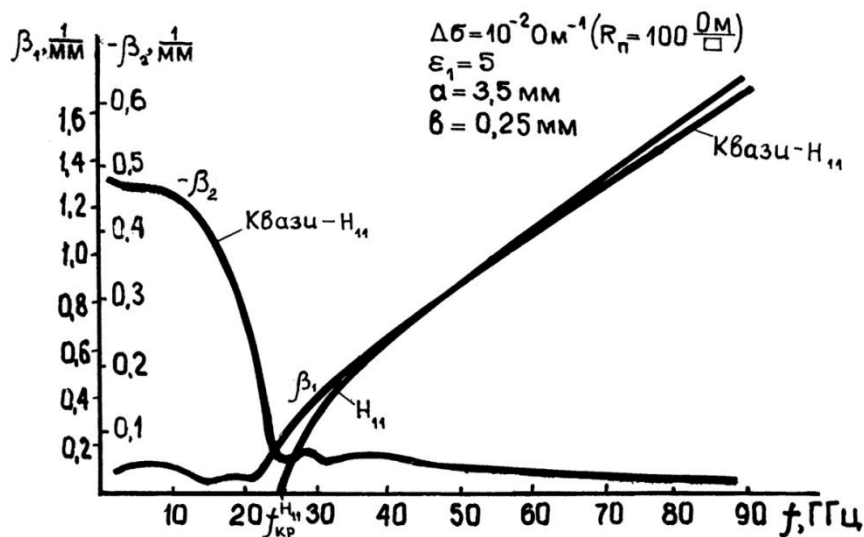


Рис.2. Зависимость фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 от частоты

Из рис. 2 видно, что кривые зависимости фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 от частоты имеют общую закономерность. Исследуемая волна не имеет критической частоты. Отсутствует скачок фазовой постоянной и коэффициента затухания при переходе через частоту, соответствующую критической частоте полого волновода. Затухание с увеличением частоты уменьшается. При этом резкий его спад наблюдается вблизи критической частоты волны H_{11} полого круглого волновода. Фазово-частотная характеристика на частотах $f > f_{кр}^{H_{11}}$ прилегает к характеристике волны H_{11} полого круглого волновода, в связи с чем рассматриваемую волну можно классифицировать как квази- H_{11} .

Результаты расчета показывают, что рассматриваемый волновод на основной волне является существенно диссипативной системой лишь до частоты, соответствующей критической частоте волны H_{11} . При этом неравномерность затухания в диапазоне $f \in [0 - f_{кр}^{H_{11}}]$ можно регулировать параметрами пленки и диэлектрической подложки.

Одной из важнейших является характеристика затухания в зависимости от частоты. Резкий спад затухания (рис. 2) вблизи критической частоты волны квази- H_{11} можно объяснить следующим образом. В волноводе с резистивной пленкой на частотах меньше критической затухание определяется двумя факторами: поглощением в пленках и частичной заперделностью волновода (частичной потому, что при наличии пленки имеется распространение

энергии). При подходе к критической частоте затухание за счет запердельности волновода уменьшается, и на частотах выше критической остается только поглощение в пленке.

Для всех экранированных неоднородно заполненных волноводов с резистивными пленками характерна общая закономерность: при всех $R_{\text{п}}$ – уменьшение затухания с ростом частоты. Она объясняется втягиванием с ростом частоты поля в диэлектрик и уменьшением за счет этого его величины на резистивной пленке, а также с уменьшением влияния запердельного режима.

В круглом волноводе для равномерно распределенной резистивной пленки существует область значений $R_{\text{п}} \in [90 - 120]$ Ом/□ оптимальной как с точки зрения получения минимального погонного затухания, что важно для создания аттенуаторов с малым ослаблением, так и с точки зрения обеспечения максимально равномерного ослабления аттенуаторов в рабочем диапазоне частот, начиная от постоянного тока. Влияние диэлектрической проницаемости подложки на коэффициент затухания тонких резистивных пленок экспериментально и теоретически исследовано в [8,9].

Результаты расчета коэффициента затухания волны квази- H_{11} показали, что на низких частотах $f < (2-3)$ ГГц диэлектрик практически не влияет на структуру поля и соответственно на затухание волны. На высоких частотах электромагнитное поле все более втягивается в диэлектрик и сильнее взаимодействует с пленкой. Возрастание затухания при увеличении ϵ диэлектрика подложки начинает сказываться при соотношении $2\pi a/\lambda > 0,85$.

При расчете электродинамических характеристик рассматриваемой структуры предполагалось, что тонкий поглощающий (резистивный) слой равномерно распределен по поверхности подложки. Однако практически это не всегда выполняется. На степень равномерности распределения пленки влияют технологический процесс нанесения слоя и его юстировки (подгонки), качество поверхности подложки и другие факторы.

Влияние неравномерности резистивного слоя пластинчатого резистора на зависимость ослабления аттенуатора от частоты исследовано экспериментально в [10].

В работе показано, что неравномерность резистивного слоя серийных малогабаритных резисторов является достаточно малой и в диапазоне частот до 18 ГГц (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм) оказывает минимальное влияние на частотную зависимость ослабления аттенуаторов. Это влияние становится еще меньше в диапазонах частот до 26 (коаксиальный тракт сечением 3,5/1,52 мм) и до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением 2,4/1,04 мм).

Эллиптический волновод с резистивной пленкой

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность применения эллиптических волноводов при разработке коаксиальных аттенуаторов СВЧ-диапазона волн [11]. Теоретические исследования полей в волноводах эллиптического сечения с резистивными пленками связано со значительными математическими трудностями расчета функций Маттье в комплексной плоскости.

В [12] было получено решение комплексного дисперсионного уравнения для двухслойного эллиптического волновода на основе приближенного представления функций Маттье в комплексной плоскости.

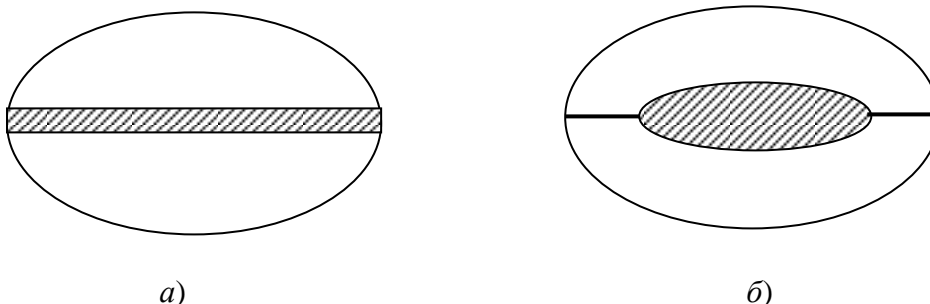


Рис. 3. Эллиптический волновод с резистивной пленкой на диэлектрической подложке (а) и его математическая модель (б)

Эллиптический волновод с тонкой резистивной пленкой на диэлектрической подложке показан на рис. 3, а. Математическая модель волновода с пленкой показана на рис. 3, б. Экран выбран эллиптическим с размерами осей, как у реального волновода. Диэлектрическая пластина заменена эллиптическим цилиндром в соотношении его осей 10:1. Гальванический контакт пленки, находящейся на поверхности диэлектрика, с экраном обеспечен введением продольных идеально проводящих тонких перегородок вдоль продольной оси экрана, не нарушающих структуру поля четной волны HE_{11}^u в двухслойном эллиптическом волноводе с пленкой.

Расчеты дисперсионных характеристик и характеристик затухания, проведенные для разных величин удельного поверхностного сопротивления в диапазоне частот 1-7,5 ГГц, показали наличие частот, характерных для критических частот, на которых исчезает взаимодействие поля с резистивной пленкой. Эта критическая частота совпадает с критической частотой волны HE_{11}^u в двухслойном эллиптическом волноводе без пленки.

Из расчетов следует, что в диапазоне частот до 5 ГГц подбором конфигурации эллиптического волновода возможно уменьшение частотной зависимости ослабления аттенуаторов с 10 до 2% от величины ослабления 20 дБ.

Аналогичные результаты получены ранее экспериментально [11]. В серийные коаксиальные аттенуаторы типа ДО-2 (коаксиальный тракт сечением 16/7 мм), выполненные на пластинчатых резисторах С2-20 с односторонним резистивным покрытием, были поставлены экспериментально подобранные по длине (не выходящей за предел длины резистивного слоя) и по профилю латунные (как и металл корпусов аттенуаторов) эллиптические вкладыши. Они образовывали эллиптические волноводы с резистивными пленками на диэлектрических подложках.

Измерение ослабления и КСВН проводились на аттенуаторах с ослаблением 5, 10, 15 и 20 дБ в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц. С применением вкладышей величина КСВН аттенуаторов уменьшалась с 1,9 до 1,25, а отклонение (разброс) ослабления на верхних частотах в процентах к ослаблению на постоянном токе для каждого из аттенуаторов уменьшался с 15-20 до 2%.

В аттенуаторах, волноводы которых имеют диаметры 3,5 мм и 2,4 мм, конструктивно сложно вводить эллиптические вкладыши. В таких аттенуаторах вместо вкладышей применяются так называемые регулировочные металлические винты.

Прямоугольный волновод с резистивной пленкой

Исследованию свойств прямоугольных волноводов с резистивными пленками посвящено немало работ, в том числе [13–15].

Рассмотрим прямоугольный волновод с изотропной резистивной пленкой, примыкающей к диэлектрику. Поперечное сечение волновода изображено на рис. 4.

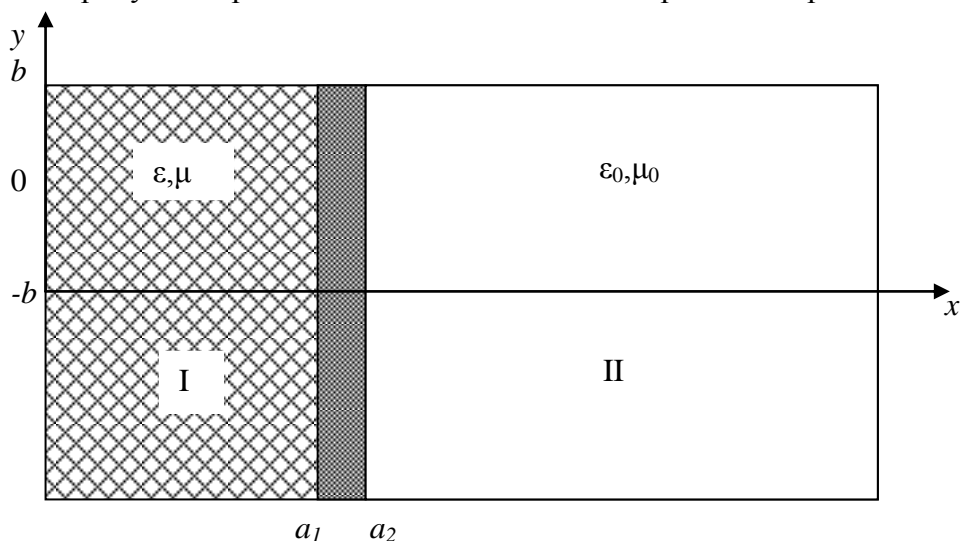


Рис. 4. Прямоугольный волновод с резистивной пленкой на диэлектрике

Полагаем, что стенки волновода идеально проводящие, резистивная пленка – тонкая, ϵ , μ диэлектрика – действительные величины. С учетом этого при постановке задачи можно воспользоваться методом поверхностного тока [6].

Из-за наличия в пленке как продольных, так и поперечных токов поля волн в волноводе в общем случае являются гибридными. При решении дифракционной задачи поле в волноводе с пленкой представим в виде набора гибридных волн. Запишем продольные компоненты обоих векторов Герца в выделенных областях:

$$\Pi_{z1}^e = A_1 \cdot \sin \kappa_{x1} x \cdot \sin \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z},$$

$$\Pi_{z1}^m = B_1 \cdot \cos \kappa_{x1} x \cdot \cos \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z}$$

для области I;

$$\Pi_{z2}^e = A_2 \cdot \sin \kappa_{x2} (x - a_3) \cdot \sin \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z},$$

(11)

$$\Pi_{z2}^m = B_2 \cdot \cos \kappa_{x2} (x - a_3) \cdot \cos \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z}$$

для области II.

В выражениях (10) и (11) введены следующие обозначения:

$$\kappa_y = n\pi/2b, \kappa_{x1} = \sqrt{\epsilon\mu\omega^2 - \kappa_y^2 - \beta^2}, \kappa_{x2} = \sqrt{\epsilon_0\mu_0\omega^2 - \kappa_y^2 - \beta^2}, \beta = \beta_1 + i\beta_2,$$

где $\beta_{1,2}$ – продольные волновые числа.

Суть метода поверхностного тока заключается во введении разрывного граничного условия на резистивной пленке для тангенциальных компонент магнитного поля при сохранении условия непрерывности для тангенциальных компонент электрического поля. Граничные условия в плоскости пленки при $x = a_2$ записываются при этом в виде

$$E_{y1} = E_{y2}, \quad E_{z1} = E_{z2}, \quad H_{y2} - H_{y1} = j_z \text{ пов}, \quad H_{z2} - H_{z1} = -j_y \text{ пов},$$

где $j_z \text{ пов} = \Delta\sigma E_{z2}$, $j_y \text{ пов} = \Delta\sigma E_{y2}$, σ – удельная проводимость пленки, Δ – ее толщина.

Применение метода поверхностного тока позволяет исключить из рассмотрения поля в области $x \in [a_1 - a_2]$, занимаемой резистивной пленкой.

Выражая компоненты поля через вектора Герца и подставляя их в граничные условия (12), получаем систему четырех алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 . Понижая ее порядок, приходим к системе двух линейных алгебраических уравнений относительно A_1, A_2 . Записывая условие нетривиальности решений системы, получаем дисперсионное уравнение двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями.

Результаты решения системы уравнений в виде фазовых характеристик и характеристик затухания приведены в [16]. Рассматриваемая гибридная волна в двухслойном волноводе без пленки соответствует волне LE_{11} . В отличие от обычных волнопроводов с потерями в стенках, дисперсионные характеристики волны в исследуемом волноводе имеют плавный характер. При переходе через частоту, соответствующую критической волновода без пленки, отсутствует скачек дисперсионных характеристик.

Наибольший интерес при создании аттенюаторов представляет зависимость постоянной затухания от частоты. Она имеет два характерных участка. В пределах значений $2\pi a_3/\lambda$ от нуля до 3,5 участок кривой относительно пологий, далее начинается резкое уменьшение затухания, связанное с концентрацией поля в диэлектрике. Затухание изменяется в зависимости от величины удельного поверхностного сопротивления $R_{\text{п}}$ при одинаковой диэлектрической проницаемости ϵ подложки.

Можно подобрать такое $R_{\text{п}}$ пленки, при котором постоянная затухания практически не будет зависеть от частоты в достаточно широкой полосе частот. При различных значениях диэлектрической проницаемости подложки затухание практически неизменно. Диэлектрическая проницаемость существенно влияет на характеристики затухания лишь на высоких частотах ($2\pi a_3/\lambda=7$).

В [17] рассмотрены результаты решения методом поверхностного тока краевой задачи для прямоугольного волновода, разделенного вдоль его оси анизотропно (в направлении оси y) проводящей резистивной пленкой (рис. 5).

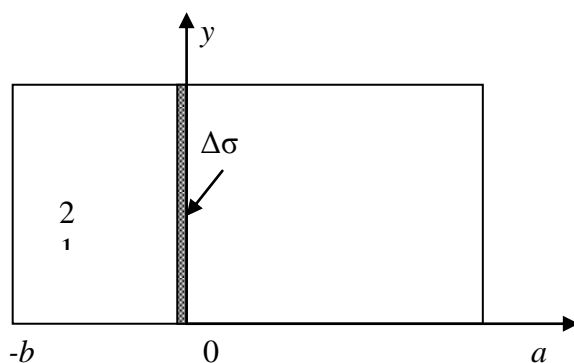


Рис. 5. Прямоугольный волновод с резистивной пленкой

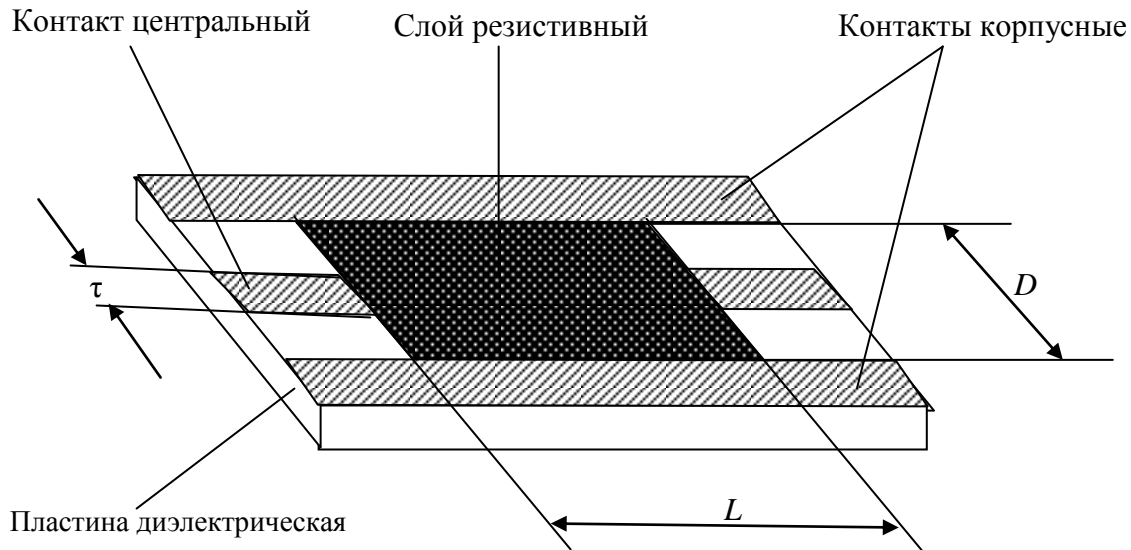
В таком волноводе могут существовать волны типа H_{m0} . При симметричном расположении резистивной пленки с затуханием будут распространяться лишь волны с нечетным индексом m . У волн с четным индексом касательные к поверхности резистивной пленки компоненты электрического поля равны нулю, в результате чего все волновые числа являются либо действительными, либо мнимыми величинами. В общем случае при произвольном (по оси x) расположении резистивной пленки в волноводе также могут существовать волны типа H_{m0} . Однако, за исключением случаев $a/b = n/l$ (n, l – целые положительные числа), все волны будут распространяться с затуханием.

Получены дисперсионные характеристики волны H_{10} для волновода с симметрично расположенной пленкой. При больших поверхностных сопротивлениях резистивной пленки (порядка 300-3000 Ом/□) дисперсионная характеристика близка к дисперсионной характеристике полого прямоугольного волновода. При этом у волны H_{10} в рассматриваемом волноводе с пленкой отсутствуют критические частоты. Резкое увеличение фазовой постоянной β_1 происходит в области частот, прилегающих критической частоте волны H_{10} полого волновода. При этом происходит также резкое уменьшение постоянной затухания β_2 . При уменьшении поверхностного сопротивления зависимость фазовой постоянной от частоты изменяется во всем диапазоне частот, начиная от постоянного тока. При оптимальном выборе поверхностного сопротивления резистивной пленки можно добиться постоянства коэффициента затухания в широкой полосе частот.

Это качество прямоугольного волновода с тонкой резистивной пленкой, как и прямоугольного волновода с такой же пленкой на диэлектрической подложке, делает их перспективными при создании волноводных СВЧ- и КВЧ-аттенюаторов с равномерным ослаблением в диапазоне волновода.

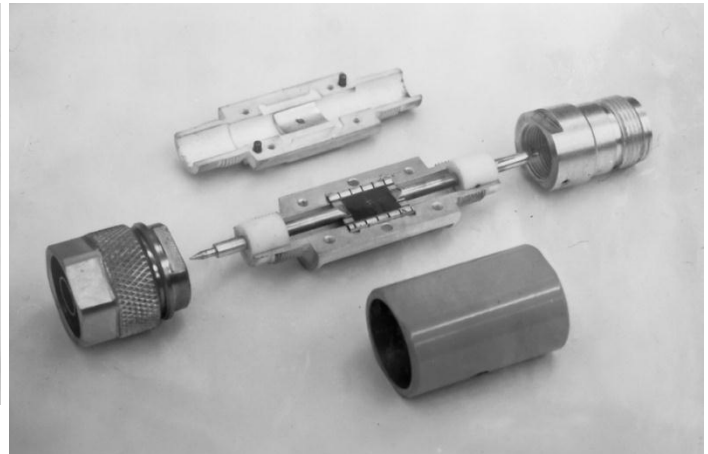
Технические характеристики коаксиальных фиксированных широкополосных аттенюаторов

Результаты теоретических и экспериментальных исследований неоднородных волноводящих структур с тонкими резистивными пленками положены в основу разработок высокоточных широкополосных коаксиальных аттенюаторов. Основным элементом таких аттенюаторов является пластинчатый резистор. На рис. 6 показана наиболее распространенная конструкция пластинчатого резистора в виде прямоугольной диэлектрической пластины с нанесенной на одну или обе ее стороны тонкой резистивной пленкой и контактными площадками.

**Рис. 6. Пластинчатый резистор:**

L - длина резистивного слоя; D - ширина резистивного слоя равна диаметру участка круглого волновода аттенюатора; τ - ширина центральных контактов равна диаметру центрального проводника коаксиальной линии

Для точечных центральных контактов величина ослабления сигнала на единицу длины резистивного слоя $A = 8,68 \pi/D$ дБ/ед.длины. Величина входного (выходного) сопротивления резистора на постоянном токе при подключенной к выходу (входу) нагрузки ($50 \pm 0,1$) Ом составляет ($50 \pm 0,5$) Ом. На рис. 7 и рис. 8 показаны внешний вид и узлы аттенюаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм.

**Рис. 7. Внешний вид аттенюаторов****Рис. 8. Узлы аттенюаторов**

Современные пластинчатые резисторы изготавливаются на керамической подложке (поликоре толщиной 0,5 мм и 0,25 мм, $\epsilon=9,6$) с использованием тонкопленочной технологии. Резистивный сплав – РС 5406 К-Ni, контактные поверхности – золото.

В Нижегородском НИПИ «Кварц» разработаны пластинчатые резисторы С6-8 с двухсторонним резистивным покрытием. На их базе созданы фиксированные коаксиальные аттенюаторы модели 148 (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм), работающие в диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц, с номинальными значениями ослабления 3, 6, 10, 20, 30 дБ, погрешностью ослабления не более $\pm 1,0$ дБ для аттенюаторов до 20 дБ и $\pm 1,5$ дБ для аттенюа-

торов 30 дБ. Величина КСВН не превышает 1,6, входная мощность – 1 Вт, габариты – $\varnothing 24 \times 74$ мм [18].

С освоением миллиметровых волн были разработаны малогабаритные пластинчатые резисторы габаритами $5,5 \times 7,0 \times 0,5$ мм и $4,4 \times 5,5 \times 0,25$ мм, имеющие двухстороннее резистивное покрытие.

На базе малогабаритных резисторов созданы коаксиальные аттенюаторы модели 1016, работающие в диапазоне от постоянного тока до 26,5 ГГц (коаксиальный тракт сечением $3,5/1,52$ мм) и модели 1007 - в диапазоне от постоянного тока до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением $2,4/1,04$ мм). Номинальные значения ослабления обеих моделей аттенюаторов 3, 6, 10, 20, 30 дБ. Аттенюаторы модели 1016 имеют погрешность по ослаблению $\pm (0,7-1,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и КСВН не более 1,1 - 1,5 в зависимости от частоты. Входная мощность – 1 Вт, габариты – $\varnothing 13 \times 31$ мм. Аттенюаторы модели 1007 имеют погрешность по ослаблению $\pm (0,7-3,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и поддиапазона частот (0 - 26,5 ГГц, 26,5 – 37,5 ГГц, 37,5 – 50 ГГц) и КСВН не более 1,35–2,1 в зависимости от частоты. Входная мощность – 0,5 Вт, габариты – $\varnothing 12,2 \times 28$ мм.

Дальнейшее улучшение характеристик коаксиальных аттенюаторов на пластинчатых резисторах связано в основном с изменением конфигурации резистивной пленки (например, в виде сетки для резисторов с одно или двухсторонним покрытием), повышением идентичности величин удельного поверхностного сопротивления (для резисторов с двухсторонним покрытием), повышением равномерности резистивного слоя (для пластинчатых резисторов со сплошной резистивной пленкой), уменьшением переходного сопротивления между резистивной пленкой и контактными площадками резистора, совершенствованием возбуждающих (воспринимающих) электродов аттенюаторов.

Библиографический список

1. **Слущкая, В.В.** Тонкие пленки в технике СВЧ/ В.В. Слущкая. – М.: Сов. радио, 1967. - 456с.
2. Патент 2024120 РФ. Микрополосковая линия передачи / А.И. Гулин, В.К. Майстренко, А.А. Радионов, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Б.И. 1994. Бюл. № 22.
3. А.С. 240789 СССР. Фиксированный аттенюатор/Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
4. А.С. 866617 СССР. Фиксированный аттенюатор/Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев//Б.И. 1981. Бюл. № 35.
5. **Веселов, Г.И.** К теории двухслойного диэлектрического волновода в цилиндрическом экране/Г.И. Веселов, Л.А. Любимов // Радиотехника и электроника. 1963. Т.8. №9. С. 1530–1536.
6. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями / С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1974. Т.17. № 11. С. 1703–1706.
7. **Шишков, Г.И.** О применении круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке в СВЧ аттенюаторах // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып.6. С. 46–53.
8. **Бунтилов, В.М.** Анализ затухания круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке / В.М. Бунтилов, А.Е. Иванов, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып.6. С. 65 – 68.
9. **Иванов, А.Е.** Расчет волноводов с резистивными пленками для тонкопленочных СВЧ аттенюаторов/А.Е. Иванов, Г.И. Шишков//Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике. 1997. Вып.1. С. 86 - 90.
10. **Бунтилов, В.М.** Влияние неравномерности поглощающего слоя пластинчатого резистора на ослабление аттенюатора/ В.М. Бунтилов, С.П. Макарычева, Г.И. Шишков// Техника средств связи. Сер. РИТ. 1979. Вып.7. С. 54 – 57.
11. **Бунтилов, В.М.** Улучшение параметров аттенюаторов с пластинчатым резистором/ В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков//Обмен опытом в радиопромышленности. 1970. Вып. 3. С. 88 – 90.
12. **Белов, Ю.Г.** Двухслойный экранированный эллиптический волновод с резистивной пленкой/Ю.Г. Белов, О.И. Раевская, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков//Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып.2. С. 39 – 45.

13. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод, перегороденный резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1975. Т.20. № 10. С. 2185–2186.
14. **Калмык, В.А.** Дисперсионные свойства прямоугольного волновода, перегороденного резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.А. Маркова, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1976. Т.21. № 9. С. 1978–1980.
15. **Калмык, В.А.** Некоторые особенности распространения волн в волноводах с резистивной пленкой / В.А. Калмык, Г.В. Павловская, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1977. Т.20. № 4. С. 585–589.
16. **Рудоясова, Л.Г.** Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой / Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 1. С. 43–46.
17. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод с анизотропной резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 78–79.
18. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства: каталог. Нижегородский НИПИ «Кварц». – Нижний Новгород, 2010.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

L.G. Rudojasova, G.I. Shishkov, V.V. Sherbakov

FINE REZISTIVNYE FILMS IN DEVICE SVF AND KVF

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose It is described physical bases of the work and are given technical features coaxial fixed broadband attenuator.

Design/methodology/approach The Basic researches round, elliptical and square-wave waveguides with resistive films, were conducted on base of the method of the partial areas with use the method of the surface current.

Findings The fine resistive of the film are used as absorbing element in composition SVCH hybrid-integral schemes, in device for direct measurement of the powers in SVCH range. Such films on dielectrics substrate are used as nodes relationship in waveguides directed coupler for ensuring the uniformities of the connecting weakening and factor to directivities. The fine resistive of the film has found using in design microstrip line of the issue as element of the suppression of the high types of the waves [2].

Research limitations/implications At calculation waveguides features of the considered structure was expected that fine consuming layer evenly portioned on surfaces of the substrate. However practically this far from is always executed. On degree of the uniformities of the sharing the film affects the technological process of the fixing layer and his tailorings, quality to surfaces of the substrate and other factors.

Originality/value The Results theoretical and experimental studies lumpy waveguides structures with fine resistive film prescribed in base of the developments broadband coaxial attenuator. There were are created fixed coaxial attenuators to models 148 working within the range of from direct current before 18 GGC, models 1016, working within the range of from direct current before 26,5 GGC and models 1007 - within the range of from direct current before 50 GGC.

Key words: resistive films, waveguide, dispersion features, lamellar resistors, fixed attenuators, weakening, inaccuracy.

УДК 681.5

О.С. Агашин, О.Н. Корелин

МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ СЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны базовые понятия и методы обработки цифровых сигналов, используемые для конструирования систем распознавания речи.

Ключевые слова: система распознавания речи, мел-кепстральные коэффициенты, окно Хэмминга, коэффициенты линейного предсказания, конечные точки слова, слуховой аппарат, цифровая обработка сигналов

Введение

В современных компьютерных системах все больше внимания уделяется построению интерфейса естественного ввода-вывода информации. Одним из перспективных направлений на сегодняшний день является использование систем речевого диалога, которая предполагает автоматический синтез и распознавание речи. Подобная система может быть встроена в различные приложения, например в системы голосового контроля, голосового доступа к информационным ресурсам, обучения языку с помощью компьютера, помощи недееспособным, доступа к чему-либо через системы голосовой верификации/идентификации.

При разработке системы автоматического распознавания речи, представляющей собой наиболее сложную подсистему речевого диалога, используют различные методы обработки информации. В настоящей статье собран основной теоретический материал по данной теме и описаны подходы, которые могут использоваться для создания базовой системы распознавания речи, на основе которой могут быть построены более сложные решения.

Основные режимы работы систем распознавания речи

Системы распознавания речи обычно имеют два режима: режим обучения и режим распознавания. Эти режимы используют общую функциональную часть (рис. 1), задача которой заключается в получении сигнала, предобработке фреймов, нахождении конечных точек слова и экстракции характеристик сигнала.

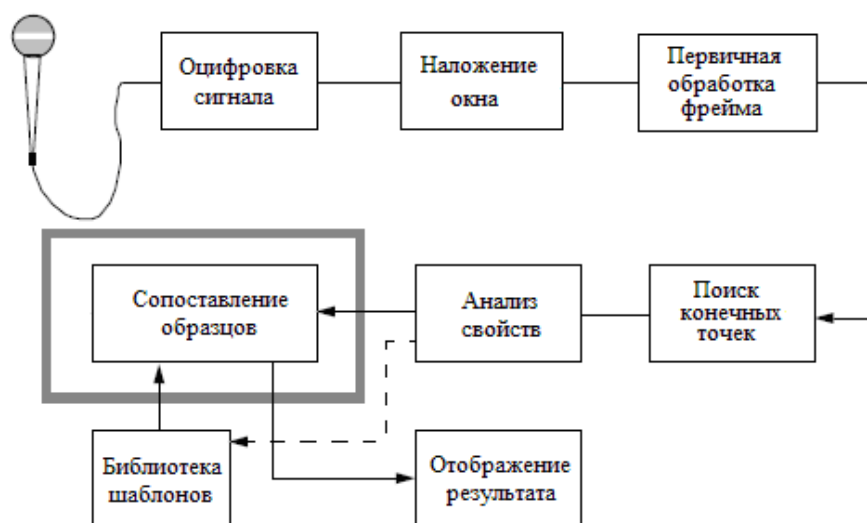


Рис. 1. Блок-схема системы распознавания речи

Дальнейшее поведение системы зависит от режима работы. Если система находится в режиме обучения, полученные на этапе выделения характеристик значения сохраняются в библиотеке шаблонов. При нахождении системы в состоянии распознавания, полученный набор значений сравнивается с наборами из библиотеки. Наилучший результат сравнения возвращается в качестве результата распознавания.

Подходы к решению задачи

Процесс решения задачи распознавания изолированных слов можно разделить на четыре основных этапа:

- ввод сигнала из внешней среды в систему;
 - нахождение конечных точек слова;
 - экстракция характеристик сигнала;
- определение результата распознавания.

Выделение слова из непрерывного потока входящей информации является сложной задачей в силу особенностей голоса, окружающей среды и аппаратуры, с помощью которой производится запись звукового сигнала. Человек может успешно распознавать речь, громкость которой меняется в очень широких пределах. Мозг человека способен отфильтровывать тихую речь от помех окружающей среды, например музыки или шума работающих приборов. В отличие от человеческого мозга, цифровая аппаратура очень чувствительна к внешним воздействиям подобного рода. Если микрофон стоит на столе, то при повороте головы или изменении положения тела, расстояние между ртом и микрофоном будет изменяться. Это приведет к изменению уровня выходного сигнала микрофона и соотношения сигнал/шум, что, в свою очередь, ухудшит надежность распознавания речи. Изменение интенсивности речи в процессе произношения, смягчение начальных и конечных звуков слова на практике приводят к тому, что конечные точки трудноотличимы от сигнала помехи, постоянно присутствующей в сигнале.

Частота оцифровки также имеет немаловажное значение. Человеческое ухо воспринимает звук в диапазоне частот от 16 Гц до 22 кГц. В действительности, границы слышимых частот зависят от конкретного человека – его возраста, пола и здоровья. По теореме Котельникова, аналоговый сигнал может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой строго большей удвоенной верхней частоты. Человеческому голосу соответствует диапазон частот 300–4000 Гц, следовательно, для того чтобы восстановить голосовой сигнал без потерь, необходимо использовать частоту дискретизации, большую 8 кГц. Оптимальное значение частоты в условиях рассматриваемой задачи – 12 кГц.

Проблема изменения интенсивности произношения заключается в том, что оцифрованный сигнал имеет различную амплитуду для одного и того же слова в зависимости от изменения расстояния между диктором и микрофоном, положения источника сигнала в пространстве, а также громкости издаваемого звука. Решением в данном случае является использование автоматической регулировки усиления (АРУ). Суть данного процесса заключается в автоматическом поддержании выходного сигнала постоянным по некоторому параметру (например, амплитуде простого сигнала или мощности сложного сигнала), независимо от амплитуды (мощности) входного сигнала (рис. 2). В используемом в разработке аппаратном обеспечении USB Stick eZdsp vc5505 присутствует блок обработки аудиоданных на основе микросхемы АIC3204. Данный кристалл имеет встроенную функцию автоматической регулировки усиления (АРУ), что позволяет без дополнительных задержек получить оцифрованный нормированный сигнал высокого качества, который можно использовать без дополнительной обработки. Автоматическая регулировка усиления также может быть реализована программно, но скорость работы системы будет значительно ниже.

Основной единицей обработки оцифрованного сигнала является фрейм – массив отсчетов, соответствующий определенному временному промежутку. Речь является нестационарным сигналом, характеристики которого часто меняются во времени, но известно, что для

большинства фонем, характеристики сигнала остаются постоянными в течение короткого промежутка времени (~5–100 мс) и в его пределах сигнал можно считать стационарным. Цифровые сигнальные процессоры имеют программную, а некоторые реализации и аппаратную поддержку специфических для обработки сигналов математических функций, таких как преобразование Фурье. И в том, и в другом случае размер массива входных параметров для этих функций должен быть кратен 2^n , поэтому для удобства и экономии вычислительных ресурсов размер фрейма также должен быть кратен этому значению. Оптимальным в данной реализации системы был выбран размер фрейма, равный 512 отсчетам и соответствующий ~43 мс, что удовлетворяет условию стационарности характеристик. Размер буфера для хранения оцифрованного сигнала кратен размеру фрейма и равен 12288, что соответствует 24 фреймам или ~1 с. Этого времени вполне достаточно для произношения коротких голосовых команд.

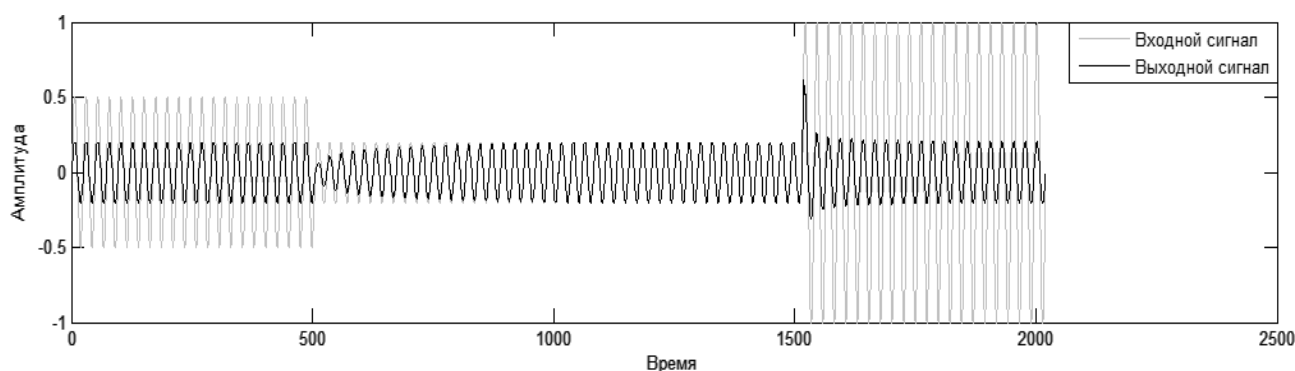


Рис. 2. Автоматическая регулировка усиления

Определение конечных точек слова

Задача определения моментов начала и окончания фразы является одной из важных задач в области обработки речи. Методы обнаружения конечных точек слова используются для отделения речи от окружающего шума, а также уменьшения числа арифметических операций, поскольку обрабатываются только те сегменты, в которых имеется речевой сигнал. Проблема отделения речи от помехи очень сложна, за исключением случаев очень большого отношения сигнал/шум, т.е. в случае высококачественных записей, выполненных в студийных условиях. В этом случае энергия даже наиболее слабых звуков превышает энергию шума и, таким образом, достаточно лишь измерить энергию сигнала. Но подобные условия записи, как правило, не встречаются в реальных условиях.

Для выделения слова из непрерывного потока информации в реальном масштабе времени может использоваться простой, но в то же время достаточно эффективный метод определения конечных точек Рабинера-Самбура, основанный на подсчете энергии фрейма и частоты переходов через нуль. Данный метод требует меньшего объема вычислений из-за отсутствия дополнительного преобразования сигнала из временной области в частотную.

Под энергией фрейма в данном случае понимается нормированная сумма абсолютных значений амплитуд дискретных отсчетов сигнала (1).

$$E = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^N A_n, \quad (1)$$

где K — коэффициент нормировки, N — длина фрейма.

Для вычисления значения энергии могут быть использованы иные методы расчета, например нахождение евклидовой нормы. Поскольку для сигнальных процессоров серии tms320vc5505, минимальной единицей памяти является 2 байта, а также тот факт, что разрешающая способность аудио-кодека, с помощью которого производится оцифровка звукового сигнала, равна 16 битам, то в качестве структур для хранения информации предпочтение отдается массивам, содержащим двухбайтовые элементы. Нормирование конечного значения необходимо для

того, чтобы избежать перегрузки разрядной сетки. Коэффициент нормировки выбирается из следующих соображений: поскольку разрешающая способность кодека равна 16 битам, а значение амплитуды может быть как положительным, так и отрицательным, то максимально возможная по абсолютному значению величина, которую можно сохранить в двухбайтовом знаковом типе, равна $2^{16-1} = 32768$, а максимальная сумма абсолютных значений амплитуд равна $32768 * 512$. Исходя из изложенного, а также того, что значение энергии хранится в двухбайтовом знаковом типе, коэффициент нормировки выбирается равным длине фрейма.

Частота переходов через нуль определяется как число раз, когда исходный сигнал меняет свой знак и его значение находится выше порога шума. Данная величина не нуждается в нормировке, поскольку максимальное значение параметра равно $N-1$.

На рис. 3 представлена временная диаграмма слова «раз» с наличием постоянной помехи. Поясним суть модифицированного метода Рабинера-Самбура для определения моментов начала и окончания слова с помощью рис. 4, а, б.

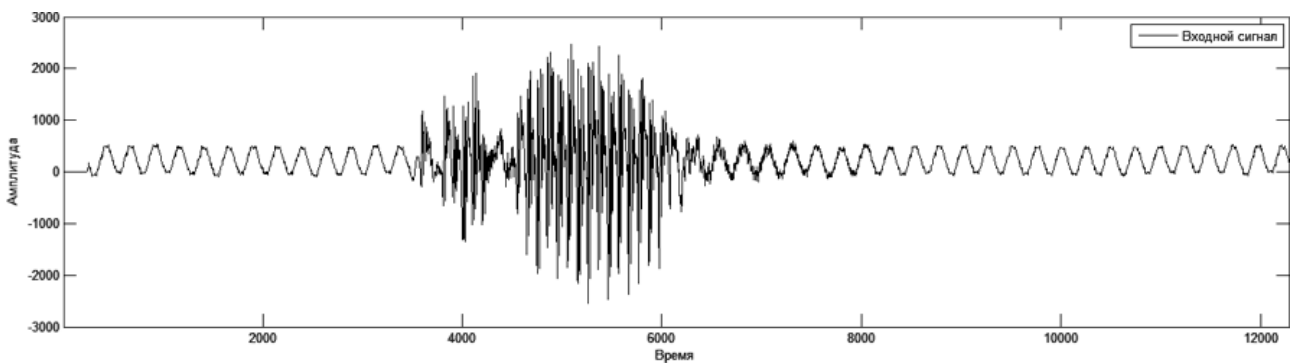


Рис. 3. Временная диаграмма слова «раз»

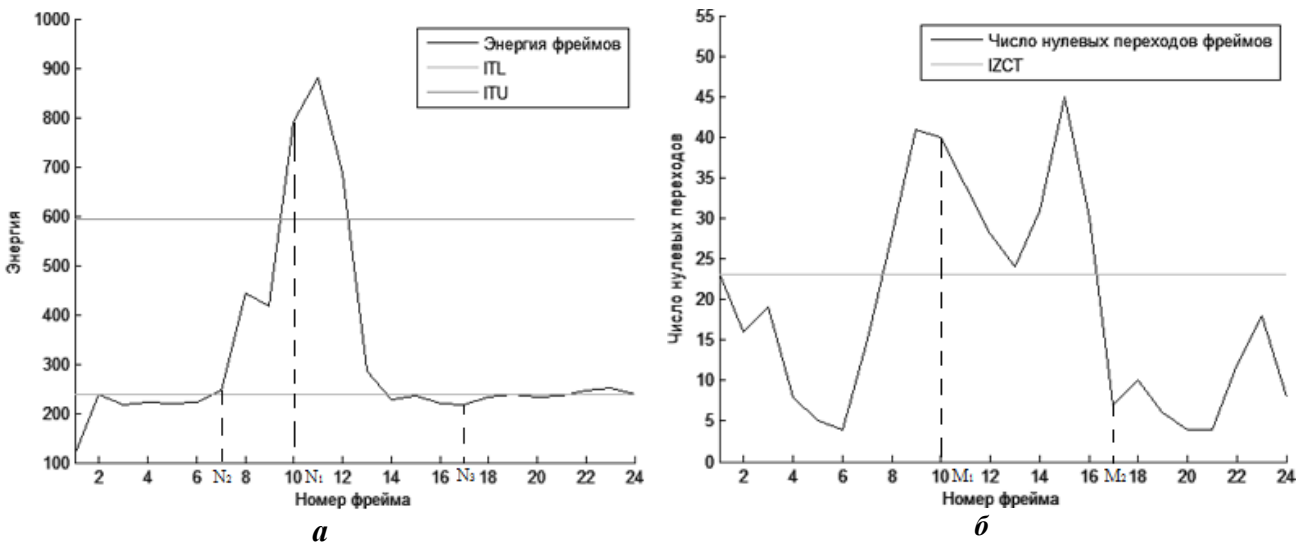


Рис. 4. Изменение значения:

а – величины энергии фреймов слова «раз»; б – нулевых переходов фреймов слова «раз»

Ввод сигнала в систему начинается после нажатия пользователем кнопки записи. Предполагается, что первые два фрейма, соответствующие ~ 86 мс не должны содержать в себе полезной информации. По этому участку определяются статистические характеристики шума – порог для среднего числа нулевых переходов (IZCT на рис. 4, б) и верхний и нижний пороги энергии сигнала (на рис. 4, а - ITU и ITL соответственно). После этого производится поиск фрейма, в котором величина средней энергии и числа переходов через нуль превышают соответствующие пороги ITU и IZCT (1.2). Если такой фрагмент найден (значения N_1 на

рис. 4, а) и M_1 на рис. 4, б) – это означает, что данный фрейм точно содержит полезный сигнал, и предполагается, что начало слова находится вне его пределов. Фреймом, содержащим начальную точку, считается тот фрагмент, для которого величина энергии впервые стала больше уровня ИТЛ, если двигаться в обратном направлении следования блоков (соответствует значению N_2 – рис. 4, а).

Для систем реального времени, где выполнение обратных шагов не желательно, данный алгоритм может быть модифицирован для обеспечения его работы строго в прямом направлении. В данном случае сначала происходит поиск точки N_2 , после чего ищется фрагмент, где выполняется условие (2). Если в процессе анализа сигнала встречается несколько положительных переходов через уровень ИТЛ, предполагаемым началом слова считается фрейм, соответствующий последнему переходу.

$$\begin{cases} E_i > ITU \\ Z_i > IZCT \end{cases} \quad (2)$$

Значение величины ИТУ определено экспериментально и равно величине, в 2.5 раза большей уровня ИТЛ.

После того, как начальный момент фразы определен (фрейм №7) и началась запись сигнала в память, параллельно с передачей данных происходит определение конечного момента слова. Принцип поиска схож с тем, как определяется начало слова, считается, что фрейм содержит конечную точку тогда, когда выполнено условие (3).

$$\begin{cases} E_i < ITU \\ Z_i < IZCT \end{cases} \quad (3)$$

После нахождения фрагмента, параметры которого соответствуют данному критерию, предполагается, что дальнейший сигнал не содержит полезной информации и сравним с фоновым шумом. Для сигнала, представленного на рис. 3, конечной точкой фразы считается фрейм №17, поскольку его энергия ниже уровня ИТЛ (точка N_3 на рис. 4, а) и число нулевых переходов впервые становится ниже уровня ИЗСТ (M_2 на рис. 4, б).

Выполнение одного лишь условия (2) не гарантирует точного определения конечной точки. Существуют слова, содержащие периоды тишины между фонемами, например, в слове «четыре» (рис. 5) между звуками «ч» и «т» присутствует промежуток провала характеристики, который можно принять за конец слова (диапазон [9:12] на рис. 6, а, б).

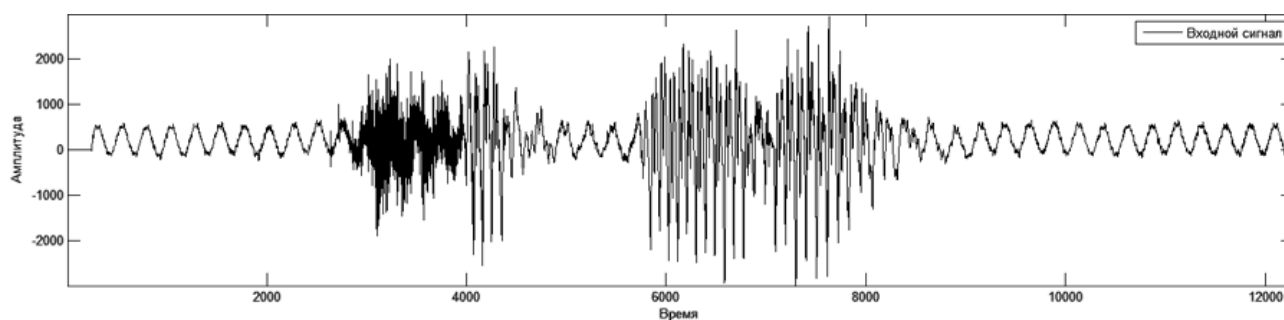


Рис. 5. Временная диаграмма слова «четыре»

Подобная проблема решается путем ввода значения максимальной длительности тишины – отрезка времени, в пределах которого значения параметров снова могут превысить соответствующие уровни. Если по истечении данного промежутка времени характеристики сигнала остались на уровне шума, то считается, что конец слова найден и находится в том фрагменте, в котором значение энергии впервые стало меньше уровня ИТЛ. Обычно промежуток тишины выбирается равным ~ 0.1 с. В текущей реализации он равен трём фреймам, что соответствует значению времени ~ 130 мс.

После нахождения начального и конечного фреймов возможно проведение дополнительного анализа выделенного сигнала для определения конечных точек на уровне отсчетов.

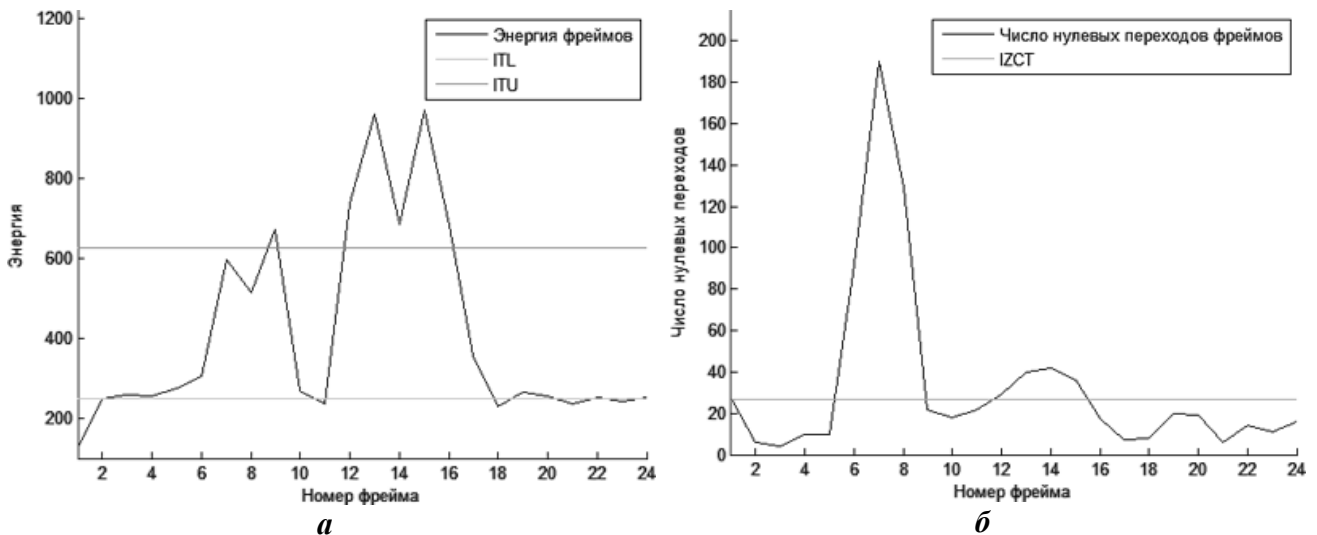


Рис. 6. Изменение значения:

а – величины энергии фреймов слова «четыре»; *б* – нулевых переходов фреймов слова «четыре»

Выделение характеристик

Как только слово было выделено из потока входных данных, начинается следующий этап процесса распознавания – выделение характеристик. Здесь могут применяться различные методики, например методика нахождения мел-кепстральных коэффициентов или коэффициентов линейного предсказания. Главной задачей на данном этапе является выделение неких параметров сигнала, причем число этих параметров должно быть минимально, чтобы ускорить сравнение с наборами параметров из библиотеки, и в то же время данные параметры должны быть такими, чтобы по ним можно было достаточно точно определить конкретное слово.

Мел-кепстральные коэффициенты

Эволюция сенсорных систем, которыми обладают живые существа, шла по пути: «различать, чтобы выжить». Слуховой аппарат человека как сенсорный анализатор обеспечивает различение звуков по их частотному составу. Однако реакция на звуковой стимул должна быть быстрой, а значит, обработка сигналов в ухе и нервной системе должна выполняться за небольшое время. Требования высокой частотной и временной различительной способности анализатора противоречивы, но в результате эволюции было оптимальное сочетание этих показателей.

Органы слуха человека обладают свойством частотного маскирования – ситуация, когда нормально слышимый звук накрывается другим громким звуком с близкой частотой. Данная характеристика зависит от частоты сигнала и варьируется от 100 Гц для низких слышимых частот до более 4000 Гц для высоких частот.

Следовательно, область слышимых частот можно разделить на несколько критических полос (принято деление на 24 критические полосы), которые обозначают падение чувствительности уха для более высоких частот. Можно считать критические полосы еще одной характеристикой звука, подобной его частоте. Однако, в отличие от частоты, которая абсолютна и не зависит от органов слуха, критические полосы определяются в соответствии со слуховым восприятием. В итоге они образуют некоторые меры восприятия частот, для которых введены единицы измерения – барк и мел.

Шкала барков (рис. 7, *а*) связана с критическими полосами слуха, и поскольку ширина этих полос неравномерна, увеличивается с возрастанием частоты звуковых колебаний, то и сама является неравномерной. Прямая и обратная зависимости между высотой звука в барках и частотой тона в Гц определяется формулами (4) и (5) соответственно:

$$b = 13 \operatorname{atan}(0.00076 * f) + 3.5 \operatorname{atan}\left(\frac{f}{7500}\right)^2 \quad (4)$$

$$f = \frac{52548}{b^2 - 52.56b + 690.39} \quad (5)$$

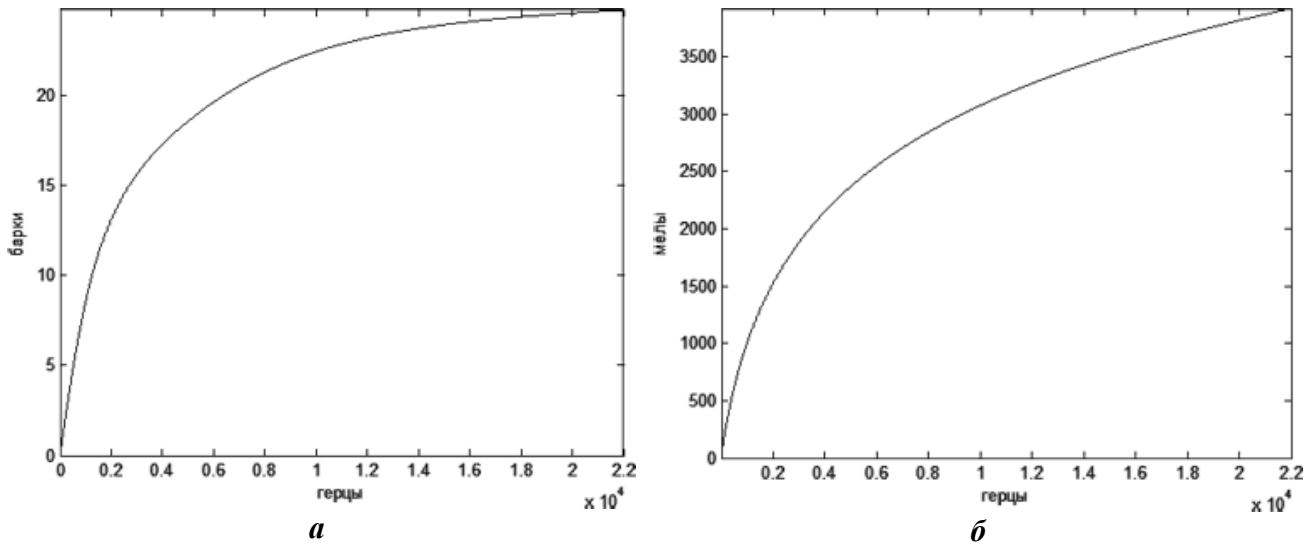


Рис. 7. Для слышимого диапазона частот
a – барк-шкала; *б* – мел-шкала

Неравномерной также является и шкала мелов (рис. 7, *б*), основанная на статистической обработке большого количества данных о субъективном восприятии высоты звуковых тонов. Результаты исследований показывают, что высота звука связана главным образом с частотой колебаний, но зависит также от уровня громкости звука и его тембра. Прямая и обратная зависимости между высотой звука в мелах и частотой тона в Гц определяется формулами (6) и (7) соответственно:

$$m = 1127.01048 \ln\left(1 + \frac{f}{700}\right), \quad (6)$$

$$f = 700 \left(e^{\frac{m}{1127.01048}} - 1\right) \quad (7)$$

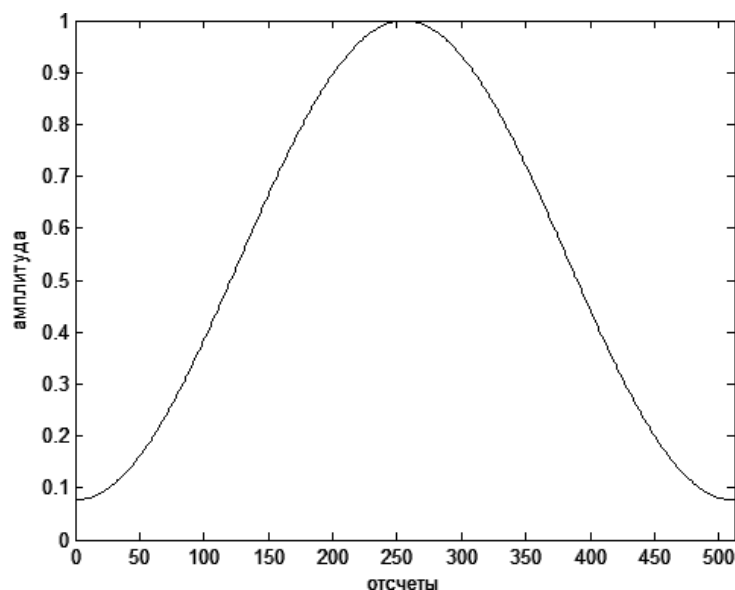


Рис. 8. Окно Хамминга

Как уже было отмечено, частотный диапазон человеческого голоса весьма ограничен и располагается в интервале от 300 до 4000 Гц. Из данного факта следует, что путем моделирования полосового фильтра можно отбросить частотные составляющие, которые находятся за пределами этого диапазона и, соответственно, не несут смысловой нагрузки.

Исследуемый сигнал разделяется на фреймы на основе метода периодограмм Уэлча – вектор отсчетов сигнала делится на перекрывающиеся сегменты (как правило, используется 50%-ное перекрытие), после чего каждый фрейм умножается на весовую функцию и для него вычисляется дискретное преобразование Фурье (8). В качестве весовой функции выбрано окно Хамминга (9), представленное на рис. 8, но могут быть использованы и другие виды окон, например, окно Ханна. Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра на стыках фреймов.

$$F_m = \sum_{n=1}^N f_n \cdot w_{n-m} \cdot e^{-j\omega n} \quad (8)$$

$$w_n = 0.53836 - 0.46164 \cos \frac{2\pi n}{N-1} \quad (9)$$

Исследования в области психофизического восприятия показали, что основная значимая информация содержится в действительном частотном спектре, поэтому после выполнения преобразования Фурье для дальнейшего анализа выделяется действительный спектр сигнала, а информация о фазе может быть опущена. При помощи смоделированного полосового фильтра отбрасывается информация о частотных составляющих, не находящихся в диапазоне [300, 4000] Гц. Затем на полученный фрейм накладываются взвешенные треугольной функцией перекрывающиеся окна, у которых значения центральных частот изменяются нелинейно в соответствии с мел-шкалой (рис. 9). Величины центральных частот вычисляются следующим образом:

- задается количество мел-фильтров и границы диапазона частот, для которого будет производиться фильтрация;
- в соответствии с формулой (6) выполняется преобразование границ диапазона из Гц в мел и вычисляется шаг изменения частоты n по формуле (10);
- для каждого значения из диапазона $[m_{\max}, m_{\min}]$ с шагом n выполняется обратное преобразование из мел в Гц (1.7).

$$n = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{k} \quad (10)$$

где m_{\max}, m_{\min} – границы диапазона в мелах; k – количество мел-фильтров.

В пределах полученных окон вычисляются средние значения действительного спектра, в результате чего получается сглаженный сильно коррелированный мел-спектр с различной детализацией диапазонов частот психофизической модели звукового восприятия. На рис. 10, а, б изображен спектр случайного сигнала и его сглаженное мел-представление.

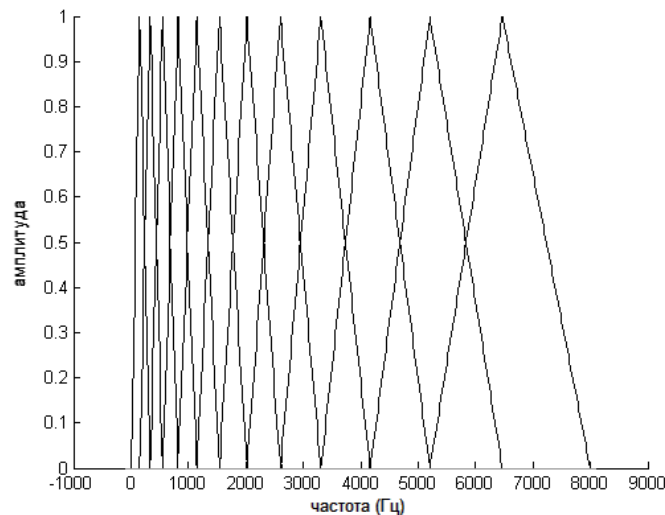


Рис. 9. Применение банка мел-фильтров

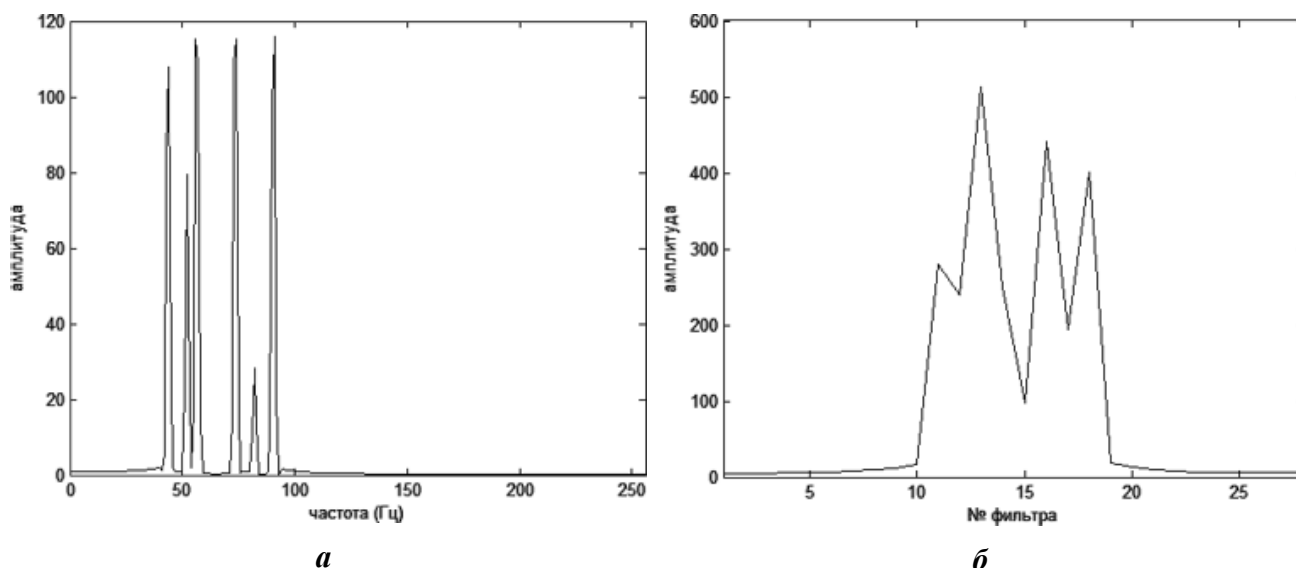


Рис. 10. Спектр сигнала:
а – частотный; б – мел-спектр сигнала для банка из 28 фильтров

Для уменьшения количества выходных параметров и декорреляции компонентов выполняется последний шаг вычисления мел-кепстральных коэффициентов. Для этого в литературе предлагается использовать метод главных компонент, который иногда называют преобразованием Карунена-Лоэва или методом Хотеллинга. В области обработки речевых сигналов для уменьшения вычислений можно использовать дискретно-косинусное преобразование (11), которое дает схожие результаты.

$$X_k = \alpha_k \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right], \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (11)$$

где

$$\alpha_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & \text{при } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{при } k \neq 0 \end{cases}$$

Полученный набор значений называется мел-кепстральными коэффициентами. Обычно сохраняется только первые несколько элементов (от 8 до 16), по которым в дальнейшем производится идентификация сигнала.

Коэффициенты линейного предсказания

Кодирование с линейным предсказанием – это техника кодирования речевой информации путем моделирования голосового тракта. В соответствии с моделью, человек может производить два типа звуков: вокализованные и невокализованные. Если голосовые связки вибрируют при прохождении через них воздуха из легких, то производимые при этом звуки называются вокализованными. Звуки, полученные при участии только языка, зубов и губ, называются невокализованными.

Для обоих типов звуков голосовой тракт может быть представлен как последовательность цилиндров различных радиусов с различным значением энергии на границах между цилиндрами. Математически данную модель можно представить в виде линейного фильтра, возбуждаемого основной частотой для представления вокализованных звуков, либо белым шумом для невокализованных.

Задача анализа на основе линейного предсказания – получить параметры, необходимые для воссоздания исходного звука: тип звука, значение основной частоты, коэффициенты фильтра. Цель кодирования с линейным предсказанием заключается в моделировании сигнала как линейной комбинации предыдущих отсчетов (12). Данный метод является достаточно эффективным, поскольку речь – это высоко коррелированный в течение короткого промежутка времени сигнал, а значит предсказание может быть выполнено с минимальной ошибкой. В задаче распознавания речи данный метод применяется для моделирования спектра сигнала как авторегрессионного процесса.

$$s(n) = - \sum_{i=1}^{N_{lp}} a_{N_{lp}}(i) * s(n - i) + e_n, \quad (12)$$

где N_{lp} – порядок предсказания (количество коэффициентов модели); $a_{N_{lp}}$ – коэффициенты линейного предсказания; e_n – функция ошибки модели (различие между предсказанным и реальным значениями).

Учитывая то, что квадратичная ошибка должна быть минимальна, коэффициенты линейного предсказания определяются из следующей системы нормальных уравнений, представленной в матричном виде:

$$R_{N_{lp}} a_{N_{lp}} = -r_{N_{lp}} \quad (13)$$

где

$$R_{N_{lp}} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{N_{lp}-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{N_{lp}-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{N_{lp}-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{N_{lp}-1} & r_{N_{lp}-2} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{N_{lp}} = [a_1(1) \quad \dots \quad a_{N_{lp}}(N_{lp})]^T$$

$$r_{N_{lp}} = [r_1 \quad \dots \quad r_{N_{lp}}]^T$$

где r_k – k -й коэффициент автокорреляции речевого сигнала, взвешенного оконной функцией w (обычно используют окно Хамминга) (14).

$$r_k = \sum_{n=k}^{N-1} w(n) * s(n) * w(n - k) * s(n - k). \quad (14)$$

Коэффициенты линейного предсказания вычисляются следующим образом:

$$a_{N_{lp}} = -R_{N_{lp}}^{-1} r_{N_{lp}}. \quad (15)$$

Матрица автокорреляции $R_{N_{lp}}$ имеет структуру Топлица, для решения которой существует эффективный алгоритм Левинсона-Дарбина, суть которого можно кратко представить в псевдокоде:

$$\left. \begin{aligned} & e_0 = r_0 \\ & \text{for } 1 \leq m \leq N_{lp} \\ & \left\{ \begin{aligned} & a_m(0) = 1 \\ & a_m(m) = k_m = \frac{-r_m - \sum_{i=1}^{m-1} a_{m-1}(i) * r_{m-1}}{e_{m-1}} \\ & a_m(j) = a_{m-1}(j) + k_m * a_{m-1}(m - j), \quad j = \overline{1, m-1} \\ & e_m = e_{m-1} * (1 - k_m^2) \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\}$$

Для уменьшения количества сохраняемых параметров к полученным на предыдущем шаге коэффициентам применяется преобразование (16) для расчета кепстральных коэффициентов.

$$c_i = [DCT(\ln(a_i^2))]^2 \quad (16)$$

где DCT – дискретно-косинусное преобразование (11).

Динамическое выравнивание времени

Заключительным этапом распознавания является сопоставление входного образа с набором эталонных образов из библиотеки. Результатом распознавания является индекс библиотечного шаблона, который имеет наибольшее сходство с исходным блоком. Но различные реализации речевых образов, относящихся к одному и тому же классу, могут значительно отличаться друг от друга по длительности: это связано с нестабильностью темпа речи диктора, вызванной влиянием интонации, акцента и т.п. Для корректного сопоставления речевых образов необходимо производить их выравнивание по длине. Выравнивание путём линейного сжатия или растяжения одной реализации слова до величины другой не решает данную задачу, поскольку речевой сигнал протекает во времени неравномерно. Это свойство речи выражается в неравномерном изменении длительности звуков слова при изменении длительности слова в целом, поэтому сопоставление целесообразно выполнять с помощью нелинейной временной нормализации.

Для нелинейного выравнивания сопоставляемых образов используется алгоритм, основанный на определении наилучшего соответствия входных и эталонных речевых образов, известный как метод динамического выравнивания времени (dynamic time warping). Суть алгоритма заключается в следующем. Обозначим расстояние между i -м элементом массива параметров входного образа и j -м элементом массива параметров эталона как D_{ij} . Для нахождения элементов входного вектора, наилучшим образом соответствующих элементам эталона, определяется матрица C размера $M \times N$ по следующим формулам:

$$\begin{aligned} C_{1,1} &= D_{1,1} \\ C_{i,1} &= D_{i,1} + C_{i-1,1}, \quad i = \overline{2..M} \\ C_{1,j} &= D_{1,j} + C_{1,j-1}, \quad j = \overline{2..N} \\ C_{i,j} &= D_{i,j} + \min[C_{i-1,j}, C_{i-1,j-1}, C_{i,j-1}], \quad i = \overline{2..M}, j = \overline{2..N} \end{aligned} \quad (17)$$

где M – количество элементов входного образа; N – количество элементов эталона.

Расстояние D_{ij} может вычисляться различными способами, например, как евклидово расстояние (18), манхеттенское расстояние (19) или расстояние Итакуры-Саито (20). Последнее используется в случае, если вектор характеристик содержит коэффициенты линейного предсказания.

$$D_{ij} = \sqrt{x_i^2 + x_j^2} \quad (18)$$

$$D_{ij} = |x_i - x_j| \quad (19)$$

$$D_{ij} = \frac{x_j}{x_i} - \ln\left(\frac{x_j}{x_i}\right) - 1 \quad (20)$$

На рис. 11 ломаной линией соединены элементы матрицы C , соответствующие наиболее схожим элементам входного слова и эталона. Вертикальный отрезок представляет случай, когда несколько элементов эталона соответствует одному элементу входного вектора. Горизонтальному отрезку соответствует случай, когда несколько элементов массива входных параметров соответствуют одному элементу эталона. Элемент $C_{M,N}$ содержит суммарную оценку схожести двух векторов характеристик. После сравнения параметров входного слова со всеми шаблонами из библиотеки среди полученных суммарных оценок выбирается минимальная, а индекс соответствующего ей шаблона выводится в качестве результата распознавания.

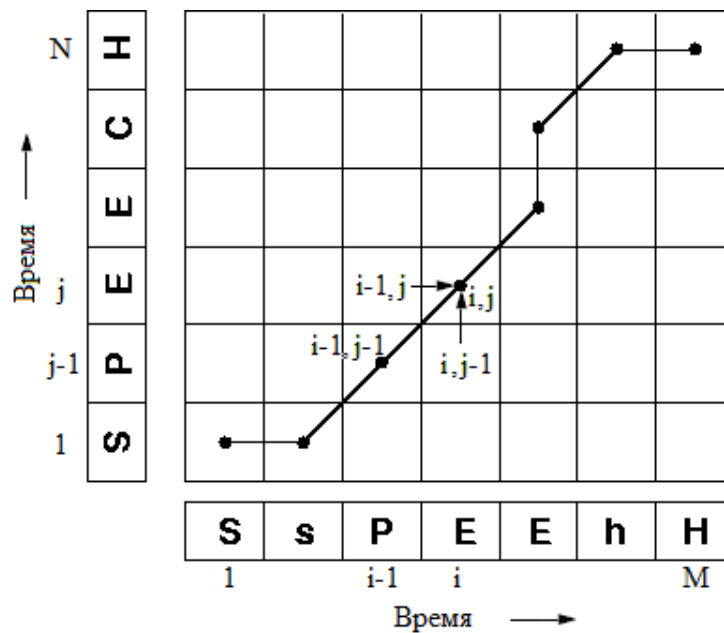


Рис. 11. Динамическое выравнивание времени

Рассмотренные в статье методы обработки сигналов были реализованы в виде библиотеки функций C++ для использования на цифровых сигнальных процессорах tms320vc5505 марки Texas Instruments. На основе данной библиотеки была создана тестовая дикторозависимая система распознавания изолированных слов с маленьким размером словаря.

Библиографический список

1. **Бондаренко, И.Ю.** Анализ эффективности метода нечёткого сопоставления образов для распознавания изолированных слов / И.Ю. Бондаренко, О.И. Федяев // Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2006: сб. трудов VI междунар. науч. конференции; под ред. Т.А. Таран. – К.: Просвіта, 2006. С. 20–27.
2. Рабинер Л.Р., Цифровая обработка речевых сигналов: [пер. с англ.] / Л.Р. Рабинер, Р.В. Шафер. – М.: Радио и связь, 1981. – 251 с.
3. **Сэлмон, Д.** Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэлмон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
4. Beth Logan, Mel frequency cepstral coefficients for music modeling [Электронный ресурс]. // Cambridge research laboratory, Compaq computer corporation. - Режим доступа: http://apotheca.hpl.hp.com/ftp/pub/compaq/CRL/publications/logan/musicir_paper.pdf
5. Joseph Picone, Fundamentals of speech recognition [Электронный ресурс]. // Mississippi state university, Department of electrical and computer engineering. - Режим доступа: http://www.isip.piconepress.com/publications/courses/msstate/ece_8463/lectures/current/
6. Cedrick Collomb, Linear Prediction and Levinson-Durbin Algorithm / Cedrick Collomb. [Электронный ресурс]. // - Режим доступа: <http://www.emptyloop.com/technotes/A%20tutorial%20on%20linear%20prediction%20and%20Levinson-Durbin.pdf>
7. Mel scale - Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. // - Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Mel_scale, свободный. – Загл. с экрана.
8. Bark scale - Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. // - Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Bark_scale, свободный. – Загл. с экрана.

Дата поступления
в редакцию 10.10.2012

O. Agashin, O. Korelin

**GENERAL METHODS OF DIGITAL PROCESSING OF THE SPEECH SIGNAL
IN CASE OF ISOLATED WORDS RECOGNITION PROBLEM WITH DSP APPLICATION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose Development and deployment the real-time speech recognition systems for controlling industrial or home electronics. Providing fast and secure solution based on energy effective and independent of any operating system hardware with small form factor.

Approach A theoretical framework is proposed combine distinct techniques and methods preferred for speech recognition. Optimization of finding end points and decision making algorithms provides the most efficient solution for interactive control of small systems.

Research limitations/implications The present study provides a starting-point for further research on the speech recognition problem. For example, Hidden Markov model, wavelets and neuron network could be involved for making more precise prediction.

Value Besides, new software library providing API for processing of digital signals developed during the research. It supplies the base functionality necessary for building a simple real-time recognition system coupled with DSP-based hardware.

Key words: isolated words, speech recognition, digital signal processing, search endpoints, hardware based solution.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

D.E. Pelinovsky^{1,2}, A.R. Giniyatullin¹, Y.A. Panfilova¹

ON SOLUTIONS OF A REDUCED MODEL FOR THE DYNAMICAL EVOLUTION OF CONTACT LINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia¹
McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada²

Purpose: The goal of this study is to solve the linear advection–diffusion equation with a variable speed on a semi-infinite line. The variable speed is determined by an additional condition at the boundary, which models the dynamics of a contact line of a hydrodynamic flow at 180° contact angle.

Approach: The investigation is carried out by an application of Laplace transform in spatial coordinate. Properties of Green's function for the fourth-order diffusion equation are used in analysis of implicit solutions of the linear advection–diffusion equation.

Findings: We prove local existence of solutions of the initial-value problem associated with the set of over-determining boundary conditions in the form of the fractional power series in time variable. We also analyze the explicit solutions in the case of a constant speed to show that the inhomogeneous boundary condition induces change of convexity of the flow at the contact line in a finite time.

Key words: linear advection–diffusion equation, variable speed, contact line, Laplace transform, Green's function.

1. Introduction

Contact lines are defined by the intersection of the rigid and free boundaries of the flow. Flows with the contact line at 180° contact angle were discussed in [2, 4], where corresponding solutions of the Navier-Stokes equations were shown to have no physical meanings. Recently, a different approach based on the lubrication approximation and thin film equations was developed by Benilov & Vynnycky [1].

As a particularly simple model for the flow shown on Fig. 1, the authors of [1] derived the linear advection–diffusion equation for the free boundary $h(x,t)$ of the flow:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial^4 h}{\partial x^4} = V(t) \frac{\partial h}{\partial x}, \quad x > 0, \quad t > 0. \quad (1)$$

The contact line is fixed at $x = 0$ in the reference frame moving with the velocity $-V(t)$ and is defined by the boundary conditions $h(0,t) = 1$ and $h_x(0,t) = 0$. The flux conservation is expressed by the boundary condition $h_{xxx}(0,t) = -\frac{1}{2}$ (set $\alpha^3 = 3$ in equations (5.12)–(5.13) in [1]).

We assume that $h, h_x, h_{xx} \rightarrow 0$ as $x \rightarrow \infty$: in fact, any constant value of h at infinity is allowed thanks to the invariance of the linear advection–diffusion equation (1) with respect to the shift and scaling transformations. With three boundary conditions at $x = 0$ and the decay conditions as $x \rightarrow \infty$, the initial-value problem for equation (1) is over-determined and the third (over-determining) boundary condition at $x = 0$ is used to find the dependence of V on t .

We shall consider the initial-value problem with the initial data $h(x,0) = h_0(x)$ for a suitable function h_0 . In particular, we assume that the profile $h_0(x)$ decays monotonically to zero as $x \rightarrow \infty$

and that 0 is a non-degenerate maximum of h_0 such that $h_0(0) = 1$, $h'_0(0) = 0$, and $h''_0(0) < 0$, see Fig. 1. If the solution $h(x,t)$ loses monotonicity in x during the dynamical evolution, for instance, due to the value of $h_{xx}(0,t)$ crossing 0 from the negative side, then we say that the flow becomes non-physical for further times and the model breaks. Simultaneously, this may mean that the velocity $V(t)$ blows up, as it is defined for sufficiently strong solutions of the advection–diffusion equation (1) by the pointwise equation:

$$h_{xxxx}(0,t) = V(t) h_{xx}(0,t), \tag{2}$$

which follows by differentiation of (1) in x and setting $x \rightarrow 0$.

The main claim of [1] based on numerical computations of the reduced equation (1) as well as more complicated thin-film equations is that for any suitable h_0 , there is a finite positive time t_0 such that $V(t) \rightarrow -\infty$ and $h_{xx}(0,t) \rightarrow 0^-$ as $t \uparrow t_0$. Moreover, it is claimed that $V(t)$ behaves near the blowup time as the logarithmic function of t , e.g.

$$V(t) \sim C_1 \log(t_0 - t) + C_2 \quad \text{as } t \uparrow t_0, \tag{3}$$

where C_1, C_2 are positive constants.

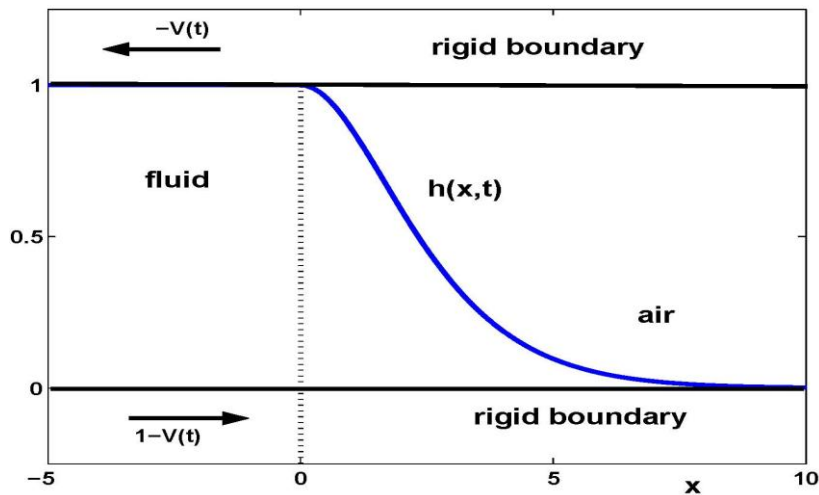


Fig. 1. Schematic picture of the flow between rigid boundaries

This paper is devoted to analytical studies of solutions of the advection–diffusion equation (1) and the effects coming from the inhomogeneous boundary condition $h_{xx}(0,t) = -\frac{1}{2}$ associated with the flux conservation. In particular, we rewrite the evolution equation for the variable $u = h_x$ in the form

$$u_t + u_{xxx} = V(t) u_x, \quad x > 0, \quad t > 0, \tag{4}$$

subject to the boundary conditions at the contact line

$$u(0, t) = 0, \quad u_{xx}(0,t) = -\frac{1}{2}, \quad u_{xxx}(0,t) = 0, \quad t \geq 0, \tag{5}$$

where the boundary conditions $u_{xxx}(0,t) = h_{xxxx}(0,t) = 0$ follows from the boundary conditions $h(0,t) = 1$ and $h_x(0,t) = 0$ as well as the advection–diffusion equation (1) as $x \rightarrow 0$.

To simplify the problem, we shall also consider the model for given constant $V(t) = V_0$ and drop the third over-determining boundary conditions at the contact line:

$$\begin{cases} u_t + u_{xxxx} = V_0 u_x, & x > 0, t > 0, \\ u(0, t) = 0, u_{xx}(0, t) = -\frac{1}{2}, & t \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Both problems (4)–(5) and (6) are considered under the initial condition $u(x, 0) = u_0(x)$ with $u_0(0) = 0$, $u'_0(0) < 0$, and $u''_0(0) = -\frac{1}{2}$ as well as the decay condition $u, u_x, u_{xx} \rightarrow 0$ as $x \rightarrow \infty$.

Using Laplace transform in spatial coordinate and Green's function for the fourth-order diffusion equation, we derive an explicit solution of the boundary-value problem (6). In the case $V_0 = 0$, we show that the inhomogeneous boundary condition $h_{xxx}(0, t) = u_{xx}(0, t) = -\frac{1}{2}$ leads to the secular growth of the boundary value $h_{xx}(0, t) = u_x(0, t)$ to positive infinity as $t \rightarrow \infty$. As a result, even if $h_{xx}(0, t) < 0$ initially, the convexity of the solution $h(x, t)$ at the boundary $x = 0$ is lost in a finite time. In the case $V_0 < 0$, we show that no secular growth is observed but the convexity of the solution at the boundary is still lost in a finite time. Applying the same method, we prove local existence of solutions of the original boundary-value problem (4)–(5) in the form of fractional power series in time variable t . This prepares us to tackle the original conjecture on the finite-time blow-up in the dynamical evolution of the reduced model (1), which is still left opened for forthcoming studies.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 reports explicit solutions of the boundary-value problem (6) for $V_0 = 0$ and $V_0 \neq 0$. Section 3 gives the local existence result for the boundary-value problem (4)–(5). Appendix A reviews properties of Green's function for the fourth-order diffusion equation.

2. Solution for $V(t) = V_0$

Because the coefficient $V(t)$ changes in time variable t in the framework of the original advection-diffusion equation (1), the Laplace transform in time t is not a useful method for this problem. On the other hand, the boundary-value problem (1) is formulated on half-line, and hence we can use Laplace transform in space variable x :

$$U(p, t) = \int_0^{\infty} e^{-px} u(x, t) dx, \quad p > 0. \quad (7)$$

We shall develop this method to solve the boundary-value problem (6). The explicit solution of this problem will help us to analyze the effects of the inhomogeneous boundary condition $u_{xx}(0, t) = -\frac{1}{2}$ and the constant advection term $V(t) = V_0$ on the temporal dynamics of the advection-diffusion equation with the fourth-order diffusion.

Let us denote the boundary values:

$$\beta(t) = u_x(0, t), \quad \gamma(t) = u_{xxx}(0, t). \quad (8)$$

Using Laplace transform (7), we rewrite an evolution problem associated with the advection-diffusion equation (6):

$$\begin{cases} U_t + p^4 u - V_0 p U = \gamma(t) - \frac{1}{2} p + p^2 \beta(t), & t > 0, \\ U(p, 0) = U_0(p), \end{cases} \quad (9)$$

where $U_0(p)$ is the Laplace transform of $u_0(x) = u(x, 0)$. By using the variation of parameters, we obtain

$$U(p, t) = U_0(p)e^{-tp^4 + tV_0p} + \int_0^t e^{-(t-s)p^4 + (t-s)V_0p} \left(\gamma(s) - \frac{1}{2} p + p^2 \beta(s) \right) ds. \tag{10}$$

Using the inverse Laplace transform, we write this solution in the form:

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{px-tp^4+tV_0p} \left(\int_0^\infty e^{-py} u_0(y) dy \right) dp + \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{px} \left(\int_0^t e^{-(t-s)p^4+(t-s)V_0p} \left(\gamma(s) - \frac{1}{2} p + p^2 \beta(s) \right) ds \right) dp, \tag{11}$$

where $Re(c) > 0$ so that the singularities of the integrand in the complex p -plane remain to the left of the contour of integration.

If $t > 0$ is finite, $u_0 \in L^1(R_+)$, and $\beta, \gamma \in L_{loc}^\infty(R_+)$, Fubini's Theorem implies that the integration in p and in y, s can be interchanged. Let us introduce Green's function $G_t(x)$ for the fourth-order diffusion equation (see Appendix A):

$$G_t(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{px-tp^4} dp = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-tk^4+ikx} dk = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-tk^4} \cos(kx) dk.$$

Using Green's function, we can rewrite the solution (11) in the implicit form:

$$u(x, t) = \int_0^\infty G_t(x + V_0t - y) u_0(y) dy - \frac{1}{2} \int_0^t G'_{t-s}(x + V_0(t-s)) ds + \int_0^t [G_{t-s}(x + V_0(t-s)) \gamma(s) + G''_{t-s}(x + V_0(t-s)) \beta(s)] ds. \tag{12}$$

The solution is said to be in the implicit form, because the functions $\beta(t)$ and $\gamma(t)$ determined by the boundary conditions (8) are not specified yet.

We verify that $\lim_{x \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$, no matter what β and γ are, as long as they are bounded function of t . Indeed, by the Lebesgue's Dominated Convergence Theorem, we have

$$\int_0^\infty G_t(x + V_0t - y) u_0(y) dy \rightarrow 0 \quad \text{as } x \rightarrow \infty$$

if $u_0 \in L^1(R_+)$, because $G_t(x) \rightarrow 0$ as $x \rightarrow \infty$. On the other hand, the other three convolution integrals are bounded if $\beta, \gamma \in L_{loc}^\infty(R_+)$ and $t > 0$ is finite, because G_t, G'_t and G''_t have integrable singularities at $t = 0$. By the same Lebesgue's Dominated Convergence Theorem, these three integrals decay to zero as $x \rightarrow \infty$.

It follows from this construction that the only way to determine the functions $\beta(t)$ and $\gamma(t)$ in the solution (12) is to use the boundary conditions at $x = 0$, e.g. the boundary conditions $u(0, t) = 0$ and $u_x(0, t) = \beta(t)$. In what follows, this step is performed separately for the cases of $V_0 = 0$ and $V_0 \neq 0$.

2.1. Case $V_0 = 0$

We rewrite the solution (12) for $V_0 = 0$:

$$u(x, t) = \int_0^\infty G_t(x - y) u_0(y) dy - \frac{1}{2} \int_0^t G'_{t-s}(x) ds + \int_0^t [G_{t-s}(x) \gamma(s) + G''_{t-s}(x) \beta(s)] ds. \tag{13}$$

Using (A.3) and (A.4) for Green's function $G_t(x)$ and the boundary condition $u(0, t) = 0$, we evaluate this expression at $x = 0$ and obtain an integral equation for β and γ :

$$-\frac{1}{4\pi}\Gamma\left(\frac{1}{4}\right)\int_0^t\frac{\gamma(s)}{(t-s)^{1/4}}ds+\frac{1}{4\pi}\Gamma\left(\frac{3}{4}\right)\int_0^t\frac{\beta(s)}{(t-s)^{3/4}}ds=\int_0^\infty G_t(-y)u_0(y)dy. \quad (14)$$

To use the boundary condition $u_x(0,t) = \beta(t)$, we shall recall from equation (A.5) that the function $G_t''(x)$ behaves like $O(t^{-1})$ for any $x > 0$ and hence is not integrable in t at $t = 0$. Therefore, we have to be careful to differentiate the solution in the above convolution form. The last term of the solution (13) can be computed by using the Fourier transform:

$$v(x,t):=\int_0^t G_{t-s}''(x)\beta(s)ds=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}(ik)^2e^{ikx}\left(\int_0^te^{-k^4(t-s)}\beta(s)ds\right)dk.$$

Differentiating this expression in x and integrating by parts in s , we obtain

$$\begin{aligned} v_x(x,t) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}(ik)^3e^{ikx}\left(\int_0^te^{-k^4(t-s)}\beta(s)ds\right)dp = \frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{e^{ikx}}{k}\left(\int_0^t\frac{d}{ds}\left(e^{-k^4(t-s)}\right)\beta(s)ds\right)dp \\ &= \frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{e^{ikx}}{k}\left(\beta(t)-\beta(0)e^{-k^4t}-\int_0^te^{-k^4(t-s)}\beta'(s)ds\right)dp \\ &= \frac{1}{2}\beta(t)-\beta(0)H_t(x)-\int_0^tH_{t-s}(x)\beta'(s)ds, \end{aligned} \quad (15)$$

where

$$H_t(x):=\frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{e^{-tk^4+ikx}}{k}dk=\frac{1}{\pi}\int_0^\infty\frac{e^{-tk^4}\sin(kx)}{k}dk=\int_0^xG_t(y)dy. \quad (16)$$

Here we note that all integrals are evaluated in the principal value sense, because the half-residue at $k = 0$ is canceled out in the resulting expression (15). Also we note that the decay of $v_x(x,t)$ to zero as $x \rightarrow \infty$ is satisfied because of the symmetry and normalization of G_t in (A.6). We can now use the boundary condition $u_x(0,t) = \beta(t)$ to obtain the exact value for $\beta(t)$:

$$\beta(t)=2\int_0^\infty G_t'(-y)u_0(y)dy-\int_0^t G_{t-s}''(0)ds=2\int_0^\infty G_t'(-y)u_0(y)dy+\frac{\Gamma(3/4)}{\pi}t^{1/4}. \quad (17)$$

After $\beta(t)$ is found uniquely from (17), $\gamma(t)$ is found uniquely from the integral equation (14). This computation completes the construction of the exact solution of the boundary-value problem (6) for $V_0 = 0$ (see also [5] for other solutions of this fourth-order diffusion equation). Now we turn to the analysis of the solution thus obtained.

Theorem 1. Consider the advection-diffusion equation (6) for $V_0 = 0$ with the initial data $u_0 \in L^1(R_+)$. Then, there exists a solution $u \in L^\infty(R_+ \times R_+)$ of the evolution problem in the explicit form (13), where $\beta, \gamma \in L^\infty_{loc}(R_+)$ are defined by (14) and (17) and $\lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t) = +\infty$.

Proof. The convolution integral in the explicit expression (17) can be analyzed from the representation (A.5) for Green's function G_t . If $u_0 \in L^1(R_+)$, then

$$\left|\int_0^\infty G_t'(-y)u_0(y)dy\right| \leq \frac{\|g'\|_{L^\infty}\|u_0\|_{L^1}}{t^{1/2}}, \quad t > 0.$$

Therefore, $\beta \in L^\infty_{loc}(R_+)$ and $\beta(t) \sim t^{1/4}$ as $t \rightarrow \infty$ due to the second term in (17). Now, the integral equation (14) for $\gamma(t)$ with a weakly singular kernel is well defined and solutions exist with $\gamma \in L^\infty_{loc}(R_+)$. Similarly, the solution $u \in L^\infty(R_+ \times R_+)$ is well defined by (13).

Remark 1 One can show that there is no singularity of the solution for $\beta(t)$ as $t \rightarrow 0$ so that $\beta(0) = u'_0(0)$ by continuity. Also, one can show that the solution of the integral equation (14) for $\gamma(t)$ exists in the closed form: $\gamma(t) = 2 \int_0^\infty G_t(-y) u''_0(y) dy$.

Coming back to the original question, if $u_0(0) = 0$, $u'_0(0) < 0$, and $u''_0(0) = -\frac{1}{2}$, then there is a finite value of $t_0 \in (0, \infty)$ such that $u_x(0, t) > 0$ for all $t > t_0$, that is, $h(x, t)$ loses monotonicity at the boundary $x = 0$ in a finite time t_0 (recall that $u = h_x$). This dynamical phenomenon occurs because of the inhomogeneous boundary conditions $u_{xx}(0, t) = -\frac{1}{2}$ even in the absence of the advection term in the fourth-order diffusion equation (6).

2.2. Case $V_0 \neq 0$

We have the solution in the implicit form (12) and we need to derive integral equations on the unknown functions $\beta(t)$ and $\gamma(t)$. One integral equation follows again from the boundary condition $u(0, t) = 0$:

$$-\int_0^t [G_{t-s}(V_0(t-s))\gamma(s) + G''_{t-s}(V_0(t-s))\beta(s)] ds = \int_0^\infty G_t(V_0 t - y) u_0(y) dy - \frac{1}{2} \int_0^t G'_{t-s}(V_0(t-s)) ds. \tag{18}$$

To find another integral equation from the boundary condition $u_x(0, t) = \beta(t)$, we have to use the technique explained in Section 2.1 and to compute the derivative of the solution (12) in x :

$$\begin{aligned} u_x(x, t) &= \int_0^\infty G'_t(x + V_0 t - y) u_0(y) dy - \frac{1}{2} \int_0^t G''_{t-s}(x + V_0(t-s)) ds \\ &+ \int_0^t G'_{t-s}(x + V_0(t-s)) \gamma(s) ds + \frac{1}{2} \beta(t) - \beta(0) H_t(x + V_0 t) \\ &- \int_0^t H_{t-s}(x + V_0(t-s)) \beta'(s) ds + V_0 \int_0^t G_{t-s}(x + V_0(t-s)) \beta(s) ds. \end{aligned} \tag{19}$$

We can now use the boundary condition $u_x(0, t) = \beta(t)$ to obtain another integral equation for β and γ :

$$\begin{aligned} \beta(t) + 2\beta(0)H_t(V_0 t) + 2 \int_0^t H_{t-s}(V_0(t-s)) \beta'(s) ds - 2V_0 \int_0^t G_{t-s}(V_0(t-s)) \beta(s) ds \\ - 2 \int_0^t G'_{t-s}(V_0(t-s)) \gamma(s) ds = 2 \int_0^\infty G'_t(V_0 t - y) u_0(y) dy - \int_0^t G''_{t-s}(V_0(t-s)) ds. \end{aligned} \tag{20}$$

The system of integral equations (18) and (20) completes the solution (12) for the case $V_0 \neq 0$. Because of the original motivation to study behavior of the flow on Fig. 1 for large negative $V(t)$, see equation (3), we shall analyze the obtained solution for $V_0 < 0$ only.

Theorem 2. Consider the advection-diffusion equation (6) for $V_0 < 0$ with the initial data $u_0 \in L^1(\mathbb{R}_+)$. Then, there exists a solution $u \in L^\infty(\mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+)$ of the evolution problem in the explicit form (12), where $\beta, \gamma \in L^\infty(\mathbb{R}_+)$ are defined by (18) and (20) with

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t) = \frac{1}{2|V_0|^{1/3}} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma(t) = \frac{|V_0 t|^{1/3}}{2}. \quad (21)$$

Proof. Similarly to the proof of Theorem 1, it is easy to show from the integral equations (18) and (20) that if $u_0 \in L^1(\mathbb{R}_+)$, then $\beta, \beta', \gamma \in L_{loc}^\infty(\mathbb{R}_+)$. We shall now compute the limit of $\beta(t)$ and $\gamma(t)$ as $t \rightarrow \infty$:

$$\beta_\infty := \lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t), \quad \gamma_\infty := \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma(t). \quad (22)$$

To deal with the first integral equation (18), we first notice the explicit computation by using the Fourier transform:

$$f(t) := \int_0^t G'_{t-s}(V_0(t-s)) ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (ik) \left(\int_0^t e^{-s(k^4 - ikV_0)} ds \right) dk = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{i(1 - e^{-t(k^4 - ikV_0)})}{k^3 - iV_0} dk,$$

where the integrals in s and k can be interchanged by Fubini's Theorem and the integration is performed in the principal value sense. We can now explicitly compute the limit as $t \rightarrow \infty$ by using Lebesgue's Dominated Convergence Theorem:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{i}{k^3 - iV_0} dk = \frac{-V_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{dk}{k^6 + V_0^2} = \frac{1}{3|V_0|^{2/3}}.$$

This computation gives the last term of the integral equation (18) as $t \rightarrow \infty$. To deal with the first term on the right-hand side of (18), we write

$$\int_0^\infty G_t(V_0 t - y) u_0(y) dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \left(\int_0^\infty e^{-t(k^4 - ikV_0) -iky} u_0(y) dy \right) dk = \int_{-\infty}^\infty e^{-t(k^4 - ikV_0)} \hat{u}_0(k) dk,$$

where

$$\hat{u}_0(k) := \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-iky} u_0(y) dy.$$

By Lebesgue's Dominated Convergence Theorem, this integral converges to zero as $t \rightarrow \infty$ as long as $u_0 \in L^1(\mathbb{R}_+)$.

To deal with the second term on the left-hand side of the integral equation (18), we rewrite it in the form

$$\int_0^t G''_{t-s}(V_0(t-s)) \beta(s) ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty (ik)^2 \left(\int_0^t \beta(t-s) e^{-s(k^4 - ikV_0)} ds \right) dk.$$

Since $\beta \in L_{loc}^\infty(\mathbb{R}_+)$ with the assumed limit in (22), we apply Lebesgue's Dominated Convergence Theorem and compute the integral in the principal value sense:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G''_{t-s}(V_0(t-s)) \beta(s) ds = \frac{-\beta_\infty}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k}{k^3 - iV_0} dk = \frac{-\beta_\infty}{\pi} \int_0^\infty \frac{k_4 dk}{k^6 + V_0^2} = \frac{-\beta_\infty}{3|V_0|^{1/3}}.$$

The first term on the left-hand side of the integral equation (12) is more tricky. First, we rewrite it in the form,

$$\int_0^t G_{t-s}(V_0(t-s))\gamma(s)ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_0^t \gamma(t-s)e^{-s(k^4-ikV_0)} ds \right) dk.$$

However, if $\gamma \in L_{loc}^{\infty}(R_+)$ with the assumed limit in (22), application of Lebesgue's Dominated Convergence Theorem yields the integral in k with a simple pole at $k = 0$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G_{t-s}(V_0(t-s))\gamma(s)ds = \frac{\gamma_{\infty}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{k(k^3 - iV_0)}.$$

The integral is no longer understood in the principal value sense. Instead, we return back to the treatment of the inverse Laplace transform in (11) with $Re(c) > 0$, use transformation $p = ik$, and shift the contour of integration in k below the pole at $k = 0$. As a result, computations of the integral above are completed with the half-residue term at the simple pole at $k = 0$ and the principal value integral:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G_{t-s}(V_0(t-s))\gamma(s)ds = \frac{\gamma_{\infty}}{2\pi} \left(\frac{\pi}{|V_0|} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k^2 dk}{k^6 + V_0^2} \right) = \frac{2\gamma_{\infty}}{3|V_0|}.$$

Combining all computations together, we obtain the following linear equation on β_{∞} and γ_{∞} from the integral equation (18) in the limit $t \rightarrow \infty$:

$$\frac{2\gamma_{\infty}}{|V_0|} - \frac{\beta_{\infty}}{|V_0|^{1/3}} = \frac{1}{2|V_0|^{2/3}}. \tag{23}$$

To deal with the second integral equation (20), we use the Fourier transform again to write

$$H_t(V_0t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t(k^4-ikV_0)}}{k} dk$$

and

$$\int_0^t H_{t-s}(V_0(t-s))\beta'(s)ds = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{k} \left(\int_0^t \beta'(t-s)e^{-s(k^4-ikV_0)} ds \right) dk,$$

where the integrals are understood in the principal value sense. If $\beta, \beta', \gamma \in L_{loc}^{\infty}$ with the assumed limits (22), Lebesgue's Dominated Convergence Theorem implies that

$$H_t(V_0t), \int_0^t H_{t-s}(V_0(t-s))\beta'(s)ds \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty.$$

Similar to the previous computations, we prove that

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} G'_t(V_0t - y)u_0(y)dy &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G''_{t-s}(V_0(t-s))ds &= \frac{-1}{3|V_0|^{1/3}}, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G'_{t-s}(V_0(t-s))\gamma(s)ds &= \frac{\gamma_{\infty}}{3|V_0|^{2/3}}, \end{aligned}$$

and

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t G_{t-s}(V_0(t-s))\beta(s)ds = \frac{\beta_\infty}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{k(k^3 - iV_0)} = \frac{\beta_\infty}{6|V_0|},$$

where the last integral is computed in the principal value sense because equations (19) and (20) are derived in the principal value sense.

Combining all computations together, we have obtained the following linear equation on β_∞ and γ_∞ from the integral equation (20) in the limit $t \rightarrow \infty$:

$$4\beta_\infty - \frac{2\gamma_\infty}{|V_0|^{2/3}} = \frac{1}{|V_0|^{1/3}}. \tag{24}$$

Solving the linear system (23) and (24), we obtain (21) and the theorem is proved.

Coming back to the original question, if $u_0(0) = 0$, $u'_0(0) < 0$, and $u''_0(0) = -\frac{1}{2}$, then there is a finite value of $t_0 \in (0, \infty)$ such that $u_x(0, t) > 0$ for all $t > t_0$. Therefore, like in the case $V_0 = 0$, the function $h(x, t)$ loses monotonicity at $x = 0$ in a finite time t_0 (where $u = h_x$) with the only difference that $u_x(0, t)$ remains finite and positive as $t \rightarrow \infty$. We conclude that the presence of the advection term with $V_0 < 0$ in the fourth-order diffusion equation (6) does not prevent the loss of monotonicity in x in a finite time but still stabilizes the solution globally as $t \rightarrow \infty$. In both cases $V_0 = 0$ and $V_0 < 0$, the monotonicity of h in x is lost because of the inhomogeneous boundary condition $h_{xx}(0, t) = -\frac{1}{2}$.

3. Solution of the original problem

We shall now use Laplace transform (7) to obtain the implicit solution to the advection-diffusion equation (4) with a variable speed $V(t)$. Let us denote

$$W(t) = \int_0^t V(s)ds$$

and obtain the Laplace transform solution in the form:

$$U(p, t) = U_0(p)e^{-tp^4 + W(t)p} + \int_0^t e^{-(t-s)p^4 + (W(t) - W(s))p} \left(-\frac{1}{2}p + p^2\beta(s) \right) ds. \tag{25}$$

Compared with the solution (10), we have set $\gamma(t) = 0$ because of the third boundary condition in (5). Using the inverse Laplace transform and recalling the definition of Green's function $G_t(x)$ (see Appendix A), we obtain the analogue of the implicit solution (12):

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \int_0^\infty G_t(x + W(t) - y)u_0(y)dy - \frac{1}{2} \int_0^t G'_{t-s}(x + W(t) - W(s))ds \\ & + \int_0^t G''_{t-s}(x + W(t) - W(s))\beta(s)ds. \end{aligned} \tag{26}$$

Now we have two unknowns β and W and two integral equations from the boundary conditions $u(0, t) = 0$ and $u_x(0, t) = \beta(t)$.

From the boundary condition $u(0, t) = 0$, we obtain the integral equation:

$$-\int_0^t G_{t-s}(W(t)-W(s))\beta(s)ds = \int_0^\infty G_t(W(t)-y)u_0(y)dy - \frac{1}{2}\int_0^t G_{t-s}(W(t)-W(s))ds. \quad (27)$$

To find another integral equation from the boundary condition $u_x(0,t) = \beta(t)$, we differentiate the solution (26) in x :

$$\begin{aligned} u_x(x,t) &= \int_0^\infty G_t(x+W(t)-y)u_0(y)dy - \frac{1}{2}\int_0^t G_{t-s}''(x+W(t)-W(s))ds \\ &+ \frac{1}{2}\beta(t) - \beta(0)H_t(x+W(t)) - \int_0^t H_{t-s}(x+W(t)-W(s))\beta'(s)ds \\ &+ V(t)\int_0^t G_{t-s}(x+W(t)-W(s))\beta(s)ds. \end{aligned} \quad (28)$$

From the boundary condition $u_x(0,t) = \beta(t)$, we obtain another integral equation:

$$\begin{aligned} \beta(t) + 2\beta(0)H_t(W(t)) + 2\int_0^t H_{t-s}(W(t)-W(s))\beta'(s)ds - 2V(t)\int_0^t G_{t-s}(W(t)-W(s))\beta(s)ds \\ = 2\int_0^\infty G_t'(W(t)-y)u_0(y)dy - \int_0^t G_{t-s}''(W(t)-W(s))ds. \end{aligned} \quad (29)$$

We shall prove that the system of two integral equations (27) and (29) determines uniquely the function $\beta(t)$ and $V(t)$ locally for $t > 0$. The following theorem gives the result in the form of the fractional power series in t .

Theorem 3. Assume that $u_0 \in C^\infty(R_+)$ such that

$$u_0(0) = 0, \quad u_0''(0) = -\frac{1}{2}, \quad u_0'''(0) = 0. \quad (30)$$

Then, there exists a formal solution (V, β) of the system of two integral equations (27) and (29) in the form of the fractional power series:

$$\beta(t) = \beta_0 + \sum_{n=4}^\infty \beta_{n/4}t^{n/4}, \quad V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^\infty V_{n/4}t^{(n+3)/4}, \quad (31)$$

where $\beta_0 = u_0'(0)$, $V_0 = u_0^{(4)}(0)/u_0'(0)$, and $\{\beta_{n/4}, V_{(n-3)/4}\}_{n=4}^\infty$ are uniquely determined.

Proof. We substitute the series representations (31) to each term of the integral equations (27) and (29). It follows from (31) that

$$a_t := \frac{1}{t^{1/4}} \int_0^t V(s)ds = V_0t^{3/4} + \sum_{n=1}^\infty \frac{4}{n+4}V_{n/4}t^{(n+3)/4}$$

and

$$\xi_{t,\tau} := \frac{1}{\tau^{1/4}} \int_{t-\tau}^t V(s)ds = V_0\tau^{3/4} + \sum_{n=1}^\infty \frac{4}{n+4}V_{n/4} \frac{t^{(n+4)/4} - (t-\tau)^{(n+4)/4}}{\tau^{1/4}}.$$

Using the representation (A.5) of the Green function with $g \in C^\infty(R)$, we obtain for the three terms of the integral equation (27):

$$\begin{aligned} \int_0^t G_{t-s}''(W(t)-W(s))\beta(s)ds &= \beta_0 \int_0^t \frac{g''(\xi_{t,\tau})}{\tau^{3/4}} d\tau + \sum_{n=4}^\infty \beta_{n/4} \int_0^t \frac{g''(\xi_{t,\tau})(t-\tau)^{n/4}}{\tau^{3/4}} d\tau \\ &= 4\beta_0 g''(0)t^{1/4} + \sum_{k=2}^\infty \frac{1}{k!} g^{(k+2)}(0) \int_0^t \frac{\xi_{t,\tau}^k}{\tau^{3/4}} d\tau + \sum_{n=4}^\infty \beta_{n/4} \int_0^t \frac{g''(\xi_{t,\tau})(t-\tau)^{n/4}}{\tau^{3/4}} d\tau, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_t(W(t)-y)u_0(y)dy &= \int_0^\infty g(z-a_t)u_0(t^{1/4}z)dz = \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n!}u_0^{(n)}(0)t^{n/4} \int_0^\infty g(z-a_t)z^n dz \\ &= t^{1/4}u_0(0) \sum_{k=0}^\infty \frac{1}{k!}(-a_t)^k \int_0^\infty g^{(k)}(z)z dz + \sum_{n=2}^\infty \frac{1}{n!}u_0^{(n)}(0)t^{n/4} \int_0^\infty g(z-a_t)z^n dz, \end{aligned}$$

and

$$\int_0^t G'_{t-s}(W(t)-W(s))ds = \int_0^t \frac{g'(\xi_{t,\tau})}{\tau^{2/4}} d\tau = \sum_{k=1}^\infty \frac{1}{k!}g^{(k+1)}(0) \int_0^t \frac{\xi_{t,\tau}^k}{\tau^{2/4}} d\tau.$$

At the first powers of $t^{1/4}$, we obtain a system of linear algebraic equations on the coefficients of the fractional power series (31):

$$\begin{aligned} t^{1/4} : \quad & -4\beta_0 g''(0) = u_0'(0) \int_0^\infty g(z)z dz, \\ t^{2/4} : \quad & 0 = \frac{1}{2!}u_0''(0) \int_0^\infty g(z)z^2 dz, \\ t^{3/4} : \quad & 0 = \frac{1}{3!}u_0'''(0) \int_0^\infty g(z)z^3 dz, \\ t^{4/4} : \quad & 0 = \frac{1}{4!}u_0^{(4)}(0) \int_0^\infty g(z)z^4 dz - u_0'(0)V_0 \int_0^\infty g'(z)z dz, \\ t^{5/4} : \quad & -\beta_{4/4}g''(0) \int_0^1 \frac{(1-x)^{4/4}}{x^{3/4}} dx = \frac{1}{5!}u_0^{(5)}(0) \int_0^\infty g(z)z^5 dz - \frac{1}{2}u_0''(0)V_0 \int_0^\infty g'(z)z^2 dz \\ & \quad - \frac{4}{5}u_0'(0)V_{1/4} \int_0^\infty g'(z)z dz - \frac{2}{5}g''(0)V_0, \end{aligned}$$

and so on.

Using the explicit values for the integrals (A.9)–(A.13) and the initial conditions (30), we obtain $\beta_0 = u_0'(0)$, $V_0 = u_0^{(4)}(0)/u_0'(0)$, and the linear equation

$$u_0'(0)V_{1/4} + 8g''(0) \left(\beta_{4/4} + u_0^{(5)}(0) + \frac{1}{2}V_0 \right) = 0. \tag{32}$$

Similarly, we expand all terms of the second integral equation (29):

$$\begin{aligned} \int_0^t G_{t-s}(W(t)-W(s))\beta(s)ds &= \beta_0 \int_0^t \frac{g(\xi_{t,\tau})}{\tau^{1/4}} d\tau + \sum_{n=4}^\infty \beta_{n/4} \int_0^t \frac{g(\xi_{t,\tau})(t-\tau)^{n/4}}{\tau^{1/4}} d\tau \\ &= \frac{4}{3}\beta_0 g(0)t^{3/4} + \sum_{k=2}^\infty \frac{1}{k!}g^{(k)}(0) \int_0^t \frac{\xi_{t,\tau}^k}{\tau^{1/4}} d\tau + \sum_{n=4}^\infty \beta_{n/4} \int_0^t \frac{g(\xi_{t,\tau})(t-\tau)^{n/4}}{\tau^{1/4}} d\tau, \\ \int_0^\infty G'_t(W(t)-y)u_0(y)dy &= \int_0^\infty g(z-a_t)u_0'(t^{1/4}z)dz = \sum_{n=0}^\infty \frac{1}{n!}u_0^{(n+1)}(0)t^{n/4} \int_0^\infty g(z-a_t)z^n dz \\ &= u_0'(0) \sum_{k=0}^\infty \frac{1}{k!}(-a_t)^k \int_0^\infty g^{(k)}(z)z dz + \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n!}u_0^{(n+1)}(0)t^{n/4} \int_0^\infty g(z-a_t)z^n dz, \\ \int_0^t G''_{t-s}(W(t)-W(s))ds &= \int_0^t \frac{g''(\xi_{t,\tau})}{\tau^{3/4}} d\tau = \sum_{k=0}^\infty \frac{1}{k!}g^{(k+2)}(0) \int_0^t \frac{\xi_{t,\tau}^k}{\tau^{3/4}} d\tau, \end{aligned}$$

$$H_t(W(t)) = \int_0^{a_t} g(z) dz = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+1)!} g^{(k)}(0) a_t^{k+1},$$

and

$$\int_0^t H_{t-s}(W(t) - W(s)) \beta'(s) ds = \sum_{n=4}^{\infty} \beta_{n/4} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+1)!} g^{(k)}(0) \int_0^t \xi^{k+1}(t-\tau)^{(n-4)/4} d\tau.$$

At the first powers of $t^{1/4}$, we obtain a system of linear algebraic equations on the coefficients of the fractional power series (31):

$$t^{0/4} : \quad \beta_0 = 2u'_0(0) \int_0^{\infty} g(z) dz,$$

$$t^{1/4} : \quad 0 = 2u''_0(0) \int_0^{\infty} g(z) z dz - 4g''(0),$$

$$t^{2/4} : \quad 0 = u'''_0(0) \int_0^{\infty} g(z) z^2 dz,$$

$$t^{3/4} : \quad 2\beta_0 g(0) V_0 - \frac{8}{3} \beta_0 g(0) V_0 = \frac{1}{3} u_0^{(4)}(0) \int_0^{\infty} g(z) z^3 dz - 2u'_0(0) V_0 \int_0^{\infty} g'(z) dz,$$

$$t^{4/4} : \quad \beta_{4/4} + \frac{8}{5} \beta_0 g(0) V_{1/4} - \frac{8}{3} \beta_0 g(0) V_{1/4} = \frac{1}{12} u_0^{(5)}(0) \int_0^{\infty} g(z) z^4 dz - 2u''_0(0) V_0 \int_0^{\infty} g'(z) z dz - \frac{8}{5} u'_0(0) V_{1/4} \int_0^{\infty} g'(z) dz,$$

and so on. Again, using the explicit values for the integrals (A9)–(A.13) and the initial conditions (30), we obtain $\beta_0 = u'_0(0)$, $V_0 = u_0^{(4)}(0)/u'_0(0)$, and the linear equation

$$-\frac{8}{3} u'_0(0) g(0) V_{1/4} + (\beta_{4/4} + u_0^{(5)}(0) + \frac{1}{2} V_0) = 0. \tag{33}$$

The system of linear equations (32) and (33) has a unique solution

$$V_{1/4} = 0, \quad \beta_{4/4} = -u_0^{(5)}(0) - \frac{1}{2} V_0, \tag{34}$$

provided that

$$-\frac{64}{3} g(0) g''(0) = \frac{4}{3\pi^2} \Gamma\left(\frac{1}{4}\right) \Gamma\left(\frac{3}{4}\right) = \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \neq 1,$$

which is true. Note that the constraint $V_0 = u_0^{(4)}(0)/u'_0(0)$ also follows from the pointwise equation (2) obtained for sufficiently smooth solutions. Similarly, the second equation (34) follows from the advection-diffusion equation (4) after one derivative in x and the limit $x \rightarrow 0$ and $t \rightarrow 0$.

It remains to prove that the system of linear equations obtained from the system of integral equations (27) and (29) can be solved at each order of $t^{(n+1)/4}$ and $t^{n/4}$, respectively, for $n \geq 4$. From the previous computations, we can deduce that the first integral equation at $t^{(n+1)/4}$ gives a linear equation on variables $(\beta_{n/4}, V_{(n-3)/4})$ of the power series (31):

$$-\beta_{n/4} g''(0) \int_0^1 \frac{(1-x)^{n/4}}{x^{3/4}} dx + \frac{4}{n+1} u'_0(0) V_{(n-3)/4} \int_0^\infty g'(z) z dz = \dots, \quad (35)$$

where the dots on the right-hand side denote the terms expressed through derivatives of $u_0(x)$ at $x = 0$ and the previous terms of the power series (31). Similarly, the second integral equation at $t^{n/4}$ gives another linear equation on variables $(\beta_{n/4}, V_{(n-3)/4})$:

$$\beta_{n/4} - \frac{8}{3} \beta_0 g(0) V_{(n-3)/4} = \dots. \quad (36)$$

The system of linear equations (35) and (36) is non-degenerate if

$$C_n := -\frac{4(n+1)}{3} g(0) g''(0) \int_0^1 \frac{(1-x)^{n/4}}{x^{3/4}} dx = \frac{(n+1)}{6\sqrt{2}\pi} \frac{\Gamma\left(\frac{n+4}{4}\right) \Gamma\left(\frac{1}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{n+5}{4}\right)} \neq 1. \quad (37)$$

The coefficients $\{C_n\}$ are computed numerically for $n \geq 1$ (see Fig. 2). The sequence is monotonically increasing. It approaches closely to 1 at $n = 8$, where $C_8 \approx 0.96$, and $n = 9$, where $C_9 \approx 1.04$. Therefore, $C_n \neq 1$ for all $n \geq 1$ so that the linear system is non-degenerate and a unique solution for $(\beta_{n/4}, V_{(n-3)/4})$ exists for any $n \geq 4$.

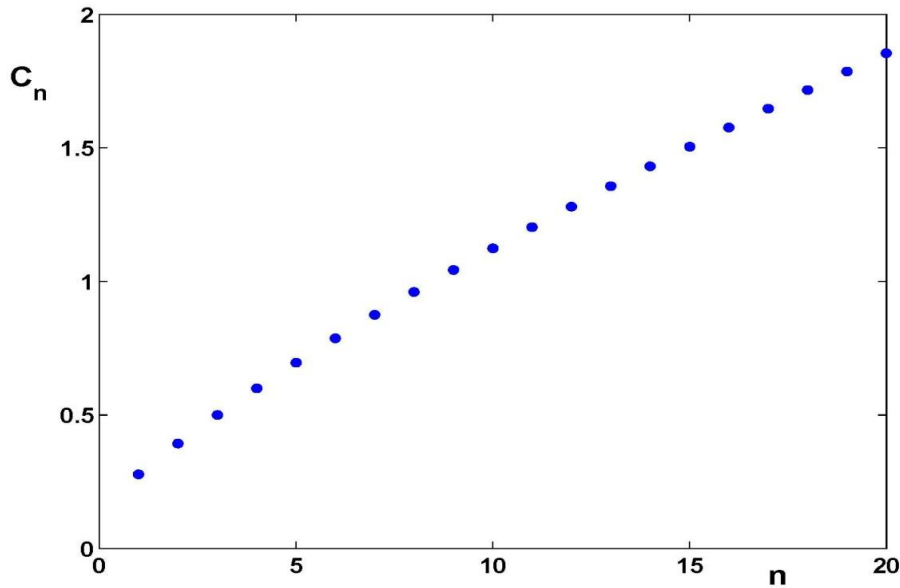


Fig. 2. Numerical approximations of C_n defined by (37)

In the present time, we cannot prove yet that the system of integral equations (27) and (29) leads to a finite-time blow-up, according to the conjecture in [1]. Nevertheless, numerical computations show that the blow-up holds for a generic set of initial data. Fig. 3 shows the behavior of functions $\beta(t)$ and $V(t)$ near the blow-up time. It follows from this figure that $\beta(t) = h_{xx}(0,t) \rightarrow 0$ at the same time as $V(t) \rightarrow -\infty$ with $\beta(t) V(t)^{1/3} \rightarrow C_0$, where $C_0 > 0$ is a numerical constant. In other words, we conclude with the conjecture that $\beta(t) \sim V(t)^{-1/3}$ as $V(t) \rightarrow -\infty$ in a finite time $t_0 \in (0, \infty)$.

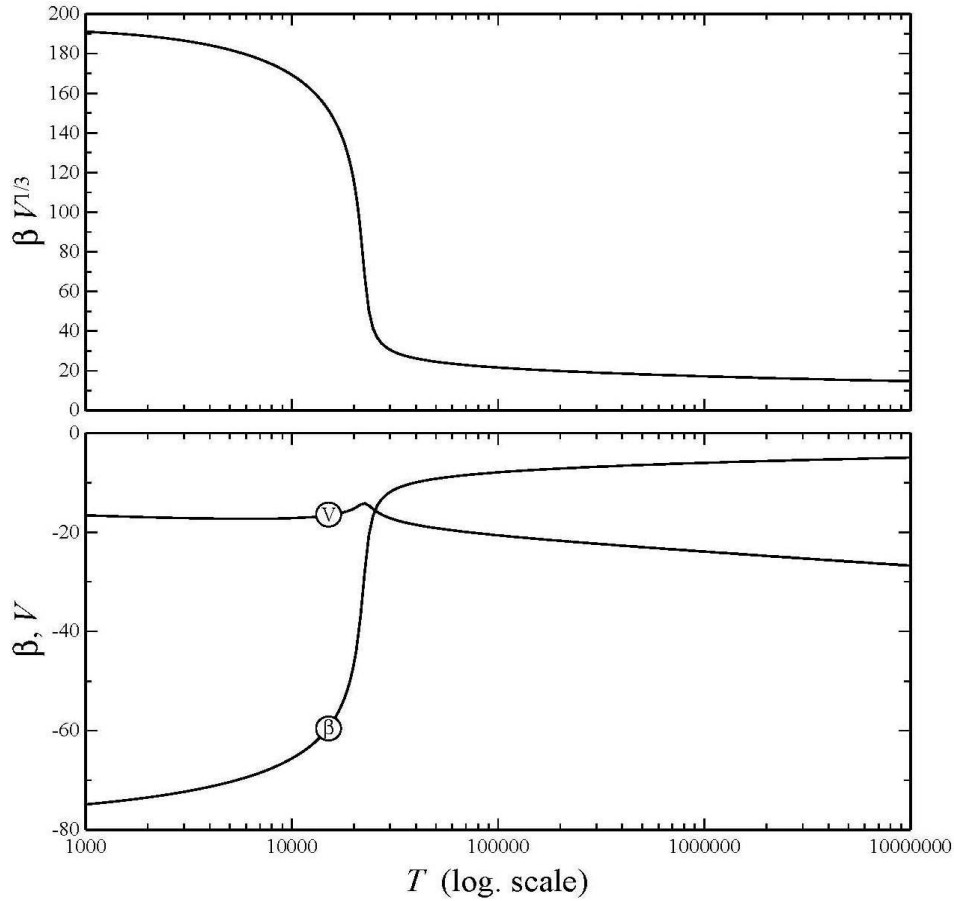


Fig. 3. Numerical computations of $\beta(t)$ and $V(t)$ for the advection-diffusion equation (1).

Acknowledgement. Authors received funding from the Federal Target Program “Research and scientific-pedagogical cadres of Innovative Russia” for 2009-2013”. We thank E.S. Benilov for enlightening discussions and for preparing Fig. 3 based on numerical codes in [1].

Appendix. Green's function

Let us define the fundamental solution of the fourth-order diffusion equation:

$$\begin{cases} h_t + h_{xxxx} = 0, & x \in R, \quad t > 0, \\ h|_{t=0} = \delta(x), & x \in R, \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

where δ is a standard Dirac delta-function in the distribution sense. The fundamental solution is usually referred to as Green's function and we shall denote it by

$$h(x, t) = G_t(x), \quad x \in R, \quad t \in R_+.$$

Using the Fourier transform in x , we can obtain the explicit expression for Green's function:

$$G_t(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-tk^4 + ikx} dk = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-tk^4} \cos(kx) dk. \quad (\text{A.2})$$

In particular, we have $G_t(-x) = G_t(x)$ for all $x \in R$ and

$$G_t(0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-tk^4} dk = \frac{\Gamma(1/4)}{4\pi^{1/4}}, \quad (\text{A.3})$$

$$G_t''(0) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} k^2 e^{-tk^4} dk = -\frac{\Gamma(3/4)}{4\pi^{3/4}}, \quad (\text{A.4})$$

where Γ is the standard Gamma function. The Green's function can be represented in the self-similar form by

$$G_t(x) = \frac{1}{t^{1/4}} g\left(\frac{x}{t^{1/4}}\right), \quad g(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-k^4} \cos(kz) dk, \quad (\text{A.5})$$

where $g \in L^2(\mathbb{R}) \cap L^\infty(\mathbb{R})$. Therefore, G_t decays to zero as $t \rightarrow \infty$ in any L^p norm for $p \geq 2$. In particular, $|G_t(x)| \leq \|g\|_{L^\infty} / t^{1/4}$, $|G_t'(x)| \leq \|g'\|_{L^\infty} / t^{1/2}$, and so on, for any $x \in \mathbb{R}$.

By the stationary phase method (see, e.g., Chapter 5 in [3]), $g(z)$ and all derivatives of $g(z)$ decay to zero as $|z| \rightarrow \infty$ faster than any algebraic powers. This gives the decay of $G_t(x)$ and any x -derivative of $G_t(x)$ as $|x| \rightarrow \infty$ for any fixed $t > 0$. Although G_t and g are not L^1 functions, they satisfy the normalization conditions:

$$\int_{\mathbb{R}} G_t(x) dx = \int_{\mathbb{R}} g(z) dz = 1, \quad t > 0. \quad (\text{A.6})$$

The even function $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ satisfies the ordinary differential equation

$$4 \frac{d^4 g}{dz^4} = g + z \frac{dg}{dz}, \quad z \in \mathbb{R}, \quad (\text{A.7})$$

subject to the initial values

$$g(0) = \frac{1}{4\pi} \Gamma\left(\frac{1}{4}\right), \quad g'(0) = 0, \quad g''(0) = -\frac{1}{4\pi} \Gamma\left(\frac{3}{4}\right), \quad g'''(0) = 0, \quad (\text{A.8})$$

and the decay behavior as $|z| \rightarrow \infty$. It is clear from the differential equation that $g \in C^\infty(\mathbb{R})$ satisfies a number of integral constraints:

$$\int_0^{\infty} z g(z) dz = -4g''(0), \quad (\text{A.9})$$

$$\int_0^{\infty} z^2 g(z) dz = 0, \quad (\text{A.10})$$

$$\int_0^{\infty} z^3 g(z) dz = -8g(0), \quad (\text{A.11})$$

$$\int_0^{\infty} z^4 g(z) dz = -12, \quad (\text{A.12})$$

$$\int_0^{\infty} z^5 g(z) dz = 164! g''(0), \quad (\text{A.13})$$

and so on.

References

1. **Benilov E.S., Vynnycky M.** Contact lines with a 180° contact angle // J. Fluid Mech. 2013. To appear.
2. **Benney D.J., Timson W.J.** The rolling motion of a viscous fluid on and off a rigid surface // Stud. Appl. Math. 1980. V. 63. P. 93 – 98.
3. **Miller P.** Applied Asymptotic Analysis, Graduate Studies in Mathematics. AMS Publications. Providence. 2006. 467 p.
4. **Ngan C.G., Dussan V.E.B.** The moving contact line with a 180° advancing contact angle // Phys. Fluids. 1984. V. 24. P. 2785 – 2787.
5. **Polyanin A.D.** Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists. Chapman and Hall. 2001. 800 p.

Дата поступления
в редакцию 16.10.2012

УДК 517.9

Д.Е. Пелиновский^{1,2}, А.Р. Гиниятуллин¹, Ю.А. Панфилова¹

О РЕШЕНИЯХ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОНТАКТНЫХ ЛИНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия¹,
Университет МакМастера, Хамильтон, Онтарио, Канада²

Цель: Цель работы заключается в решении линейного уравнения адвекции-диффузии с переменной скоростью на полубесконечной оси. Переменная скорость определяется дополнительным условием на границе, которое моделирует динамику контактной линии гидродинамического потока с контактным углом 180° .

Научный подход: Исследование проведено с применением преобразования Лапласа по пространственной координате. Свойства функции Грина для уравнения диффузии 4-го порядка использованы при анализе неявных решений линейного уравнения адвекции-диффузии.

Результат: Доказано локальное существование решения начальной задачи ассоциированной с набором переопределенных граничных условий в форме дробно-степенного ряда по временной переменной. Проанализированы явные решения в случае постоянной скорости, что показывает, что неоднородные граничные условия приводят к изменению выпуклости потока в контактной линии за конечное время.

Ключевые слова: линейное уравнение адвекции-диффузии, переменная скорость, контактная линия, преобразование Лапласа, функция Грина.

УДК 537.86

Н.В. Асеева, Е.М. Громов, В.В. Тютин

СТАБИЛИЗАЦИЯ СОЛИТОНОВ В СРЕДАХ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ВЫНУЖДЕННЫМ РАССЕЯНИЕМ РАМАНА И ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ДИСПЕРСИИ И НЕЛИНЕЙНОСТИ

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Цель работы: Исследована динамика солитонов огибающей в рамках расширенного уравнения Шредингера $2i\left(\frac{\partial U}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial U}{\partial x}\right) + q(x)\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\alpha(x)U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial x} = 0$, при учете нелокальной нелинейности (вынужденное пространственное рассеяние Рамана) μ , и при учете пропорциональности неоднородностей дисперсии второго порядка $q(x)$ и кубичной нелинейности (фазовой само – модуляции) $\alpha(x)$. Так же учтено движение линейных волн с групповой скоростью V_g^L .

Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически. В аналитической теории замкнутую систему шести интегралов исходного модельного уравнения удалось свести к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой анализировалась структура фазового пространства.

Результат: Показано, что смещение волнового числа в длинноволновую область, обусловленное индуцированным рассеянием Рамана может компенсироваться пропорционально возрастающими линейной дисперсией и кубичной нелинейностью, приводящим к смещению волнового числа вверх по спектру. В режиме баланса индуцированного рассеяния и возрастающих дисперсии и нелинейности аналитически найден новый класс стационарных нелинейных локализованных волновых пакетов (солитонов), распространяющихся в неоднородных средах с постоянной скоростью и сохраняющих свою форму. Аналитически найден режим динамического равновесия индуцированного рассеяния и неоднородности среды при котором параметры солитона (волновое число, амплитуда и протяженность) меняются периодическим образом. В численном счете показано совпадение аналитических и численных результатов: подтверждено существование всех указанных режимов равновесия и подтверждена устойчивость соответствующих солитонов.

Новизна: Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для оптических волоконных линий связи с пространственным индуцированным рассеянием Рамана, переменной дисперсией второго порядка и переменной фазовой само модуляции.

Ключевые слова: расширенное нелинейное уравнение Шредингера, солитон, пространственное вынужденное рассеяние Рамана, неоднородность, линейная дисперсия второго порядка, кубичная нелинейность, аналитическое исследование, численный эксперимент.

Введение

Интерес к солитонам обусловлен возможностью их распространения на значительные расстояния с сохранением своей формы и переноса энергии и информации без значительных потерь. Солитонные решения возникают во многих нелинейных моделях различных областей физики при исследовании распространения интенсивных волновых полей в нелинейных диспергирующих средах: оптических импульсов в волоконных линиях связи, электромагнитных волн в плазме, поверхностных волн на воде [1–4].

Распространение высокочастотных волновых пакетов достаточно большой протяженности корректно описывается во втором приближении теории дисперсии нелинейных волн. Базовым модельным уравнением в этом приближении является хорошо известное нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) [5, 6], включающее как линейную дисперсию второго порядка, так и фазовую само модуляцию (кубичную нелинейность). Солитонное решение в этом случае существует в результате баланса дисперсионного расплывания и нелинейного сжатия волнового пакета.

Динамика высокочастотных волновых пакетов малой протяженности корректно опи-

сывается уже не во втором, а в третьем приближении теории дисперсии нелинейных волн, которое учитывает члены третьего порядка [4]: нелинейную дисперсию (самоукручение) [7], вынужденное рассеяние Рамана [8, 9] и линейную дисперсию третьего порядка. Базовым уравнением в этом приближении является нелинейное уравнение Шредингера третьего порядка (НУШ-3) [10–17]. В частности, в средах с неактивным рассеянием Рамана базовым уравнением является НУШ-3 без вынужденного рассеяния Рамана. В [14–20] найдено солитонное решение НУШ-3 без вынужденного рассеяния Рамана. Этот солитон является устойчивым и существует в результате баланса эффектов линейной дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии. В [21, 22] в НУШ-3 без дисперсию третьего порядка найдены стационарные волны перепада. Эти решения существуют в результате баланса эффектов нелинейной дисперсии и вынужденного рассеяния Рамана. Для локализованных нелинейных волновых пакетов (солитонов) учет вынужденного рассеяния Рамана приводит к смещению вниз спектра солитона [8, 9] и исчезновению устойчивости движущегося солитона.

Вынужденное рассеяние Рамана во временном представлении, описывающее запаздывание во времени нелинейного отклика среды, возникает за счет возбуждения моды колебания на частоте $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ волновыми полями с частотами ω_1 и ω_2 в атомарно-молекулярных системах. Вынужденное рассеяние Рамана приводит к сдвигу вниз частотного спектра солитона [8, 9]. Компенсация эффектов вынужденного рассеяния Рамана за счет излучения линейного волнового поля из ядра солитона рассматривалась в [23]. Компенсация вынужденного рассеяния Рамана в неоднородных средах была рассмотрена в следующих случаях: в средах с периодическим изменением дисперсии второго порядка [24]:

- в средах со смещенной точкой нулевой дисперсии второго порядка [25];
- оптических волокнах с уменьшающейся дисперсией [26].

Вынужденное рассеяние Рамана в пространственном представлении (пространственное вынужденное рассеяние Рамана), описывающее нелокальность нелинейного отклика среды, возникает за счет возбуждения моды пространственного колебания с волновым числом $\chi = k_1 - k_2$ волновыми полями с волновыми числами k_1 и k_2 . Это имеет место, например, в кристаллических средах с внутренней пространственной неоднородностью. Пространственное вынужденное рассеяние Рамана приводит к сдвигу вниз спектра волнового числа солитона.

С другой стороны, неоднородность дисперсии второго порядка тоже приводит к изменению волнового числа волнового пакета [27]. В частности, в приближении геометрической оптики скорость изменения волнового числа в плавно неоднородной среде описывается

хорошо известным уравнением $\dot{k} = -\frac{\partial \omega}{\partial \xi}$, где $\omega = \omega(k, \xi)$ – закон изменения линейной дис-

персии. Для неоднородной дисперсии второго порядка $q(\xi) = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2}$ скорость изменения

волнового числа пропорциональна градиенту дисперсии $\dot{k} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial q}{\partial \xi} \right) (k - k_0)^2$, и при $\frac{\partial q}{\partial \xi} > 0$

волновое число возрастает.

Баланс пространственного вынужденного рассеяния Рамана и возрастающей дисперсии второго порядка приводит к стабилизации спектра волнового числа солитона [28]. При

нелинейном дисперсионном соотношении $\omega(k, \xi, |U|^2) = \omega(k) - \alpha(\xi)|U|^2$ ($\alpha(\xi) = -\frac{\partial \omega}{\partial |U|^2}$ – па-

раметр фазовой самомодуляции) скорость изменения волнового числа пропорциональна гра-

диенту фазовой самомодуляции $\dot{k} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \right) |U|^2$, и волновое число возрастает при $\frac{\partial \alpha}{\partial \xi} > 0$.

Равновесие пространственного вынужденного рассеяния Рамана и увеличивающейся фазовой само – модуляции тоже приводит к стабилизации спектра волнового числа солитона.

В данной работе рассмотрена динамика солитонов в нелинейных средах с дисперсией при учете пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционально возрастающих дисперсии второго порядка и фазовой само модуляции. Получено аналитическое солитонное решение как результат баланса пространственного вынужденного рассеяния Рамана и одновременно возрастающих дисперсии второго порядка и фазовой само модуляции. Аналитические результаты подтверждены в численном эксперименте.

Базовое уравнение и его интегралы

Рассмотрим динамику высокочастотного волнового поля $U(\xi, t)\exp(i\omega_0 t - ik_0 \xi)$ в рамках расширенного уравнения Шредингера с пространственным вынужденным рассеянием Рамана и неоднородностью как дисперсии второго порядка, так и фазовой само модуляции:

$$2i\left(\frac{\partial U}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial U}{\partial x}\right) + q(x)\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\alpha(x)U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где вследствие нелинейного дисперсионного закона $\omega = \omega(k, |U|^2)$ использованы следующие обозначения: $V_g^L = \partial\omega/\partial k$ – групповая скорость линейных волн; $q = -\partial^2\omega/\partial k^2$ – параметр дисперсии второго порядка; $\alpha = -\partial\omega/\partial(|U|^2)$ – параметр фазовой само модуляции; μ – параметр пространственного вынужденного рассеяния Рамана.

В системе отсчета, движущейся с групповой скоростью линейных волн $\xi = x - V_g^L t$, уравнение (1) принимает вид

$$2i\frac{\partial U}{\partial t} + q(\xi + V_g^L t)\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha(\xi + V_g^L t)U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) при нулевых граничных условиях на бесконечности $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$ имеет следующие интегралы:

– величина изменения «количества квантов» волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} K |U|^2 d\xi; \quad (3)$$

– величина изменения импульса волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} K |U|^2 d\xi = -\frac{\mu}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi}\right)^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} \left|\frac{\partial U}{\partial \xi}\right|^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} |U|^4 d\xi, \quad (4)$$

– величина изменения квадрата модуля градиента волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left|\frac{\partial U}{\partial \xi}\right|^2 d\xi = -\mu \int_{-\infty}^{+\infty} K \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi}\right)^2 d\xi + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} K |U|^4 d\xi + \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha K \frac{\partial |U|^4}{\partial \xi} d\xi; \quad (5)$$

– величина изменения квадрата градиента интенсивности волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi}\right)^2 d\xi = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} q \frac{\partial^2 |U|^2}{\partial \xi^2} \frac{\partial (K |U|^2)}{\partial \xi} d\xi; \quad (6)$$

– величина изменения квадрата интенсивности волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi = -2 \int_{-\infty}^{\infty} q|U|^2 \frac{\partial(K|U|^2)}{\partial \xi} d\xi; \quad (7)$$

– величина изменения «центра масс» волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} qK|U|^2 d\xi; \quad (8)$$

где $U = |U| \exp(i\varphi)$, $K = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi}$ – добавочное локальное волновое число волнового пакета.

Аналитические результаты

При аналитическом исследовании динамики волнового пакета предположим, что пространственный масштаб неоднородностей дисперсии второго порядка, фазовой самомодуляции и локального волнового числа K намного больше масштаба неоднородности огибающей волнового пакета $L_{q,\alpha,K} \gg L_{|U|}$ и будем приближенно считать пространственное изменение волнового числа волнового пакета в окрестности «центра масс» волнового пакета $\bar{\xi} = N^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi$ ($N = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\xi$) линейной функцией $K(\xi, t) = k(t) + k_1(t)(\xi - \bar{\xi})$.

Тогда мы можем из мнимой части уравнения (2) при условии $\left(\frac{\partial |U(\xi, t)|}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} = 0$ получить

$$k_1(t) = \left(\frac{\partial K(\xi, t)}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} = - \frac{2}{q(\bar{\xi}) |U(\bar{\xi}, t)|} \frac{\partial |U(\bar{\xi}, t)|}{\partial t}. \quad (9)$$

Пространственное изменение волнового числа солитона возникает из-за изменения амплитуды солитона во времени. Для солитоноподобных волновых пакетов $N(t) \sim |U(\bar{\xi}, t)| \sqrt{\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})}}$ при учете (3) и (8) мы имеем

$$K(\xi, t) = k(t) \left(1 - \left(\frac{q'(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} + \frac{\alpha'(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) (\xi - \bar{\xi}) \right) + V \frac{\alpha(\bar{\xi})}{q^2(\bar{\xi})} \left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' (\xi - \bar{\xi}), \quad (10)$$

где $q'(\bar{\xi}) = \left(\frac{\partial q}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}}$, $\alpha'(\bar{\xi}) = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}}$, $\left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' = \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q}{\alpha} \right) \right)_{\bar{\xi}}$. Подставляя (10) в (3–8) мы получаем систему

$$\frac{dn}{dt} = q'(\bar{\xi})kn, \quad (11)$$

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\mu I_0}{2 N_0} \frac{i}{n} + \frac{1}{2} q'(\bar{\xi}) \frac{z}{n} + \frac{1}{2} \alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} \frac{m}{n} - q'(\bar{\xi})k^2, \quad (12)$$

$$\frac{dz}{dt} = -\mu \frac{I_0}{N_0} ki + 2k\alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} m + kq'(\bar{\xi}) \frac{\alpha(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} \frac{M_0}{N_0} m - V \left(\frac{\alpha(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} \right)^2 \left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' \frac{M_0}{N_0} m, \quad (13)$$

$$\frac{di}{dt} = q'(\bar{\xi}) \left(2 + 3 \frac{\alpha'(\bar{\xi})}{q'(\bar{\xi})} \frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) ki - 3V \frac{\alpha(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} \left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' i, \quad (14)$$

$$\frac{dm}{dt} = k q'(\bar{\xi}) \left(2 + \frac{\alpha'(\bar{\xi})}{q'(\bar{\xi})} \frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) m - V \frac{\alpha(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} \left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' m, \quad (15)$$

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = k q(\bar{\xi}), \quad (16)$$

где $n = \frac{N}{N_0}$, $i = \frac{I}{I_0}$, $z = \frac{Z}{N_0}$, $m = \frac{M}{M_0}$; $N = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\xi$, $Z = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial U}{\partial \xi} \right|^2 d\xi$,

$I = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi$, $M = \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^4 d\xi$ – интегралы волнового пакета; $N_0 = N(0)$, $Z_0 = Z(0)$,

$M_0 = M(0)$, $I_0 = I(0)$ – исходные значения интегралов волнового пакета. При непропорциональном пространственном изменении дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции

$\left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' \neq 0$ система (11–16) не имеет состояний равновесия.

Таким образом, компенсация пространственного вынужденного рассеяния Рамана в средах с непропорциональным пространственным изменением дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции невозможна.

Пропорциональное изменение дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции

Рассмотрим среды с пропорциональным пространственным изменением дисперсии

второго порядка и фазовой самомодуляции $\left(\frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right)' = 0$. В этом случае $\frac{\alpha'(\bar{\xi})}{q'(\bar{\xi})} \frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} = 1$ и система (11)–(15) преобразуется к виду:

$$\frac{dn}{dt} = k q'(\bar{\xi}) n, \quad (17)$$

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\mu}{2} \frac{I_0}{N_0} \frac{i}{n} + \frac{1}{2} q'(\bar{\xi}) \frac{z}{n} + \frac{1}{2} \alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} \frac{m}{n} - q'(\bar{\xi}) k^2, \quad (18)$$

$$\frac{dz}{dt} = -\mu \frac{I_0}{N_0} k i + 2k \alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} m + k q'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} m, \quad (19)$$

$$\frac{di}{dt} = 5k q'(\bar{\xi}) i, \quad (20)$$

$$\frac{dm}{dt} = 3k q'(\bar{\xi}) m, \quad (21)$$

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = k q(\bar{\xi}). \quad (22)$$

Для дальнейшего анализа системы (17–22) будем считать градиенты дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции постоянными величинами $q'(\bar{\xi}) = q' = const$, $\alpha'(\bar{\xi}) = \alpha' = const$. После замены переменной $\tau = t q'$ система (17–21) преобразуется к виду

$$\frac{dn}{d\tau} = kn, \quad (23)$$

$$\frac{dk}{d\tau} = -\frac{p}{2n}i + \frac{1}{2n}z + \frac{\delta_0}{2n}m - k^2, \quad (24)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -pki + 3k\delta_0 m, \quad (25)$$

$$\frac{di}{d\tau} = 5ki, \quad (26)$$

$$\frac{dm}{d\tau} = 3km, \quad (27)$$

где $p = \frac{\mu}{q'} \frac{I_0}{N_0}$, $\delta_0 = \frac{\alpha_0}{q_0} \frac{M_0}{N_0} = \frac{\alpha'}{q'} \frac{M_0}{N_0}$. Система (23) - (27) имеет состояние равновесия

$$k = 0, p = z_0 + \delta_0, \quad (28)$$

где $z_0 = \frac{Z_0}{N_0}$. В равновесном режиме при распространении волнового пакета не изменяются

интегралы Z_0 , M_0 , N_0 , волновое число остается нулевым. При анализе динамики волнового пакета с неравновесными параметрами мы получили первые интегралы уравнений (25–27) при учете (23):

$$m = n^3, \quad i = n^5, \quad z = -\frac{p}{5}(n^5 - 1) + \delta_0(n^3 - 1) + z_0. \quad (29)$$

Принимая во внимание (29), система (23)–(27) сводится к системе двух уравнений:

$$2\left(\frac{dk}{d\tau} + k^2\right) = -pn^4 + \delta_0 n^2 - \frac{p}{5}\left(n^4 - \frac{1}{n}\right) + \delta_0\left(n^2 - \frac{1}{n}\right) + \frac{z_0}{n}, \quad (30)$$

$$\frac{dn}{d\tau} = kn. \quad (31)$$

Для волнового пакета с начальными параметрами, соответствующими $k_0 = 0$ и $z_0 + \delta_0 = p$, состояние равновесия системы (30)–(31) совпадает с начальными параметрами волнового пакета ($k_0 = 0, n_0 = 1$). Линеаризация системы в окрестности состояния равновесия

($k_0 = 0, n_0 = 1$) приводит к уравнению $\frac{d^2k}{d\tau^2} + k\delta_0 = 0$, которое описывает колебания около состояния равновесия с частотой $\omega = \sqrt{\delta_0}$. При $p \neq z_0 + \delta_0$ параметры исходного волнового пакета становятся переменными. Имеет место первый интеграл системы (30–31):

$$k^2 n^2 + \frac{p}{5}(n^6 - 1) - \frac{\delta_0}{2}(n^4 - 1) + \left(\delta_0 - \frac{p}{5} - z_0\right)(n - 1) = k_0^2, \quad (32)$$

где $k_0 = k(0)$ – начальная величина волнового числа.

Траектории солитонов

Рассмотрим траектории (32) для исходного пакета с нулевым начальным волновым числом $k_0 = 0$ и огибающей, соответствующей солитонному решению

$$U(\xi, t = 0) = \frac{A_0}{\cosh(\xi A_0 \sqrt{\alpha_0 / q_0})}, \quad (33)$$

где $q_0 = q(0)$. Принимая во внимание обозначения $p = \frac{8}{15} \frac{\mu}{q'} \frac{\alpha_0}{q_0} A_0^4$ и $2z_0 = \delta_0 = \frac{2}{3} \frac{\alpha_0}{q_0} A_0^2$, соотношение (32) приводится к более простой форме:

$$5nk^2 + pn^5 - 5z_0n^3 + (5z_0 - p) = 0. \quad (34)$$

На рис. 1 показаны траектории солитона (34) при заданных начальных условиях ($k_0 = 0, n_0 = 1$) и различных значениях параметра p .

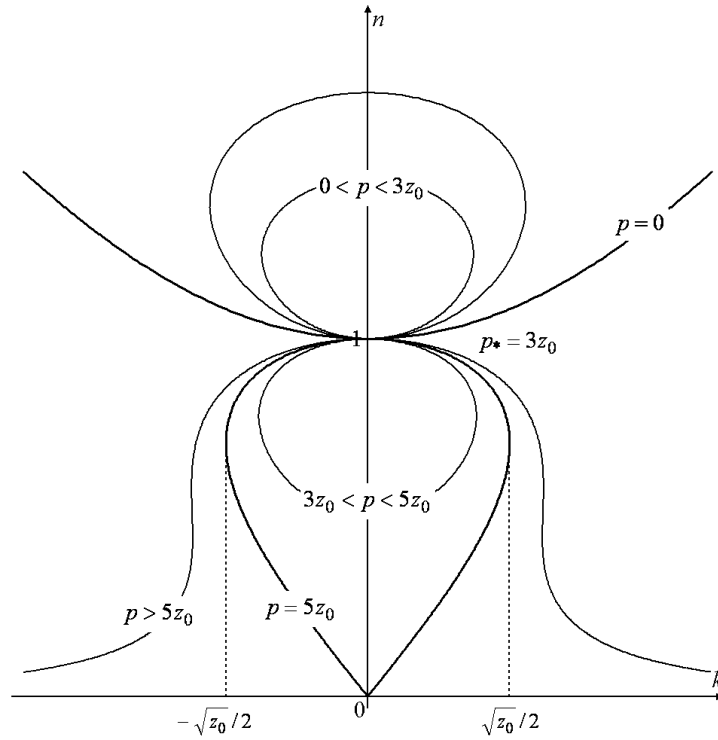


Рис. 1. Траектории солитона (34) при заданных начальных условиях ($k_0 = 0, n_0 = 1$) и различных значениях параметра p

Траектории солитона локализованы при $0 < p < 5z_0$, и параметры солитона, соответственно, периодически изменяются. Это соответствует динамическому равновесию пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционально возрастающих дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции. При $p = 5z_0$ имеет место сепаратрисный режим динамики солитона: волновое число бесконечно медленно стремится к нулю. В этом случае наименьшая возможная величина волнового числа $k_{\min} = -\frac{\sqrt{z_0}}{2}$. При $p > 5z_0$ пространственное вынужденное рассеяние Рамана доминирует, и волновое число солитона неограниченно возрастает. При $p < 0$ волновое число солитона убывает.

Солитонное решение

Рассмотрим решение уравнения (2) при линейных профилях дисперсии второго порядка $q(\xi) = q_0 + q' \cdot \xi$ и фазовой самомодуляции $\alpha(\xi) = \alpha_0 + \alpha' \cdot \xi$. Предположим, что масштабы пространственных неоднородностей как дисперсии второго порядка, так и фазовой самомодуляции много больше характерного масштаба неоднородности огибающей волнового пакета $L_{q,\alpha} \gg L_{\psi}$, а также представим решение в форме стационарной волны

$$U(\xi, t) = \left(\psi_0(\xi) + \frac{\psi_1(\xi)}{\left(1 + \frac{q'}{q_0} V_g^L t\right)} \right) \exp\left(i\Omega \left(t + \frac{1}{2} \frac{q'}{q_0} V_g^L t^2 \right) \right), \quad (35)$$

где $\psi_1 \sim \varepsilon \psi_0 \ll \psi_0$, $\varepsilon \sim \xi q' \sim \xi \alpha' \sim L_\psi / L_{\alpha, q} \sim \mu \ll \alpha_0, q_0$. Удерживая члены первого порядка относительно ε , мы имеем

$$q_0 \left(1 + \frac{q'}{q_0} V_g^L t \right) \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} + 2\alpha_0 \left(1 + \frac{\alpha'}{\alpha_0} V_g^L t \right) \psi_0^3 - 2\Omega \left(1 + \frac{q'}{q_0} V_g^L t \right) \psi_0 = 0, \quad (36)$$

$$q_0 \frac{d^2 \psi_1}{d\xi^2} + 6\alpha_0 \frac{\left(1 + \frac{\alpha'}{\alpha_0} V_g^L t\right)}{\left(1 + \frac{q'}{q_0} V_g^L t\right)} \psi_0^2 \psi_1 - 2\Omega \psi_1 = -2\alpha' \psi_0^3 \xi - q' \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} \xi - \frac{2}{3} \mu \frac{d(\psi_0^3)}{d\xi}. \quad (37)$$

При условии пропорциональности пространственного изменения дисперсии второго порядка и фазовой само – модуляции $\frac{q'}{q_0} = \frac{\alpha'}{\alpha_0}$ уравнение (36) имеет решение в виде классического солитона $\psi_0 = \frac{A_0}{\cosh(\xi/\Delta)}$, где $\Delta = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{q_0}{\alpha_0}}$, $\Omega = \frac{1}{2} \alpha_0 A_0^2$. Уравнение (37) после за-

мен $\eta = \xi/\Delta$ и $\Psi = \frac{\psi_1}{A_0} \frac{q_0}{q'_\eta}$ принимает вид

$$\frac{d^2 \Psi}{d\eta^2} + \left(\frac{6}{\cosh^2 \eta} - 1 \right) \Psi = -\frac{\eta}{\cosh \eta} + \frac{15}{4} \frac{\mu}{\mu_*} \frac{\sinh \eta}{\cosh^4 \eta}, \quad (38)$$

где $\mu_* = \frac{15}{8} \frac{q'_\eta}{A_0} \sqrt{\frac{\alpha_0}{q_0}}$ – равновесное значение параметра пространственного вынужденного рассеяния Рамана. При выполнении условия $\Psi(0) = 0$ уравнение (38) имеет точное решение:

$$\Psi(\eta) = \frac{1}{4 \cosh \eta} \left(4\Psi'(0)\eta + \eta^2 \tanh \eta - 2(\eta - \tanh \eta) + 3 \frac{\mu}{\mu_*} \tanh \eta \ln(\cosh \eta) \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{\mu}{\mu_*} - 1 \right) \tanh^2 \eta \sinh \eta. \quad (39)$$

При $\mu = \mu_*$ решение (39) ограничено и стремится к нулю на бесконечности $\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty) \rightarrow 0$. Такое решение существует в результате равновесия пространственного вынужденного рассеяния Рамана и неоднородностей как дисперсии второго порядка, так и фазовой само модуляции. На рис. 2 показано распределение $\Psi(\eta)$ при $\mu = \mu_*$ для различных начальных величин $\Psi'(0)$.

При $\mu \neq \mu_*$ решение (39) не локализовано и на бесконечности является ненулевым $|\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty)| \rightarrow \infty$. На рис. 3 показано распределение $\Psi(\eta)$ при начальных значениях $\Psi(0) = \Psi'(0) = 0$ и для различных значений μ .

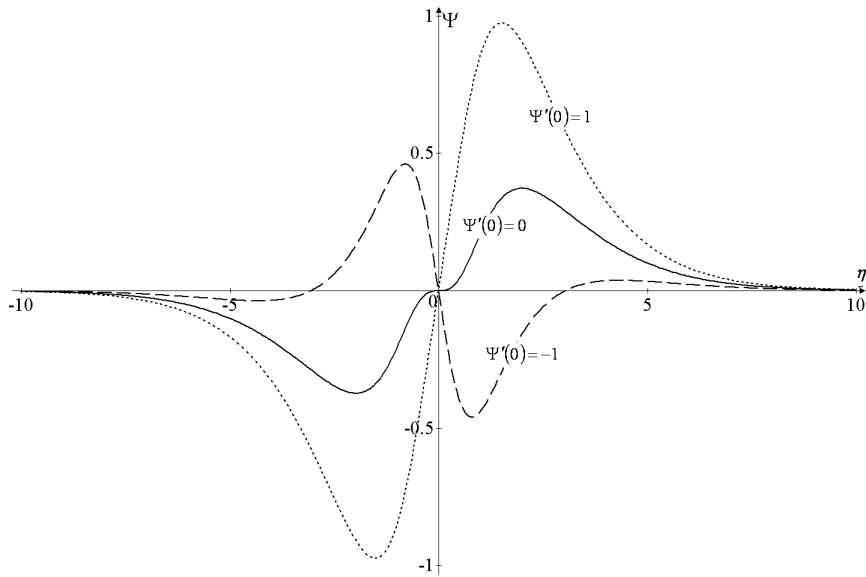


Рис. 2. Распределение $\Psi(\eta)$ при $\mu = \mu_*$ для различных начальных величин $\Psi'(0)$

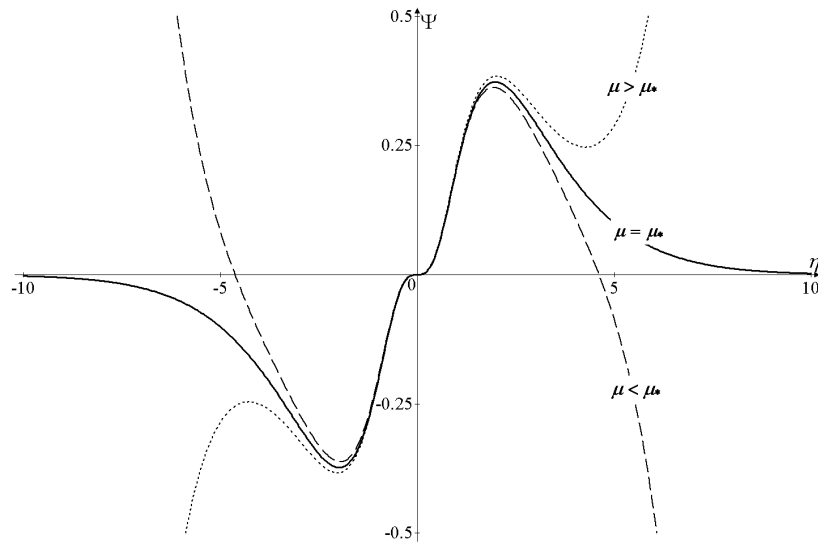


Рис. 3. Распределение $\Psi(\eta)$ при $\Psi(0) = \Psi'(0) = 0$ для различных значений μ

Результаты численного эксперимента

Рассмотрим численно начальную задачу динамики солитоноподобного волнового пакета

$$U(\xi, t = 0) = \frac{1}{\cosh \xi}. \quad (40)$$

В рамках уравнения (2) при $V_g^L = 1$, $q(\xi) = \alpha(\xi) = 1 + \frac{\xi + t}{L}$ для различных значений μ и L . Параметры интегрирования начального импульса (40) $2z_0 = \delta_0 = 2/3$ совпадают с параметрами равновесного состояния пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционально увеличивающихся дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции при условии $\mu_* = \frac{15}{8} \frac{1}{L}$. При $L = 20$ мы имеем $\mu_* = 3/32$. На рис. 4 показано полученное в результате численного счета распределение модуля огибающей $|U|$ по ξ при $\mu = 3/32$, $L = 20$ в моменты времени $t = 5$ (непрерывная кривая) и $t = 200$ (прерывистая кривая). В течение всего эксперимента волновое число волнового пакета остается равным нулю. Полученное чис-

ленно распределение $|U|$ на временах $t > 2$ совпадает с полученным аналитически солитонным решением системы (36) - (37) при $\alpha_0 = q_0 = V_g^L = A_0 = 1$, $L = 20$ и $\mu = \mu_*$:

$$|U| = \frac{1}{\cosh \xi} \left(1 + \frac{1}{80 \left(1 + \frac{t}{20} \right)} \left(\xi^2 \tanh \xi + 2(\tanh \xi - \xi) + 3 \tanh \xi \ln(\cosh \xi) \right) \right). \quad (41)$$

На больших временах $t \gg 20$ распределение (41) стремится к классическому солитону $|U| = 1/\cosh \xi$ (прерывистая кривая на рис. 4).

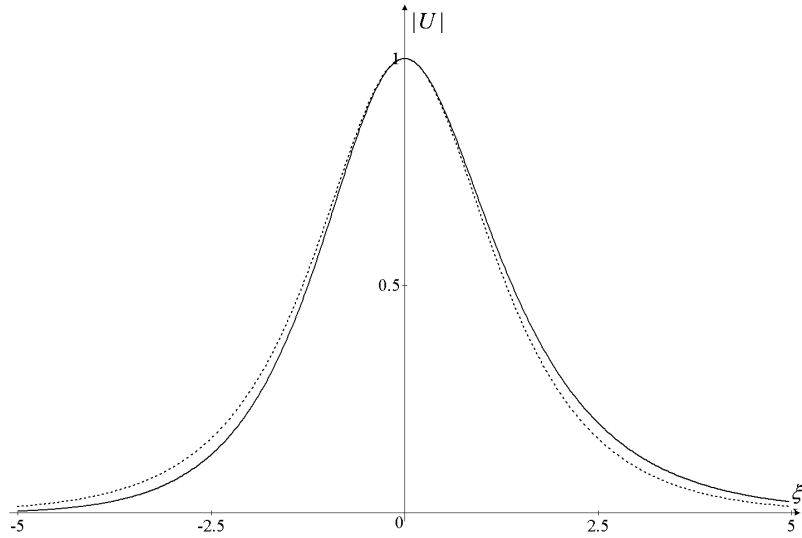


Рис. 4. Результат численного счета. Распределение модуля огибающей $|U|$ на ξ при $\mu=3/32$, $L=20$ в моменты времени $t=5$ (непрерывная кривая) и $t=200$ (прерывистая кривая)

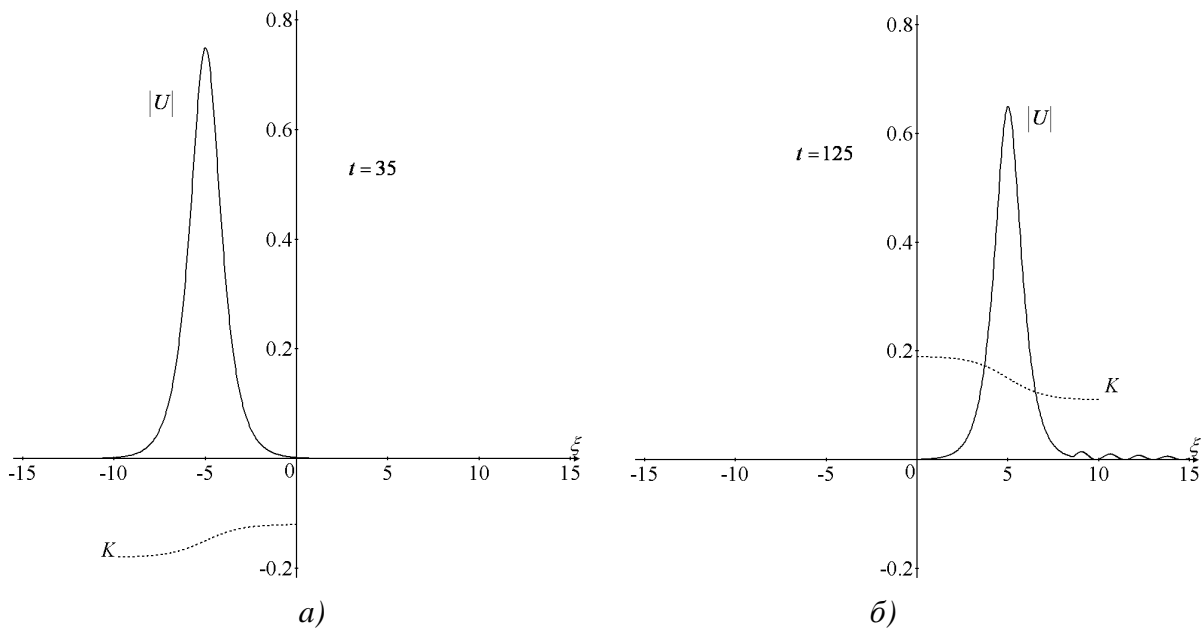


Рис. 5. Результат численного счета. Пространственные распределения $|U|$ и K при $\mu=4/32$, $L=20$. (а) соответствует $t=35$, (б) – $t=125$

Изменение параметра μ приводит к изменению параметров солитона (волнового чис-

ла, амплитуды). На рис. 5 показаны пространственные распределения модуля огибающей $|U|$ и локального волнового числа K в различные моменты времени при $\mu = 4/32$, $L = 20$. Волновое число в области ядра солитона изменяется слабо.

На рис. 6 показаны результаты численного счета (непрерывная кривая) и аналитического описания (прерывистая кривая) для зависимости локального волнового числа в точке максимума модуля огибающей волнового пакета $k(|U| = \max)$ как функции t при $L = 20$ и различных значениях μ .

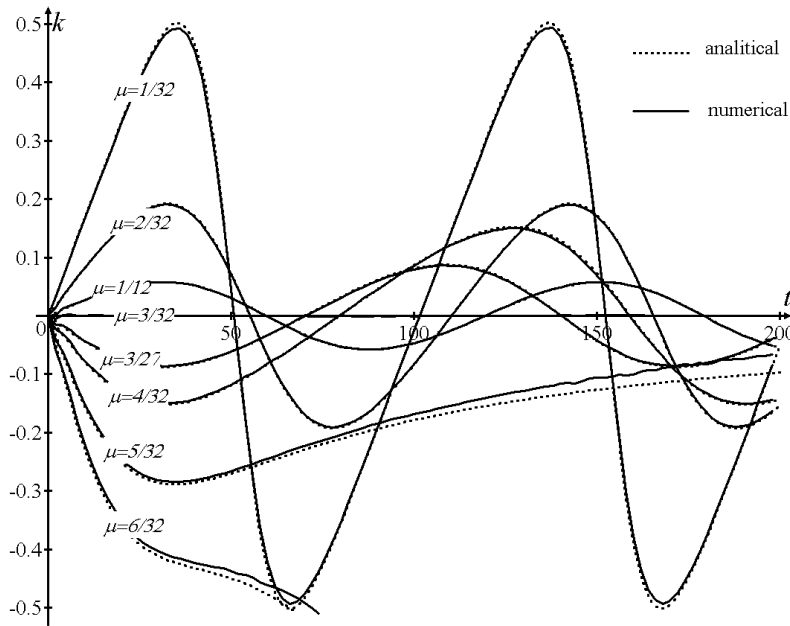


Рис. 6. Локальное волновое число в максимуме модуля огибающей волнового пакета $k(|U| = \max)$ в зависимости от t при $L = 20$ и различных μ .

Численный и аналитический результаты

При $\mu = 3/32$ локальное волновое число волнового пакета не изменяется. Это соответствует равновесию пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционально возрастающих дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции. При $\mu < 5/32$ изменяется периодически. Это соответствует динамическому равновесию пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционально возрастающих дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции. При $\mu = 5/32$ имеет место сепаратрисный режим: в течение некоторого времени волновое число уменьшается, а затем бесконечно долго стремится к нулевому значению. Наименьшая величина волнового числа при этом составляет $k = -0.29$, что соответствует полученной аналитически величине $k_{\min} = -\frac{\sqrt{z_0}}{2}$ при $z_0 = 1/3$ (рис. 1).

При $\mu > 5/32$ волновое число неограниченно убывает (доминирование пространственного вынужденного рассеяния Рамана). Динамика волнового числа соответствует полученному аналитически фазовому портрету на рис. 1.

Выводы

В данной работе рассмотрена динамика солитонов огибающей в рамках расширенного уравнения Шредингера, учитывающего пространственное вынужденное рассеяние Рамана, групповую скорость линейных волн, неоднородность как дисперсии второго порядка, так и фазовой самомодуляции. Исследование проведено как аналитически в рамках системы (30–31), так

и численно в рамках уравнения (2). Показана возможность компенсации сдвига вниз волнового числа солитона за счет рамановского рассеяния сдвигом вверх волнового числа пропорциональным увеличением дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции.

Найдено аналитическое солитонное решение, существующее в результате равновесия пространственного вынужденного рассеяния Рамана и пропорционального увеличивающихся дисперсии второго порядка и фазовой самомодуляции. Определен режим динамического равновесия пространственного вынужденного рассеяния Рамана и неоднородности среды, при котором происходит периодическое изменение параметров солитона. Результаты аналитического и численного исследований в этих режимах полностью совпадают.

В данной работе динамика солитонов рассматривалась в пренебрежении эффектами нелинейной дисперсии и линейной дисперсии третьего порядка. Возможность и условия компенсации пространственного вынужденного рассеяния Рамана в неоднородной среде при учете этих эффектов будет рассмотрена в следующих работах.

В данной научной работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 11-01-0066, реализованного в рамках программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2012–2013 гг.

Библиографический список

1. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis (Springer, New York, 2001).
2. **Dickey, L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems (World Scientific, New York, 2005).
3. **Kivshar, Y.S. and Agraval G.P.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals (Academic, San Diego, 2003).
4. **Agraval, G.P.** Nonlinear Fiber Optic (Academic Press, San Diego, 2001).
5. **Zakharov, V.E., Shabat, A.B.,** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media // Sov. Phys. JETP. 34 (1972) 62–69.
6. **Hasegawa, A., Tappert, F.,** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion // Appl. Phys. Lett. 23 (1973) 142–144.
7. **Oliviera, J.R., Moura, M.A.,** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation // Phys. Rev. E 57 (1998) 4751–4755.
8. **Mitschke, F.M., Mollenauer, L.F.,** Discovery of the soliton self-frequency shift // Opt. Lett. 11 (1986) 659–661.
9. **Gordon, J.P.,** Theory of the Soliton Self-frequency Shift // Opt. Lett. 11 (1986) 662–664.
10. **Kodama, Y. J.,** Optical solitons in a monomode fiber // Stat. Phys. 39 (1985) 597–614.
11. **Zaspel, C.E.,** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 723–726.
12. **Hong, B., Lu, D.,** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation // Inter. Journal of Nonlinear Science 7 (2009) 360–367.
13. **Karpman, V.I.,** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B 39 (2004) 341–350.
14. **Gromov, E.M., Talanov, V.I.,** Nonlinear Dynamics of Short Wave Trains in Dispersive Media // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 110 (1996) 137; Sov. Phys. JETP. 83 (1996) 73–79.
15. **Gromov, E.M., Talanov, V.I.,** Short Optical Solitons in Fibers // Chaos. 10 (2000) 551–558.
16. **Gromov, E.M., Piskunova, L.V., Tyutin, V.V.,** Dynamics of wave packets in the frame of third-order nonlinear Schrödinger equation // Physics Letters A. 256 (1999) 153–158.
17. **Scalora, M., et al.,** Generalized Nonlinear Schrödinger Equation for Dispersive Susceptibility and Permeability: Application to Negative Index Materials // Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 013902.
18. **Wen, S.C. et al.,** Modulation instability in nonlinear negative-index material // Phys Rev E, 73 (2006) 036617.
19. **Marklund, M., Shukla, P.K., Stenflo, L.,** Ultrashort solitons and kinetic effects in nonlinear metamaterials // Phys. Rev. E. 73 (2006) 037601.
20. **Tsitsas, N.L., Rompotis, N., Kourakis, I., Kevrekidis, P.G. and Frantzeskakis, D.J.,** Higher-order effects and ultra-short solitons in left-handed metamaterials // Phys. Rev. Lett. E 79 (2009) 037601.

21. **Kivshar, Yu.S.**, Dark-soliton dynamics and shock waves induced by the stimulated Raman effect in optical fibers // Phys. Rev. A. 42. N.3 (1990) P.1757-1761.
22. **Kivshar, Y.S. and Malomed, B.A.**, Raman-induced optical shocks in nonlinear fibers // Opt. Lett. 18 (1993) 485–487.
23. **Biancalama, F., Skrybin, D.V., Yulin, A.V.**, Theory of the soliton self-frequency shift compensation by the resonant radiation in photonic crystal fibers // Phys. Rev. E 70 (2004) 011615.
24. **Andrianov, A., Muraviev, S., Kim, A., Sysoliatin, A.**, DDF-based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication range // Laser Physics 17 (2007) 1296–1302.
25. **Essiambre, R.-J., Agrawal, G. P.**, Timing jitter of ultrashort solitons in highspeed communication systems. II. Control of jitter by periodic optical phase conjugation // Journal of the Optical Society of America B 14 (1997) 323–330.
26. **Chernikov, S., Dianov, E., Richardson, D., Payne, D.**, Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber // Optics letters. 18 (1993) 476–478.
27. **Essiambre, R.-J., Agrawal, G.P.**, Timing jitter of ultrashort solitons in high-speed communication systems. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers // Journal of the Optical Society of America B. 14 (1997) 314–322.
28. **Aseeva, N.V., Gromov, E.M., Tyutin, V.V.**, Soliton self-wave number down shift compensation by the increasing second-order dispersion // Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis / Ed. by B. Goldengorin, V. Kalyagin, P. Pardalos. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 32 of Springer Series in Mathematics & Statistics, p. 1–10.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

N.V. Aseeva, E.M. Gromov, V.V. Tyutin

SOLITON'S STABILIZATION IN MEDIA WITH SPATIAL STIMULATED RAMAN SCATTERING AND PROPORTIONAL INHOMOGENEOUS OF DISPERSION AND SELF - PHASE MODULATION

National Investigate University Higher School of Economics

Purpose: Dynamics of envelope solitons in the frame of the extended nonlinear Schrödinger equation $2i\left(\frac{\partial U}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial U}{\partial x}\right) + q(x)\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\alpha(x)U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial x} = 0$, taking into account non - local nonlinearity (space stimulated Raman scattering) μ , proportionally inhomogeneous of second-order dispersion $q(x)$ and self - phase modulation (cubic nonlinearity) $\alpha(x)$, and linear group velocity V_g^L is considered.

Approach: Soliton's dynamic investigated as numerically as analytically. In analytic theory the six integrals of basic model equation was reduced to two ordinary differential equations system. Phase space structure of the system was analized.

Findings: It is shown that soliton's wave number down shift (caused by space stimulated Raman scattering) is compensated by wave number up shift (cause by increasing both second-order linear dispersion and self - phase modulation). New class of soliton solutions is analytically found as a result of equilibrium of stimulated scattering and media inhomogeneous. The stimulated scattering and media inhomogeneous dynamic equilibrium regime (in the regime the soliton's parameters - wave number, amplitude and longitude - periodically varying) is analytically found too. It is numerically shown that analytical and numerical results in a good agreement: acknowledge the receipt of a both equilibrium regime and dynamic equilibrium regime and obtained solitons stability is proved.

Originality: The obtained results is original and can be important for optical fibers application.

Key words: Extended Nonlinear Schrödinger Equation, Soliton, Nonlocal Nonlinearity, Space Stimulated Raman-Scattering, Inhomogeneous, Second-Order Linear Dispersion, Cubic Nonlinearity, Self - Phase Modulation, Analytical Investigation, Numerical Simulation.

УДК 517.465

А.И. Зайцев^{1,2,3}, И.С. Костенко¹, Р.В. Леоненков¹,
К.И. Кузнецов^{1,3,4}, А.Р. Гиниятуллин³, Ю.А. Панфилова³

ОРГАНИЗАЦИЯ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ О. САХАЛИН

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований,
Южно-Сахалинск¹,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород²,
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород³,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск⁴

Цель: Создание и эксплуатация программно-аппаратного комплекса для наблюдений опасных морских явлений в прибрежной зоне о.Сахалин в режиме реального времени.

Научный подход: Проектирование и разработка прибора и программного обеспечения. Проведение экспериментальных наблюдений поверхностного волнения и анализ результатов.

Результат: Представлена архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Свободный на юго-восточном побережье о. Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря в период с ноября 2011 по май 2012 гг., зарегистрированных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано около 200 аномально больших волн за 70 дней наблюдений в безледный период.

Новизна: разработана архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени мыса Свободного на юго-восточном побережье о.Сахалин. В период эксплуатации было зарегистрировано около 200 аномально больших волн.

Ключевые слова: натурные данные, аномально-высокие волны.

Введение

Необходимость развития современной прибрежной инфраструктуры диктует жесткие требования к качеству оперативной и статистической информации о волновых режимах в исследуемых регионах [1], что невозможно без проведения длительных высокоточных наблюдений, численного моделирования и развития систем мониторинга. Постоянный мониторинг опасных морских явлений в портовых бухтах и других прибрежных районах представляет большой научный интерес и имеет выраженный прикладной аспект, связанный с обеспечением безопасности в зонах морской деятельности. Начиная с 2009 года, Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов о. Сахалин (заливы Анива, Мордвинова) [3]. В 2009 году измерения проводились на мысах залива (мыс Анива и мыс Крильон) и в глубине акватории на западном и восточном побережье (п. Новиково и п. Кириллово). В 2011 году работы так же проводились в районе мыса Свободный.

В данной работе представлены результаты измерений проводимых в районе мыса Свободный, юго-восточное побережье о. Сахалин (рис. 1).

Средства измерения

Измерения проводились с помощью автономных донных регистраторов придонного давления АРВ-К12, произведённых в КБ г. Углич. Прибор выполнен в корпусе из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. На рис. 2 показана принципиальная конструкция датчика. В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Такой выбор не случаен: пьезорезонаторные элементы имеют малую температурную зависимость и высокую точность. Диапазон измерения давления (глубина погружения) до 100 м, точность по давлению 0,06%, диапазон рабочих температур от -4 до 40 градусов по Цельсию (°C). Автономность приборов составляет около 6 мес. Дискретность измерений 1 с. Глубина постановки прибора на мысе Свободный составляет 10 м. Из-за малой глубины ветровые волны здесь являются мелководными, и их измерение может производиться с помощью датчиков давления с использованием гидростатических формул пересчета. Эти приборы уже использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 года и Невельского цунами 2007 года [2], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [8].

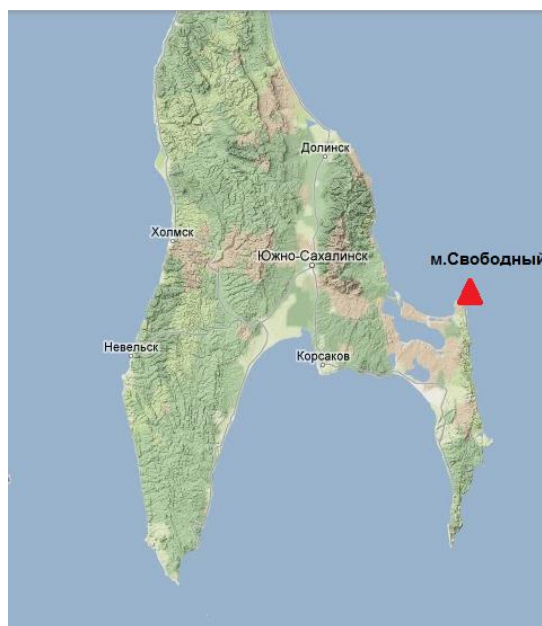


Рис. 1. Местоположение района проведения натуральных наблюдений в районе м. Свободный, юго-восточная часть о. Сахалин, 2011-2012 гг.

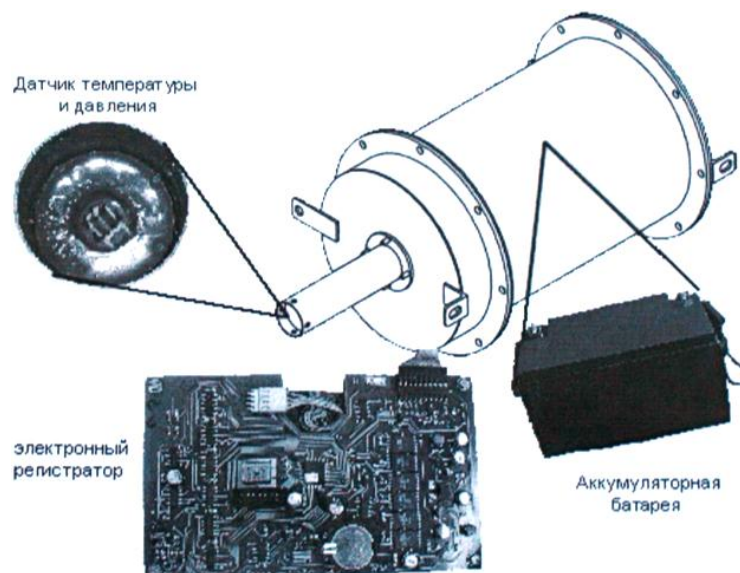


Рис. 2. Принципиальная конструкция автономного регистратора придонного давления (АРВ-К12)

Использование автономного прибора АРВ-К12 является удобным, так как установка и обслуживание являются достаточно нетрудоемкими. Но этот подход исключает передачу данных в режиме реального времени. СКБ САМИ ДВО РАН с 2010 года проводит измерения с помощью прибора, который позволяет передачу данных в режиме реального времени на сервер СКБ САМИ с последующей автоматической обработкой. В качестве полигона используется мыс Свободный. К настоящему времени выполнены работы по установке веб-камеры, которая в режиме реального времени передаёт данные на сервер www.skbsami.ru.

В 2011 году были проведены испытания прибора. Он прост в изготовлении и эксплуатации. Имеет возможность собирать до трех различных гидрофизических параметров и писать шумы моря в реальном режиме времени на удалении одного километра от пункта сбора данных. Встроенная система самотестирования позволяет оперативно выявить неисправность в станции. При доработке прибора возможно увеличить как количество получаемых параметров, так и дальность постановки. Гидрофонный модуль с резонансной частотой 8 кГц, тензопреобразователь Д0,6-2 с предельными рабочими значениями от 0 до 0,6 МПа. Этот тензопреобразователь на 60 м. Схема прибора приведена на рис. 3.

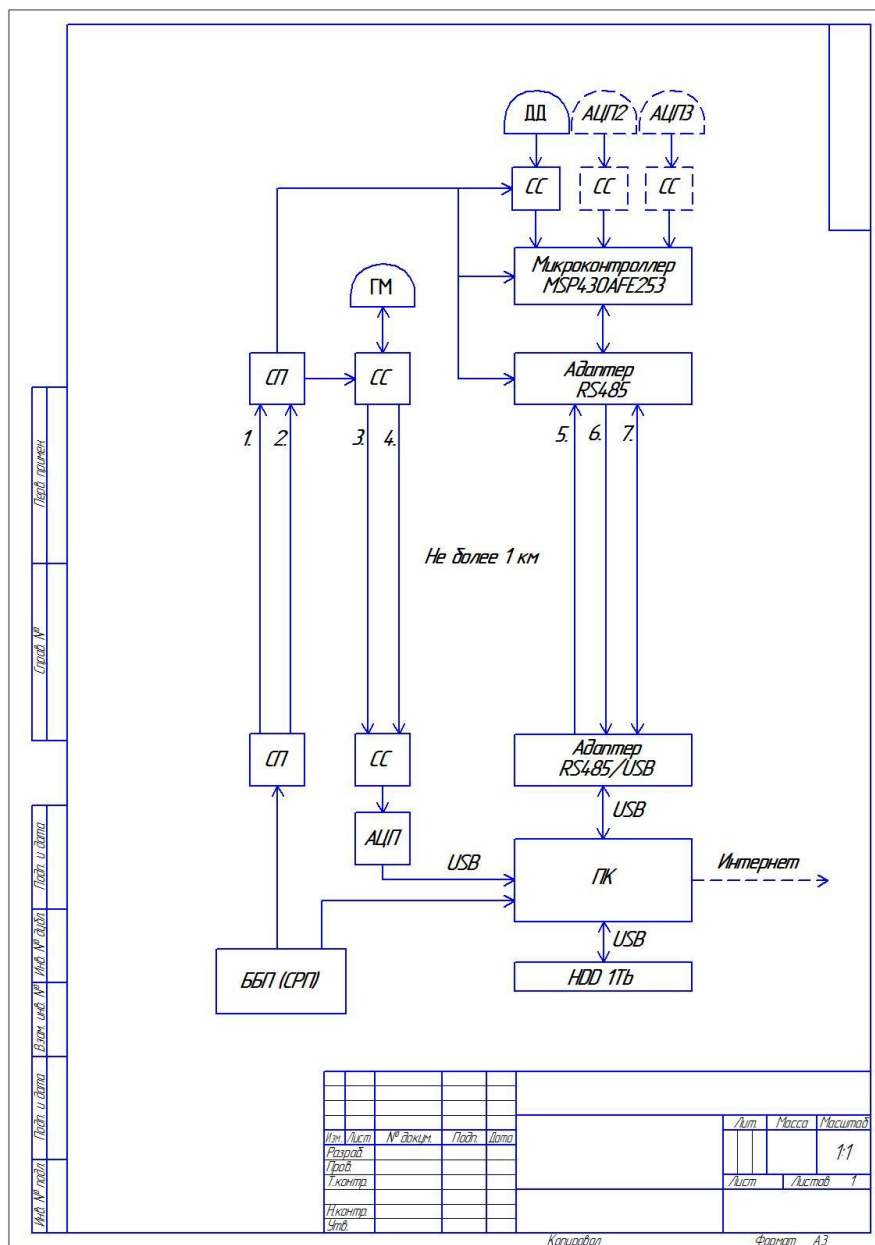


Рис. 3. Схема прибора

ДД – датчик давления (опрос с периодичностью 5 – 10 Гц на выбор); АЦП2, АЦП3 – возможность подключить еще аналоговые датчики с такой же периодичностью опроса; СС – схема согласования; MSP430AFE253 – микроконтроллер с 3-канальным 24-битным сигма-дельта АЦП с дифференциальными входами; ГМ – гидрофонный модуль; СП – схема питания; ББП – блок бесперебойного питания; СРП – схема резервного питания; АЦП – аналога цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; HDD – жесткий диск на 1 терабайт (при частоте дискретизации записи с ГМ 50к его хватит приблизительно на 117 дней); Интернет – возможен как спутниковый канал передачи данных, так и сотовый

Для хранения и обработки полученных данных разработана и реализована система хранения гидрологических данных. Подобная система позволяет структурировать и упорядочить собранные океанологические данные. Удобный доступ с помощью пользовательского интерфейса существенно упрощает работу с ними. Дополнительный плюс системы в том, что доступ к данным возможен с любого компьютера из любой точки мира, при этом не требуется дополнительного программного обеспечения. Система позволяет пользователю получить данные с любой дискретностью в виде тестового файла с выбранными рядами данных. С такими файлами работает любая программа обработки данных. Подобный подход предоставляет пользователю абсолютную свободу в выборе программного инструмента для дальнейшей работы. Данная система позволяет проводить пространственный анализ волновых процессов. Она проходит адаптацию и в скором времени будет доступна на сайте www.skbsami.ru.

Определение колебаний уровня моря по данным пульсаций давления на дне

Датчик придонного давления регистрирует колебания давления, которые в общем случае не совпадают с колебаниями уровня моря. Как известно, поверхностные волны затухают с глубиной, поэтому если использовать гидростатические соотношения, то донный датчик давления будет занижать амплитуду волн. Эта проблема специально изучалась [4, 5], и в рамках линейной потенциальной теории легко получить выражение для спектрального коэффициента ослабления поверхностных волн

$$R(\omega) = \frac{\text{ch}(kd)}{\text{ch}(kD)}, \tag{1}$$

где D – глубина моря; d – высота постановки датчиков над дном (в наших измерениях $d = 0,3$ м); k – волновое число, связанное с частотой волны ω дисперсионным соотношением

$$\omega(k) = \sqrt{gk \text{th}(kD)}, \tag{2}$$

где g – ускорение силы тяжести. Разрешить дисперсионное соотношение (2) относительно волнового числа невозможно, поэтому удобнее использовать следующее приближенное решение:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{ghG(\alpha)} + \frac{\omega^4}{g^2}, \tag{3}$$

где $G = 1 + 0,6522\alpha + 0,4622\alpha^2 + 0,0864\alpha^4 + 0,0675\alpha^5$ и $\alpha = \omega^2 D/g$.

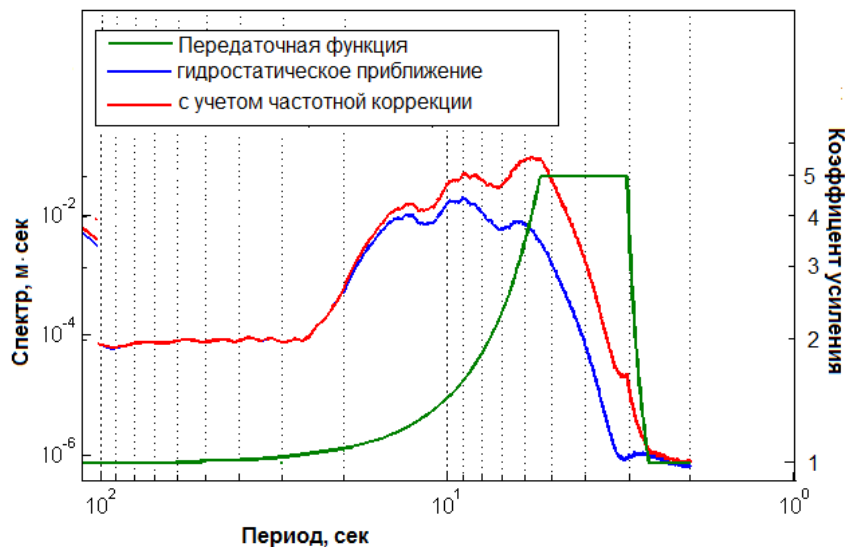


Рис. 4. Пример передаточной функции для глубины 16 м и усредненные спектры рассчитанного уровня моря по формуле (1) и в гидростатическом приближении

Фактически, соотношение (1) определяет связь спектральных компонент давления и смещения водной поверхности в Фурье-спектрах волновых полей. Рассчитанное с помощью (1) и (3) оно представлено на рис. 4 для интересующего диапазона изменения глубин и периодов волн. Как видно, негидростатические эффекты в поле ветровых волн являются принципиальными и могут кардинально влиять на оценки высот волн.

На рис. 4 представлены амплитудные спектры ветрового волнения и используемая передаточная функция, рассчитанная для этой записи. Поскольку передаточная функция экспоненциально нарастает в области высоких частот (малых периодов) и шум здесь значительно усиливается, то мы в соответствии с рекомендациями ограничили значения передаточной функции величиной 5 и обрезали спектр на 0,33 Гц.

В результате введенной частотной коррекции поправка в определении смещения уровня воды оказалась существенной и увеличилась примерно вдвое по сравнению с гидростатическим значением (рис. 5). Отметим также, что период и фаза колебаний уровня моря, как видим из рис. 5, не меняется при использовании частотной коррекции, а меняется только амплитуда волн.

В соответствии с описанной методикой процедуру предварительной коррекции прошли все анализируемые в работе записи. Был разработан программный комплекс, состоящий из набора вычислительных программ, реализованных в C++, и скриптов на языке Matlab, для отображения и анализа результатов вычислений, особенно вычислений высот и периодов волн.

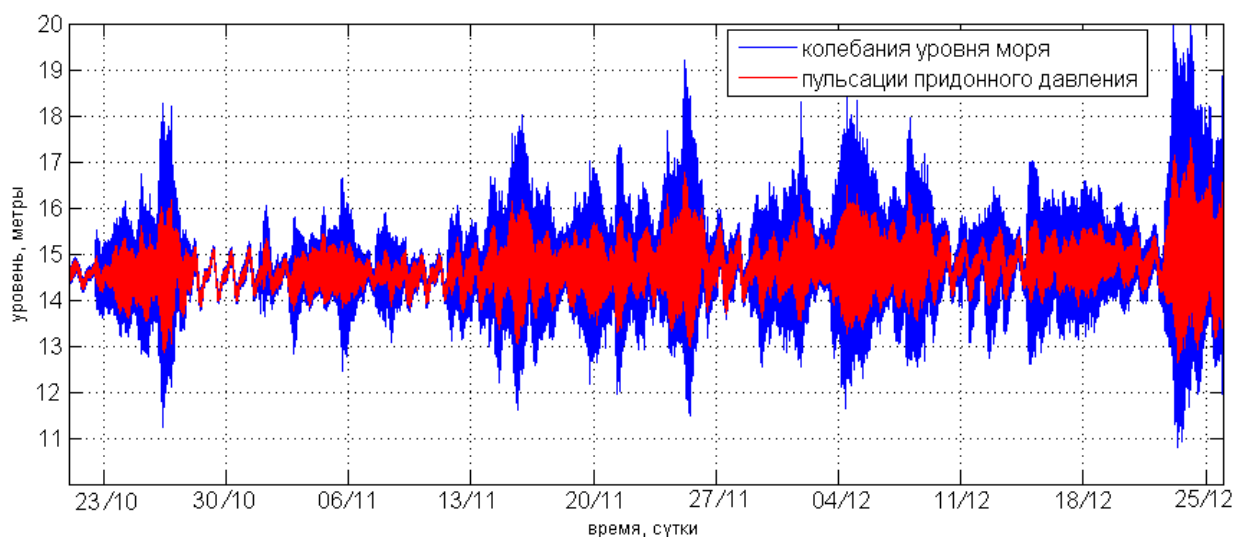


Рис. 5. Отличие в форме рассчитанных колебаний уровня моря при использовании гидростатической формулы (жирная линия) и с помощью частотной коррекции (тонкая линия). Глубина постановки датчика 15 м в районе м. Свободный

Анализ полученных данных на наличие anomalно больших волн

В соответствии с описанной методикой были скорректированы данные, полученные в результате эксперимента в районе мыса Свободный с октября 2011 по май 2012 гг. График уровня моря, рассчитанный по этим данным с учетом гидростатической поправки, представлен на рис. 6.

Предварительный анализ колебаний обнаруживает множество сильных штормов в период наблюдений с ноября по декабрь 2011 года. Наиболее сильный шторм отмечается в конце декабря – начале января с амплитудой ветрового волнения до 9 м. Далее представлен график значительных высот волн, рассчитанный по этим колебаниям, по которому также можно отметить высокую штормовую активность и связанные с этим относительно большие значительные высоты волн, что в целом является характерным для данного региона (рис. 7).

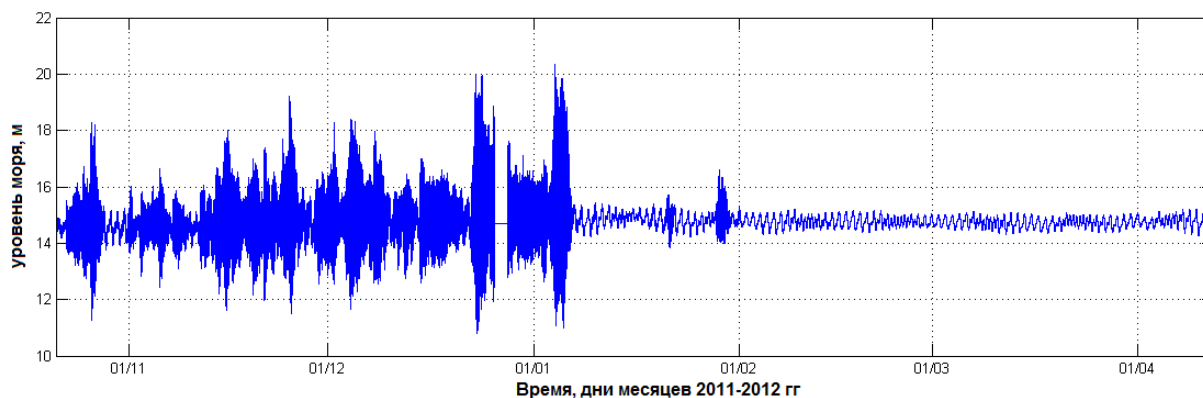


Рис. 6. График уровня моря, рассчитанный с учетом гидростатической поправки, по данным натуральных наблюдений в районе м. Свободный 2011–2012 гг.

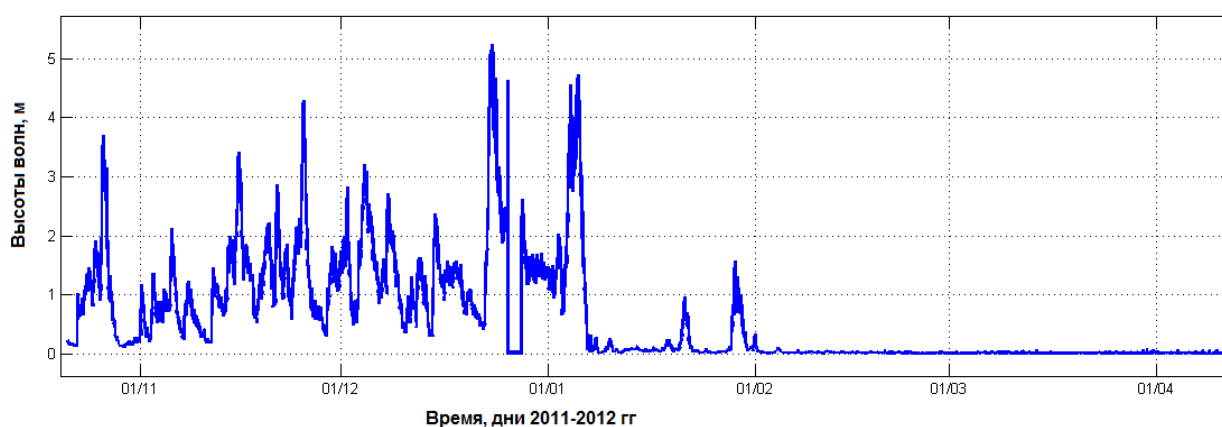


Рис. 7. Значительные высоты волн, рассчитанные с учетом гидростатической поправки по инструментальным наблюдениям в районе м. Свободный 2011–2012 гг.

Одной из интересных отличительных особенностей полученных записей является то, что на них присутствуют участки, когда датчик регистрировал волнение моря, покрытого льдом [10]. Таким образом, у нас есть возможность отследить изменение различных характеристик (спектральных, статистических) волнения не только во время изменения режима волнения, но и во время установления ледового покрова.

Для оценки изменения спектральных характеристик во времени по всей записи был построен текущий спектр, представленный на рис. 8, а, б.

По рис. 8, а, б видно, что периоды наиболее сильных спектральных пиков приходятся на диапазон волнения от 5 до 12 с. На записи удалось зарегистрировать два наиболее сильных шторма: 24 декабря 2011 года и 5 января 2012 года. Во время этих событий заметно существенное усиление не только ветровых волн и волн зыби, но и энергии в области инфрагравитационных волн. Стоит особо отметить резкое изменение спектра волн после этих штормов. 7 января энергия в области ветровых волн, высокочастотной и среднечастотной зыби резко падает, что очевидно связано с влиянием ледового покрова моря на волнение. Вероятно, лед был подогнан к берегу сильными штормами. 22 и 29 января на спектре отмечаются интересные усиления в области зыби с периодами 15–18 с, зародившейся, вероятно, еще в Тихом океане, поскольку такие низкие периоды зыби нехарактерны для зыби, образующейся в Охотском море.

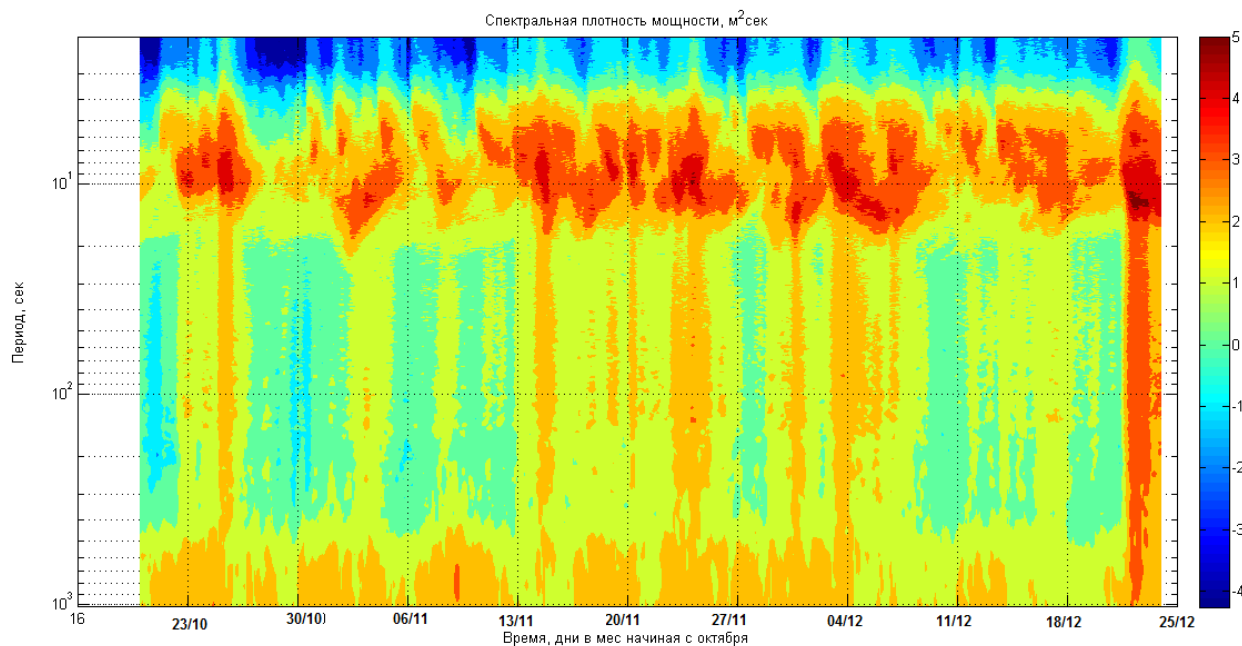
Также был выполнен поиск аномально больших волн, или так называемых волн-убийц. Основным свойством и признаком этих волн является их внезапно большая высота и

крутизна [6–15]. На практике чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения аномально высоких волн:

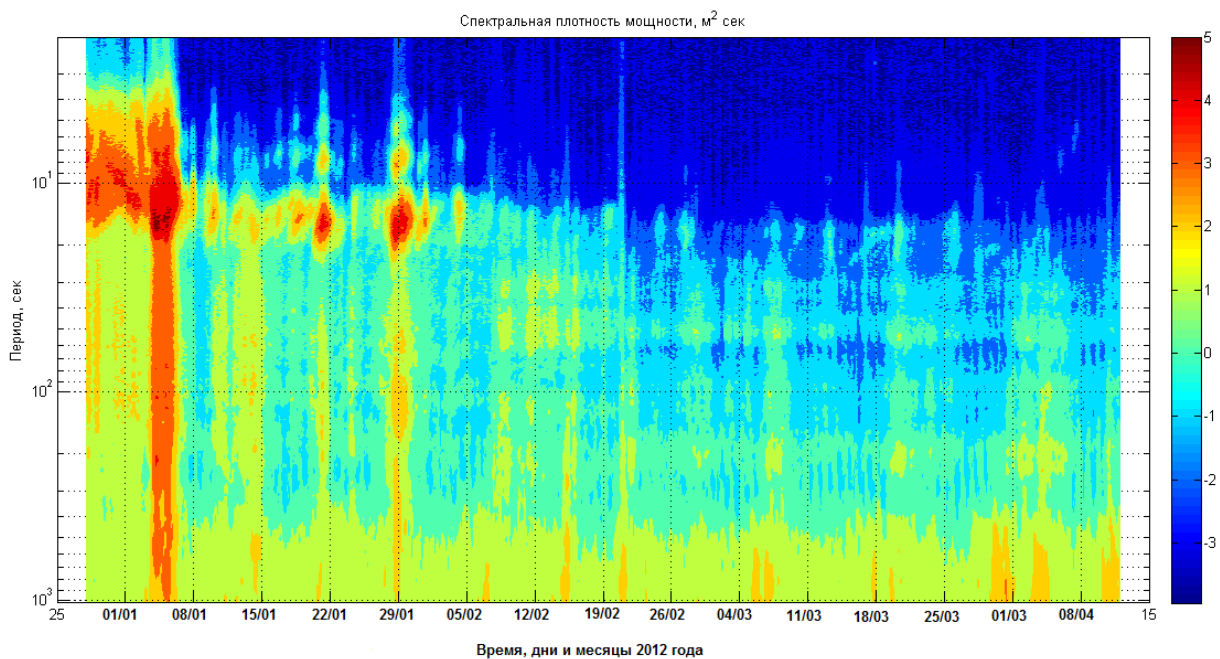
$$H/H_s > 2, \quad (4)$$

где H – высота отдельной волны; H_s – значительная высота волн.

Всего на анализируемой записи за 70 дней наблюдения волнения в безледный период было выделено около 200 волн, попадающих под определение амплитудного критерия.



a)



б)

Рис. 8. Текущий спектр (по данным, полученным вблизи м. Свободный), рассчитанный для участка записи:

a – с 23.10.2011 по 25.12.2011; *б* – 01.01.2012 по 10.04.2012

Выводы

Разработана архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени. В качестве полигона использовался мыс Свободный. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса на юго-восточном побережье о. Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря за октября 2011 по май 2012 года, полученных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано около 200 волн за 70 дней наблюдений в безледный период.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216-а, 11-05-92002-ННС а), МК-4378.2011.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5.

Библиографический список

1. Глуховский, Б.Х. Исследование морского ветрового волнения / Б.Х. Глуховский. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 284 с.
2. Зайцев, А.И. Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 2. С. 1–4.
3. Зайцев, А.И. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин / А.И. Зайцев [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 4. С. 35–42.
4. Заславский, М.М. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн / М.М. Заславский [и др.] // Океанология. 2001. Т. 41. № 2. С.195–200.
5. Кабатченко, И.М. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 / И.М. Кабатченко [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С.150–155.
6. Куркин, А.А. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин [и др.] – Нижний Новгород: ННГУ, 2004. – 157 с.
7. Куркин, А.А. Физика волн-убийц в океане. «Нелинейные волны-2004» / А.А. Куркин [и др.]. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 37–51.
8. Левин, Б.В. Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесённой сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 2. С. 1–6.
9. Лидбеттер, М. Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер. – Москва: Мир, 1989. – 391 с.
10. Fessel, D. Wave measurements using upward looking in marginal and polar sea ice regimes / D. Fessel [et al.] // ASL Environmental sciences. 2002
11. Kharif, Ch. Rogue Waves in the Ocean / Ch. Kharif [et al] // Springer, 2009. – 216 p.
12. Kharif, C. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon. European J Mechanics / C. Kharif [et al.] // B – Fluid, 2003, vol. 22, No. 6. P. 603–634.
13. Kharif, Ch. Freak wave phenomenon: physical mechanisms and modeling. Chapter 3. Waves in Geophysical Fluids (Eds. Grue J. and Trulsen K.). / Ch. Kharif [et al.] //CISM Courses and Lectures, No. 489. Springer, 2006. P. 107–172.
14. Nikolkina, I. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006–2010. / I. Nikolkina [et al.] // Natural Hazards, 2011b, DOI 10.1007/s11069-011-9945-y.
15. Slunyaev A. et al. Rogue waters. Contemporary Physics. 2011
16. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/index.html>

Дата поступления
в редакцию 16.10.2012

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.8+ 681.31

А.В. Викулов, А.А. Кочешков

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий

Представлена модель динамических свойств информационной системы в пространстве состояний. Ставится задача наблюдения за состоянием системы. Предлагается задача оценки параметров модели.

Ключевые слова: управление, наблюдение, информационная система, моделирование, пространство состояний

Введение

Современные информационные системы (ИС), в отличие от простых хранилищ документов, являются динамичными и развивающимися объектами. Наряду с задачами сбора, хранения и поиска данных, большое значение имеют текущие процессы управления и наблюдения за состоянием ИС.

В сетевой среде эффективное управление взаимодействием клиентов и серверов позволяет рационально распределять ресурсы, избежать множества лишних операций по передаче и обработке данных. На стороне серверов характер изменчивости данных влияет на такие процессы, как репликация, резервное копирование, индексация в поисковых системах. На стороне клиентов необходимо решить вопрос о периодичности формирования запросов к наблюдаемым серверам, чтобы соотнести выгоду от новой информации с затратами на ее получение и обработку. Решение задачи наблюдения за информационной системой должно учитывать общую цель обработки информации и минимизировать обобщенный критерий, в котором штраф от задержки получения информации о состоянии информационной системы соотносится с затратами на ее получение.

Формализовать такую оптимизационную задачу и получить необходимые априорные данные для объектов информационного характера сложно, поэтому чаще всего проблема решается простейшим эвристическим способом, что в итоге дает отклонение или в область вероятных существенных потерь информации, или в область неоправданных затрат на повторную обработку одной и той же информации. Построение адекватной математической модели, описывающей динамические процессы в ИС, дает основу для обоснованной и более выгодной стратегии наблюдения и обслуживания.

Для эффективного планирования использования ресурсов ИС клиентами необходимо решение задачи наблюдения за ее динамикой. Процесс наблюдения в динамических системах функционально может быть разбит на два этапа:

- проведение измерений;
- преобразование полученной информации по определенным алгоритмам.

Первый этап реализуется с помощью средств наблюдения и каналов связи, второй –

программным путем. Подавляющая часть исследований посвящена оптимизации второго этапа как наиболее легко перестраиваемого и носящего обобщенный характер. При этом модель измерительной системы обычно принимается фиксированной и заданной совместно с моделью наблюдаемого объекта. В то же время полнота и достоверность измерительной информации, получаемой на первом этапе, несомненно, определяют качество функционирования всей системы, поэтому выбор наилучшего варианта структуры измерительной системы и режимов ее работы во времени является важной задачей.

Предлагается решать задачу методом пространства состояний, что позволяет учитывать и многомерность, и нестационарность стохастических процессов.

Грамотно спланированное наблюдение за состоянием ИС лежит в основе рационального распределения ресурсов ИС, управления пользователями, позволяет своевременно решать разнообразные проблемы, возникающие при ее внедрении и эксплуатации.

Теоретический анализ

Практически все информационные системы являются динамическими объектами, где постоянно происходят изменения как в структуре самой системы, так и в содержании ее элементов. Под изменением системы будем считать выполнение хотя бы одной из следующих трех операций: добавление, удаление и внутреннее изменение элемента данных. Данное определение базируется на основе анализа типичных операций в реальных системах и удобно тем, что позволяет задавать количественные характеристики и формально описывать динамику наблюдаемых объектов.

Динамика информационной системы состоит в изменении ее состояния и параметров во времени. Состояние будем характеризовать множеством изменений элементов данных и структурных связей между ними, произошедших внутри системы за указанный временной интервал.

Отличительной особенностью динамических информационных систем является отсутствие явно выраженного физического закона их функционирования. Изменения в таких системах происходят случайным образом, поэтому единственным способом оценить параметры наблюдаемого объекта является наблюдение за его динамикой, накопление и исследование статистики случайных процессов, служащих моделью состояния системы. Свойства этих случайных процессов могут непосредственно использоваться в алгоритмах ковариационного анализа для построения моделей методами теории временных рядов, базирующихся на использовании моделей авторегрессии и скользящего среднего [1, 2].

Классическим методом моделирования динамики систем является метод пространства состояний (МПС), который позволяет учитывать многомерность и нестационарность процессов. Согласно МПС линейная дискретная стохастическая модель объекта имеет вид

$$x_{k+1} = A_k x_k + C_k w_k \quad (1)$$

где x_k – n -мерный вектор состояния; $x_{k+1} = x[(k+1)T]$; A_k – матрица состояния объекта размерности $n \times n$, w_k – l -мерный вектор шума в объекте с математическим ожиданием $E\{w_k\} = 0$.

Состояние ИС характеризует количество элементов данных, классифицированных по типу и местам хранения. Изменение состояния вызывают действия обновления и модификации данных.

Функция состояния системы представляет собой дискретный случайный процесс

$$x_k = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n)^T.$$

Дискретизация этого процесса с постоянным периодом T во временной области производится при помощи кусочно-постоянной аппроксимации [3, 4]. В каждый $(k+1)$ -й момент времени $x(k+1)$ есть число изменений в системе относительно предыдущего k -го шага.

В общем случае имеем n -мерный вектор состояния, определенный в k -й момент вре-

мени. Координаты данного вектора x_k – это множество изменений подсистем, входящих в состав наблюдаемого информационного объекта.

Состояние объекта в подавляющем большинстве случаев известно не полностью. Вся доступная информация о текущем состоянии x_k содержится в векторах измерений (наблюдений), проводимых в дискретные моменты времени $t_k \leq kT$. При постоянном периоде измерений $t_k - t_{k-1} = T$ уравнение измерителя имеет вид

$$y_{k+1} = H_{k+1}x_{k+1} + \eta_{k+1} \quad (2)$$

где $y_{k+1} = y[(k+1)T]$ – m -мерный вектор измерения; H_{k+1} – матрица измерителя размерности $m \times m$, η_{k+1} – m -мерный вектор шума измерений. Дискретный случайный процесс η_{k+1} физически интерпретируется как погрешность измерений и может быть как белым гауссовским шумом с математическим ожиданием $E\{\eta_{k+1}\} = 0$ и КФ $R_{k+1}(\eta_{k+1}) = E\{\eta_{k+1}\eta_{k+1}^T\}$, $k = \overline{0, N}$, так и коррелированным процессом.

В системе с управляемыми измерениями уравнение измерителя записывается в следующем виде, синхронном с дискретностью уравнения объекта (1):

$$y_{k+1} = H_{k+1}(S_{k+1})x_{k+1} + \eta_{k+1}(S_{k+1}), \quad (3)$$

причем среди векторов y_{k+1} доступны только те, что соответствуют моментам проведения измерений. Остальные вектора можно характеризовать как фиктивные измерения.

Стратегия наблюдений на N -шаговом переходном процессе представляет собой последовательность

$$S^N = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}, S_i \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

Для системы с постоянными измерениями S^N является единичной.

В системах с кратными периодами дискретности стратегия вида

$$S^N = \{\dots, 1, 0, 0, \dots, 0, 1, 0, 0, \dots, 0, \dots, 1, 0, 0, \dots, 0, \dots\}$$

характеризует систему с периодическим режимом съема информации.

Таким образом, дискретная модель системы наблюдения – это уравнение объекта, уравнение измерителя в синхронном с уравнением объекта виде и стратегия наблюдения S^N на N -шаговом переходном процессе.

Оценивание параметров модели

Наблюдаемые координаты состояния ИС представляют собой векторный случайный процесс с дискретным временем. В рамках корреляционной теории по собранной статистике могут быть построены модели временных рядов: авторегрессия и скользящее среднее.

Классическое уравнение авторегрессии с постоянными коэффициентами имеет следующий вид (5):

$$\xi_{k+1} = \sum_{i=0}^{\alpha} \Gamma_i \xi_{k-i} + w_k \quad (5)$$

где $\xi_k \in R^p$ – вектор состояния процесса размерности p ; $w_k \in R^p$ – вектор белого гауссовского шума с КМ Q_w , некоррелированный с; $\Gamma_j \in R^{p \times p}$ – матрицы коэффициентов размерности $p \times p$, $j = \overline{0, \alpha}$. Согласно терминологии теории динамических систем, уравнение (5) описывает линейную стохастическую систему с запаздываниями, вектор состояния которой является дискретным марковским процессом порядка $\alpha + 1$.

Достаточной статистикой гауссовского марковского процесса (5) порядка $\alpha + 1$ являются математическое ожидание $\bar{\xi}_k = E\{\xi_k\}$, $(\alpha + 1)$ отсчетов матричной КФ

$$Q(i) = E\{\xi_k \xi_{k-i}^T\}, i = \overline{0, \alpha + 1}.$$

Для определения параметров уравнения (5) предлагается два метода. Рассмотрим метод точечной аппроксимации заданной КФ, предполагающий получение модели (5), при которой КФ формируемого процесса $Q_M(i)$ совпадает в $(\alpha + 1)$ -й точках по аргументу i с заданной КФ $Q(i), i = \overline{0, \nu}$.

Согласно работе [5], матричная КФ $Q(i), i = \overline{0, \alpha + 1}, k = \overline{0, N}$, порождающая положительно определенную блочную матрицу $M(\alpha, \alpha)$

$$M(\alpha, \alpha) = \begin{bmatrix} Q(0) & Q(1) & \dots & Q(\alpha) \\ Q^T(1) & Q(0) & \dots & Q(\alpha-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q^T(\alpha) & Q^T(\alpha) & \dots & Q(0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

является достаточной статистикой некоего гауссовского центрированного марковского процесса порядка $\alpha + 1$, описываемого уравнением (5).

Введем в рассмотрение взаимную КМ:

$$M(1, \alpha) = [Q(1), Q(2), \dots, Q(\alpha + 1)] , \quad (7)$$

причем блоки матриц $R(\alpha, \alpha)$ и $R(1, p)$ являются элементами заданной КФ.

Блочная матрица выбирается в виде

$$\Gamma(\alpha) = M(1, \alpha)M(\alpha, \alpha)^{-1} . \quad (8)$$

КМ Q_w возбуждающего белого шума w_k находится из уравнения

$$Q_w = Q(0) - M(1, \alpha)M(\alpha, \alpha)^{-1}M(1, \alpha)^T . \quad (9)$$

Таким образом, заданная КФ $Q(i), i = \overline{0, \alpha + 1}$ определяет параметры гауссовский плотности вероятности марковского процесса и, соответственно, параметры его модели в виде уравнения авторегрессии с постоянными коэффициентами.

Другой подход, позволяющий учесть при синтезе формирующего фильтра (5) $\gamma > \alpha + 1$ значений $Q(i), i = \overline{0, \gamma}$, получим, применяя метод наименьших квадратов (МНК).

Сформируем блочную матрицу размерностью $\gamma \times \alpha + 1$ блоков, следующего вида:

$$M(\gamma, \alpha) = \begin{bmatrix} & M(\alpha, \alpha) & & \\ Q(\alpha + 1) & Q(\alpha) & \dots & Q(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q(\gamma) & Q(\gamma - 1) & \dots & Q(\gamma - \alpha) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Взаимная КМ запишется:

$$M(1, \gamma) = [Q(1), Q(2), \dots, Q(\gamma + 1)] \quad (11)$$

С помощью псевдообратной матрицы

$$M^+(\gamma, \alpha) = [M(\gamma, \alpha)^T M(\gamma, \alpha)]^{-1} M(\gamma, \alpha) \quad (12)$$

находится оптимальное в смысле минимумов наименьших квадратов решение

$$\Gamma(\alpha)^T = M^+(\gamma, \alpha)M(1, \gamma)^T . \quad (13)$$

В качестве приближения КМ возбуждающего шума может быть принято значение

$$Q_w = Q(0) - \Gamma(\alpha)M(\alpha, \alpha)\Gamma^T(\alpha) . \quad (14)$$

Рассчитав параметры модели $\Gamma(\alpha)$ и Q_w , вычислим КФ модели. Ковариационная функция модели $Q_M(i)$ на интервале $\alpha < i < \gamma$ вычисляется по формулам

$$\begin{cases} Q_M(0) = \sum_{i,j=0}^{\alpha} \Gamma_{k,i} Q_M(|i-j|) \Gamma_{k,j}^T + Q_{Mw}, \\ Q_M(i) = \sum_{j=0}^{\alpha} \Gamma_j Q_M(|i-j-1|), i = \overline{1, \gamma} \end{cases} \quad (15)$$

Найти решение системы (15) предлагается рекуррентной процедурой

$$\begin{cases} Q_{M_{k+1}}(0) = \sum_{i,j=0}^{\alpha} \Gamma_i Q_{M_{k-\min(i,j)}}(|i-j|) \Gamma_{k,j}^T + Q_{M_{wk}}, \\ Q_{M_{k+1}}(i) = \sum_{j=0}^{\alpha} \Gamma_j Q_{M_{k-\min(i-j-1,j)}}(|i-j-1|), i = \overline{1, \gamma} \end{cases} \quad (16)$$

по шагам $k = \overline{0, N}$ до достижения установившегося решения $Q_M(i)$. Начальные условия $Q_{M_0}(i) = Q(i)$.

Отождествив выходную последовательность ξ_k с процессом x_k , а шум фильтра w_k с шумом в объекте, можно перейти от уравнения авторегрессии к уравнению объекта в пространстве состояний.

Оценка процесса авторегрессии

Рассмотрим случай управляемого наблюдения, когда измеряются все координаты вектора состояния без погрешности, но в определенные моменты дискретного времени k .

Модель наблюдателя может быть сформирована зависимостями

$$H(S_k) = \begin{cases} I, \text{ при } S_k = 1 \\ 0, \text{ при } S_k = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

где I – единичная $n \times n$ матрица, η_{k+1} – вектор белого шума с ковариационной матрицей

$$R_\eta(S_k) = \begin{cases} 0, \text{ при } S_k = 1 \\ \infty, \text{ при } S_k = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

где условная запись $R_\eta = \infty$ воспринимается как неограниченное возрастание диагональных элементов матрицы R для процедуры предельных переходов.

В случае управляемого наблюдения с полным и точным измерением вектора состояния (с учетом вида $H(S_{k+1})$ и $R_\eta(S_{k+1})$) получим оптимальную оценку состояния в виде

$$\hat{\xi}_{k+1} = \begin{cases} y_{k+1}, S_{k+1} = 1, \\ \hat{\xi}_{k+1|k}, S_{k+1} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

где $\hat{\xi}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{\alpha} \Gamma_i \hat{\xi}_{k-i}$.

Тогда ошибка оценки $\tilde{\xi}_{k+1} = \xi_{k+1} - \hat{\xi}_{k+1}$

$$\tilde{\xi}_{k+1} = \begin{cases} 0, S_{k+1} = 1, \\ \xi_{k+1} - \hat{\xi}_{k+1}, S_{k+1} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Для планирования наблюдений и анализа точности необходимо вычислить ковариационную функцию ошибки оценки $\tilde{Q}_k(i) = E\{\tilde{\xi}_k \tilde{\xi}_{k-i}^T\}$, $i = \overline{0, \nu}$.

Критерием точности оценок служит дисперсия ошибки оценки. Рекуррентные уравнения для вычисления $\tilde{Q}_k(i)$ должны учитывать наличие измерения на соответствующей итерации.

$$\begin{cases} \tilde{Q}_{k+1}(0) = \sum_{i,j=0}^{\alpha} \Gamma_i \tilde{Q}_{k-\min(i,j)} (|i-j|) \Gamma_{k,j}^T + Q_{wk} \\ \tilde{Q}_{k+1}(i) = \sum_{j=0}^{\alpha} \Gamma_j \tilde{Q}_{k-\min(i-j-1,j)} (|i-j-1|), i = \overline{1, \gamma} \end{cases} \quad (21)$$

Экспериментальная часть

На основе предложенных алгоритмов был реализован программный комплекс, предназначенный для исследования динамики локальных и удаленных информационных систем. Программный комплекс состоит из трех программных средств: монитора изменений информационной системы, обработчика данных и анализатора, предназначенного для построения моделей и стратегий наблюдения. Этап моделирования представляет собой запуск монитора для слежения и сбора статистики выбранного объекта. После требуемого периода наблюдений данные должны быть обработаны программой обработчиком измерений. Эта программа позволяет извлечь необходимые данные из хранилища, просмотреть их, определить координаты состояния и настроить параметры экспорта: отфильтровать данные по времени, выставить фильтр, выбрать формат файла. После того, как экспорт данных был произведен, полученный файл может быть использован для анализа в программе анализаторе или в любой другой совместимой программе. Программа анализатор строит модель динамики объекта, оценивает входящий процесс и выдает результаты в наглядном графическом и табличном видах.

Результаты

Ряд информационных ресурсов сети Интернет имеет ярко выраженный динамический характер. В качестве примера был взят информационный портал РосБизнесКонсалтинг, расположенный на веб-сайте <http://www.rbc.ru>.

На начальном этапе изучения свойств объекта с постоянным периодом в 1 час собирались данные об обновлениях текстовых блоков и графических элементов. Обозначим процесс изменения текстовых блоков как $(x_k)_1$, а графических $(x_k)_2$.

Процессы изменения данных на сайте имеют коррелированный характер, что связано с периодичностью суточной активности. В дневной период интенсивность изменений в несколько раз выше, чем в ночные часы. Это позволяет планировать наблюдения за информацией на сайте и экономить ресурсы.

Имея адекватную модель системы, можно рассмотреть задачу управляемого наблюдения. Чтобы решить эту задачу, необходимо выбрать стратегию наблюдения, рассчитать оценку состояния системы и проанализировать ее точность. В качестве примера, зададим стратегию таким образом, что наблюдение будем производить в моменты времени k , кратные T :

$$S_k = \begin{cases} 1, k \text{ кратно } T \\ 0, k \text{ не кратно } T \end{cases}$$

Вычисленная по формуле (20) оценка $((\tilde{\xi}_k)_1$ и $(\tilde{\xi}_k)_2$ соответственно) позволяет вычислить дисперсию ошибки оценки по формуле (21), которая служит критерием точности. График реализации исходного процесса и его оценки представлен на рис. 1.

Поскольку целью наблюдения является максимально точное оценивание, примем за критерий качества квадратичную форму ошибки оценки $((\tilde{Q}_k)_1$ и $(\tilde{Q}_k)_2$ соответственно, $(\tilde{Q}_k)_{\text{вз}}$ – взаимная ошибка оценки). Дисперсия ошибки оценки представлена на рис. 2.

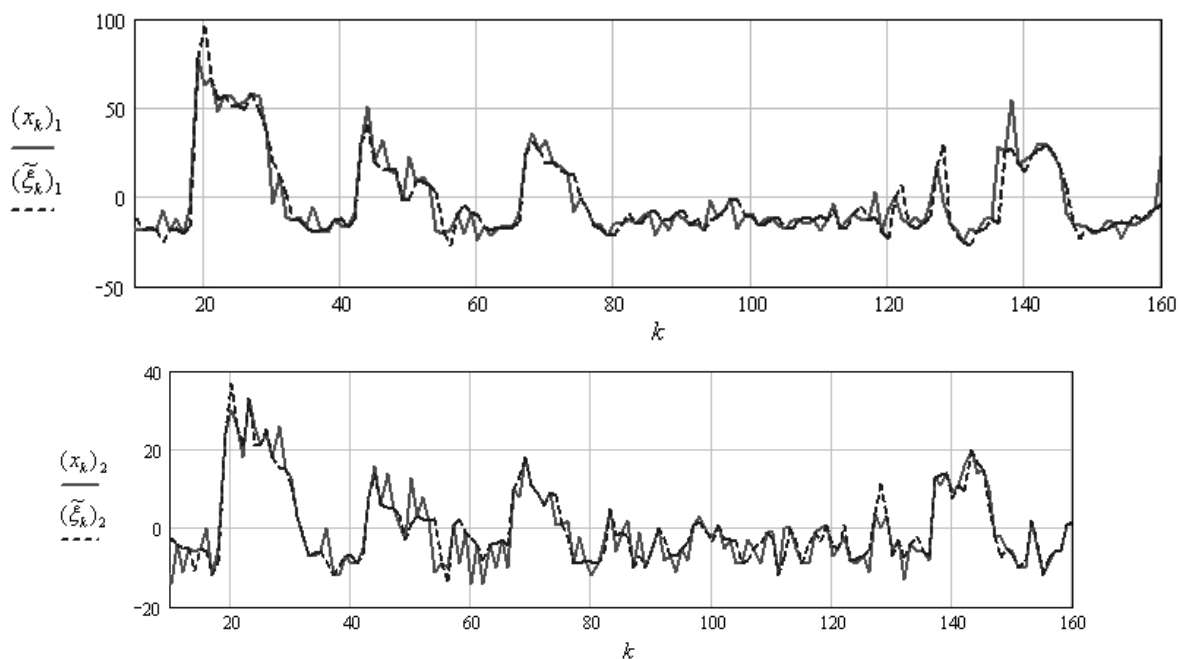


Рис. 1. Графики реализации исходного процесса x_k и его оценки $\tilde{\xi}_k$ для $T=2$

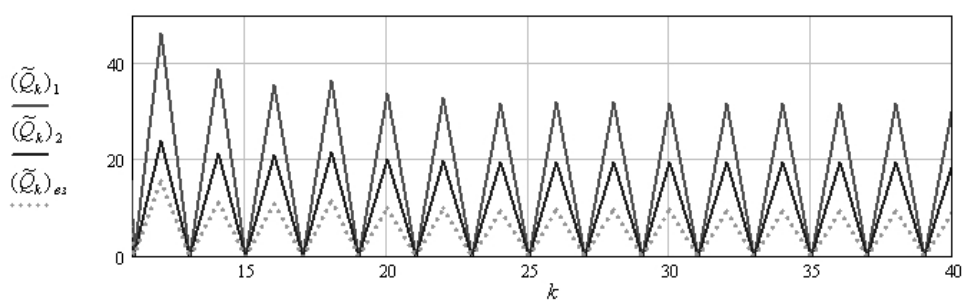


Рис. 2. График дисперсии ошибки оценки \tilde{Q}_k для $T=2$

В результате проведения серии экспериментов был получен график зависимости точности оценки от величины интервала между наблюдениями (рис. 3).

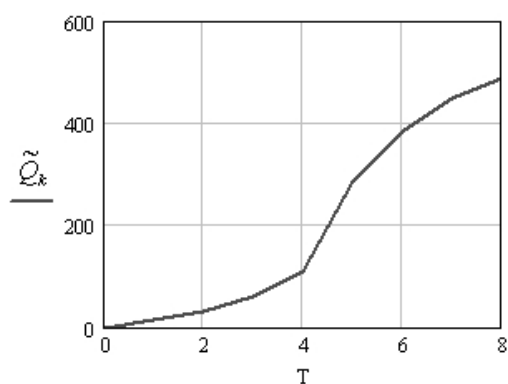


Рис. 3. Точность оценки

Задав необходимую точность оценки, можно выбрать интервал между наблюдениями. Это позволит оператору выбрать наиболее подходящую стратегию наблюдения за состоянием ИС.

Библиографический список

1. **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 315 с.
2. **Хеннан, Э.** Многомерные временные ряды / Э. Хеннан. – М.: Мир, 1974. – 576 с.
3. **Медич, Д.** Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Д. Медич. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
4. **Богуславский, И.А.** Прикладные задачи фильтрации и управления / И.А. Богуславский. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
5. **Кондратьев, В.В.** Фильтрация и анализ линейных дискретных систем управления при непараметрическом задании коррелированных шумов / В.В. Кондратьев, А.А. Кочешков // Автоматика и телемеханика. 1985. № 6. С. 67–76.

*Дата поступления
в редакцию 05.10.2012*

A.V. Vikulov, A.A. Kocheshkov

ANALYSIS AND MODELLING OF INFORMATIONAL SYSTEMS DYNAMICAL PROPERTIES

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
Institute of radio-electronics and informational technologies

Purpose: The problems of informational system state observation and control are analyzed with particular attention to the rational system resources usage. The definition of the state is given. The software based on the proposed methods was implemented.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on discrete-time control theory methods and stochastic process correlation theory. The informational system's dynamical properties discrete model based on state-space approach has been considered. The problem of model parameters evaluation is proposed.

Findings: It is possible, for example, to apply either theoretical framework or the software to improve the quality of the system maintenance

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the sector of information technologies

Key words: control, observation, information system, modeling, state-space.

УДК 004.822

Г.Б. Бронфельд

**НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
СТРУКТУРЫ ЗНАНИЙ**

ООО «НИПИ «Сириус-2», Нижний Новгород

Рассматривается популярная 4-уровневая структура модельного представления знаний. В ее состав входят данные (понятия), информация, собственно знания и мудрость. Новым является представление знаний и мудрости в виде путей на графе информации. Это открывает новые возможности аналитического изучения знаний и информации, реализации новых подходов в создании интеллектуальных систем и делает более четкими и наглядными взаимосвязи между информацией и знанием.

Ключевые слова: знание, модель знаний, информация, текст, моделирование, структура знаний, семантическая сеть, база знаний, интеграция знаний

Введение

Все большее внимание в последние десятилетия уделяется работе со знаниями.

Важным моментом в этой проблеме является анализ структуры знаний, поскольку понимание структуры знаний подводит к определенным методам, необходимым для моделирования знаний и выводам на их основе.

Проблематику знаний, в т.ч. во взаимосвязи с информацией, изучают философы, психологи, лингвисты, физики, математики, в рамках ИТ-технологий и направления «искусственный интеллект» (ИИ). Будем вести рассмотрение, в основном, с точки зрения направления ИИ (далее просто ИИ).

Нас будет интересовать научное знание, личное знание и реальная окружающая природа.

Научное знание претендует на адекватное отражение действительности и выступает от имени истины [1].

Личное знание – это совокупность знаний конкретного человека, отражающих его опыт и представления об окружающей действительности, не имеющих, как правило, теоретико-систематическую формы и помогающих ориентироваться в окружающем мире [1].

Действительность – это окружающий нас мир с совокупностью всех существующих объектов, их взаимосвязей и природных явлений [1].

Действительность – объективна и существует независимо от человека. Но человек в любом случае может описывать окружающий мир лишь с помощью языковых средств, фиксируемых, в частности, в виде текстов.

Текст представляет собой последовательность языковых единиц, объединенных смысловой связью [2]. Типичным представителем языковых единиц являются слова, являющиеся некими понятиями, отражающие определенные явления действительности.

Личное знание человек может выразить или опять-таки языковыми единицами, или действиями, которые описываются также с помощью текстов.

В результате получается, что в основе имеем понятия или данные (сведения), отражающие уровень неких параметров действительности (известных или неизвестных нам) и выражаемые в текстовом виде.

Взаимосвязь информации и знаний исследуют по многим направлениям одновременно, и поддерживающие тот или иной подход специалисты нередко разделились на группы и даже друг друга не анализируют и не цитируют.

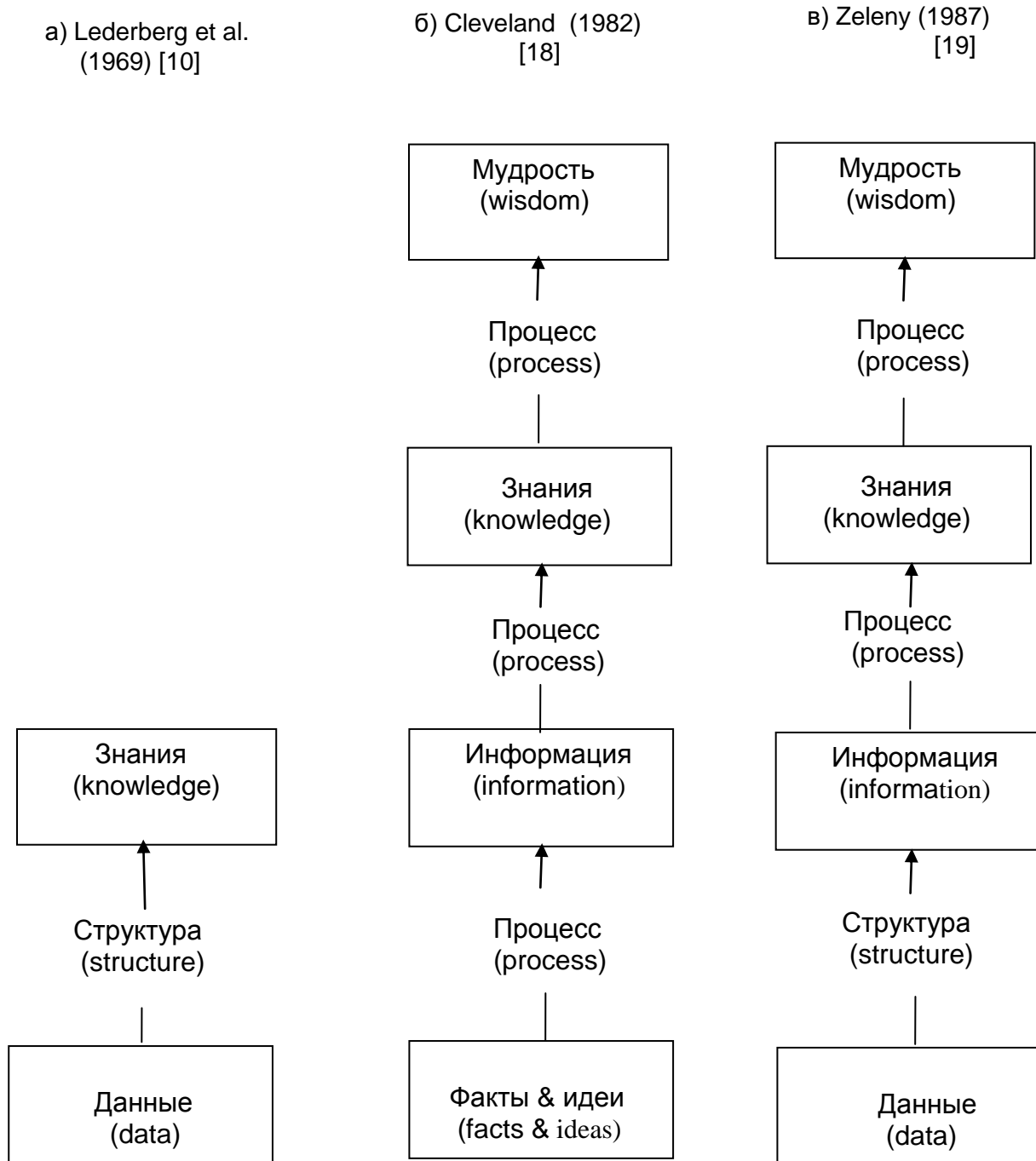


Рис. 1. 2- и 4-уровневая структура знаний

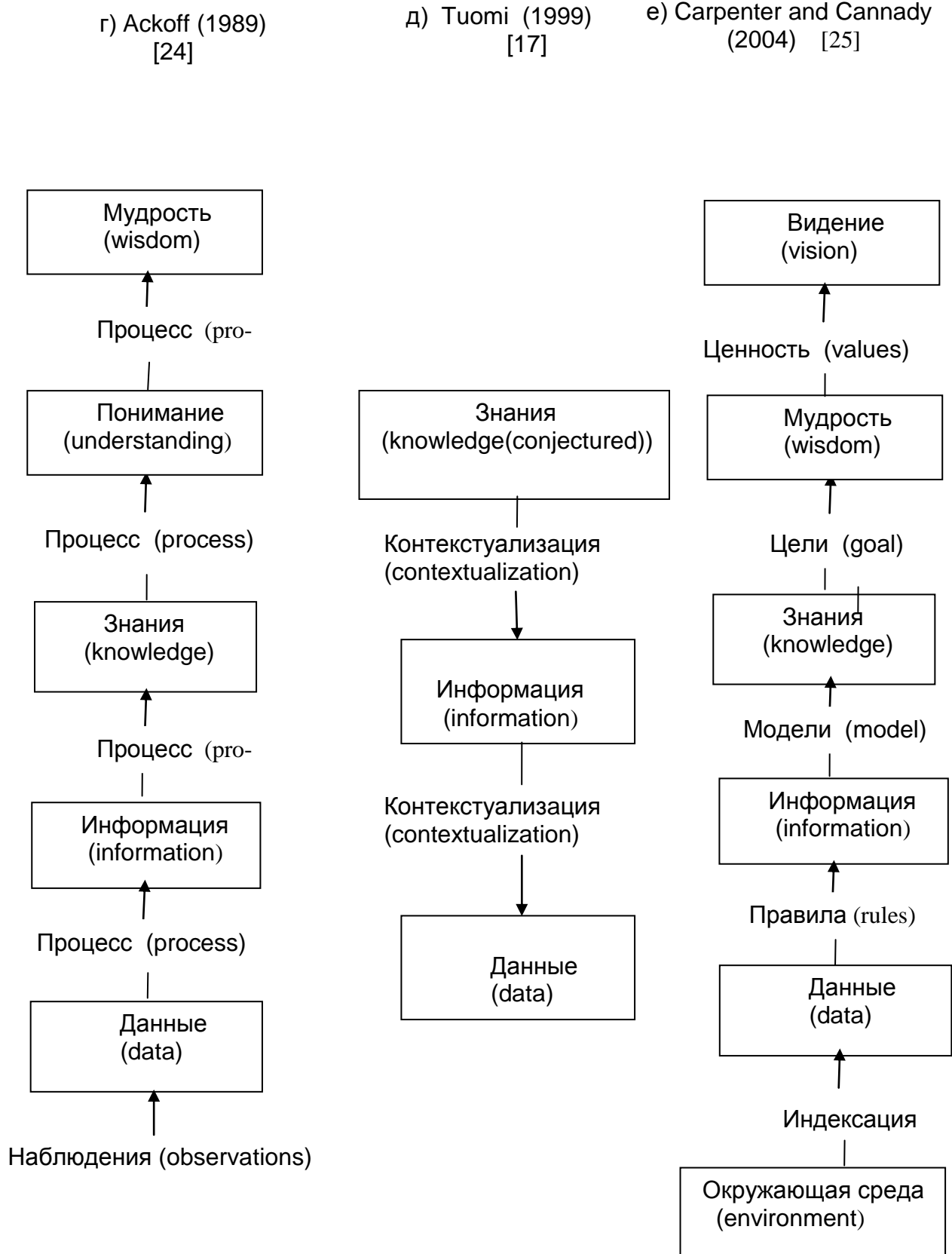


Рис. 2. 3-, 5- и 6-уровневая структура знаний

Одни придерживаются атрибутивной точки зрения [3–6], считая, «что информация предполагается неотъемлемым свойством (атрибутом) материи и поэтому она может прояв-

лять себя во всех объектах, процессах и явлениях как живой, так и неживой природы» [3]. Назовем это определение информацией 1.

Другие рассматривают информацию и знания с точки зрения ее принадлежности высокоорганизованным живым объектам [6–8], назовем информацией 2. Есть активно применяемый для отдельных направлений шенноновский подход на основе статистической оценки количества информации [8], - информация 3. Однако он сам полезен именно для живых существ. Ряд авторов периодически ведет просто полуфилософское вербальное обсуждение этой проблематики на основе интеграционного подхода без серьезного продвижения вперед [9].

Для описания знаний в ИИ давно сформировалась представление о двухуровневой структуре знаний (рис. 1, а), пока наиболее часто используемое в России [10–15]. В ее основе находятся данные (понятия), т.е. отдельные факты, характеризующие объекты, процессы и явления предметной области, а также их свойства. Тогда знания - это хорошо структурированные данные, или данные о данных, или метаданные.

Есть традиционные представления знаний, использующих эту основу, в частности продукционные модели, семантические сети и фреймы. Однако постепенно стал развиваться более широкий спектр структур представлений знаний и информации [16] (рис. 1 и рис. 2). Появилось 3-уровневое представление [17], 4-уровневое [18–23], 5-уровневое [24] и даже 6-уровневое [25]. Эти структуры представлены на рис. 1. В ряде этих структур также используется информация как составной элемент знаний, назовем информация 4. Особое место занимает юридическое определение термина «информация» [26–27], назовем его информация 5.

Для дальнейших теоретических исследований и практических работ необходимо все-таки уточнить взаимосвязи различных трактовок понятия «информация» между собой, с понятием «знание» и все-таки формально уточнить, что же такое данные, информация, знания и мудрость в новых структурных представлениях.

Четырехуровневое представление знаний

Рассмотрим более подробно четырехуровневое представление знаний. Оно и есть относительно новое, менее знакомое, и, на взгляд автора, более интересное представление о системологии знаний во взаимосвязи с информацией, вполне приемлемое для описания научного знания, личного знания и действительности. Затем с позиции новых результатов проанализируем упомянутые структуры снова.

Авторы М.Желена [19], Х.Кливленд [18] и близкий к ним по взглядам Р. Акофф [24]) считают, что знания состоят (рис. 1, в):

- из данных (понятий);
- информации;
- собственно знаний (в узком смысле);
- мудрости.

Данные (понятия) – самые простые элементы знания, их цель неясна и неоднозначна, им свойственна большая степень свободы.

Информации свойственна более высокая конкретность цели, включающей объединение сведений или данных. Как только данные преобразованы в информацию, вернуть их в исходное состояние трудно (так же, как невозможно реконструировать отдельные наблюдения из их средней величины).

Собственно знания охватывают реальный процесс обработки входных данных, включая координацию действия для достижения результатов, целей или получения продуктов.

Тогда мудрость соотносится с объяснимостью: если человек знает почему – а не просто, что и как – тогда он не просто хорошо информирован или осведомлен, а обладает знанием и компетентностью.

Такое представление точно описывает взгляд, в частности, М. Желены [19–21], на знание в следующем виде: «знание – это целенаправленное координированное действие». Его

единственное доказательство или способ демонстрации заключается в достижении цели. Качество знания может быть оценено по качеству достижения (его продукта) или качеству координирования (его процесса), особенно если вмешиваются неконтролируемые факторы.

Хорошо известно уже упомянутое ранее представление моделей знаний в виде двухуровневой структуры (рис. 1, а) с помощью семантических сетей, которые можно описать в виде ориентированного графа $G(V, E)$, где V – множество вершин; E – множество ребер (отношений) между ними. Вершинам соответствуют определенные дефиниции данных (понятий) в виде множества X , дефиниции видов отношений (связей) в виде множества T , связанные отображениями $D: X \rightarrow V$ и $F: T \rightarrow E$.

Формальное представление четырехуровневой структуры знаний

Разовьем это формализованное представление двухуровневой структуры знаний (рис. 1, а) до четырехуровневой структуры (рис. 1, в).

Таким образом:

- данные(понятия) – это будут соответствовать вершины V' графа $G(V', E')$ (рис. 3);
- информация – это граф $G(V', E')$, как минимум, с одной ребром (рис. 4);
- знания – это путь в графе, ведущий к некоему результату (вершине) (рис. 5);
- мудрость – это разъяснение (интерпретация), почему выбран именно данный путь из бесконечного множества (рис. 6).

Рассмотрим подробнее.

К данным (понятия), в частности, относятся вершины $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_k \in V$

(рис. 3), которые задаются непосредственно. Кратко рассмотрим это на примере авторского изобретения комбинированного устройства «письменный стол» (ПЭВМ) [28], который в настоящее время массово производится в мире под названием *powerdesk*. С виду столем («*powerdesk*») почти стандартный письменный стол с тумбочкой со свободной поверхностью стола. В конструктивы письменного стола встроены составляющие ПЭВМ. Это создает большие удобства для работы человека и позволяет со временем быстро проводить модернизацию (замену отдельных элементов ПЭВМ) не меняя удобное устройство для пользователя в целом. К числу данных (понятий) для данного случая, могут относиться, - например, процессор, клавиатура, дисплей, древесно-стружечная плита, роликовые опоры и т.д. Однако при решении конкретной задачи может потребоваться неограниченное дополнительное множество данных (понятий) V_δ , причем $V \cup V_\delta = V'$ т.е. существует множества исходное фиксированное X и дополнительное X_δ , соответственно, и связи фиксированные исходно T и дополнительное T_δ , и $D_\delta: X_\delta \rightarrow V_\delta$. Соответственно $D \cup D_\delta = D'$:

Как научное, так и личное знание состоит из дополнительных данных и понятий X_δ (с их связями T_δ), имеющих отношение к действительности, и необходимых для решения возникающих проблем.

Информация (рис. 4) включает в себя ребра $v_1v_4, v_2v_4, \dots, v_3v_k \in E$, по примеру, это элементы чертежа стола, описание устройств ЭВМ и т.д. Но ведь все реально шире. Например, размер конструкции определялся эргономическими параметрами человека, и, в частности, возможностями, поднять столем и перевозить. Значит появляется информация, о человеке, автомобилях, способах перевозки, методах упаковки, правилах внешнеэкономической деятельности и торговли (приходилось и в другие страны продавать) и т.д. Т.е. рядом с базовым набором данных V неявно появляется дополнительный набор данных (понятий) V' , которые как-то связаны с исходными данными (понятиями),

$$v_1v_{k+1}, v_{k+1}v_{k+2}, v_2v_{k+2}, v_{k+2}v_{k+4}, v_{k+2}v_k, v_{k+4}v_3, v_{k+2}v_k, v_kv_{k+3}, v_3v_{k+5}, v_{k+5}v_n \in E_\delta.$$

Эти связи могут относиться, как к эксплицитным, так и имплицитным знаниям (касающимся личного знания) человека [14, 20].

Тогда $E \cup E_0 = E'$, что соответствует $F_0 : T_0 \rightarrow E_0$ и $T \cup T_0 = T'$.

Собственно знания (рис. 5) в данном примере являются технологическими картами по изготовлению составных элементов стола, их сборке, отладке и проверке работоспособности и качества. Это когда решение известно, но если решение неизвестно? В столе как в новое изобретение были заложены некие новые понятия, связи и решения, которые были неизвестны до того (но также формировались на основе известного до этого периода – это человеческая особенность). Кроме того, если решение (знание) предварительно неизвестно в процессе разработки проблемы, могут уточняться и сама проблема и способы ее решения [29,30], причем этот процесс итеративный.

На рис. 5 представлено это набор конкретных путей от одного множества начальных вершин $V^0 \subset V'$ к множеству конечных вершин $V^R \subset V'$, в частности, путь

$$s_i = v_1 v_4 v_2 v_{k+2} v_{k+4} v_3 v_k \in S,$$

где $v_1 \in V^0$, а $v_k \in V^R$

Мудрость (рис. 6) в данном примере заключается в объяснении, зачем нужен стол, в объяснении его достоинств в эксплуатации по сравнению с другими аналогичными видами компьютерной мебели. Мудрость – это множество интерпретаций M_{si} , поясняющих полезность i -го пути s_i , в частности,

$$m_{si} = v_{k+1} v_{k+2} v_k v_3 v_{k+5} \in M_{si}.$$

Следует отметить, в объяснении m_{si} могут использоваться данные (понятия), в большинстве не участвующие в исходном описании со множеством V , но входящие во множество V_0

Тут надо сделать замечание, что граф $G(V', E')$ может в общем виде иметь вид гиперграфа с гораздо более сложными видами связей, а сами пути s_i и m_{si} могут иметь характер маршрутов с наличием замкнутых циклов с повторением вершин и ребер. В статье рассматривается более простой вариант. Более сложное представление сути обсуждаемого вопроса не меняет.

Полное формальное описание четырехуровневой структуры знаний имеет вид семерки

$$ZN = \langle X'^0, X'^R, D', F', G(V', E'), S, M_{sk} \rangle, \quad (1)$$

где X'^0 – подмножество начальных данных (понятий);

$X'^0 \subseteq X^0 \subset X \subseteq X'$, относительно которых существуют знания;

X'^R – подмножество конечных данных (понятий) $X'^R \subseteq X^R \subset X \subseteq X'$, относительно которых существуют знания;

D' – определение исходных данных (понятий);

F' – определение связей

$G(V', E')$ – информация;

S – множество путей на графе, которые обеспечивают полезный переход из начального подмножества X'^0 в конечное подмножество X'^R ;

M_{sk} – множество интерпретаций, поясняющих полезность k -го пути s_k .

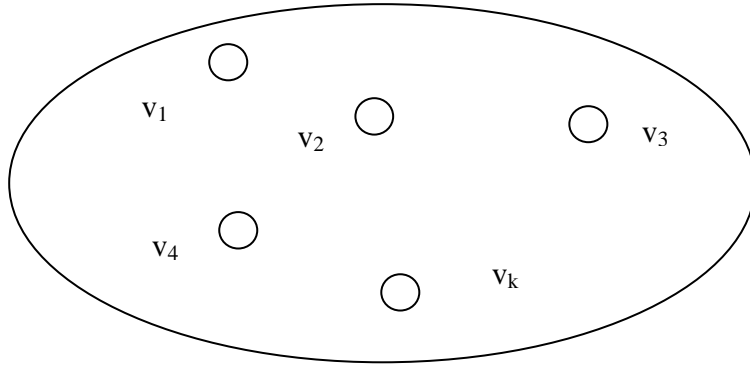


Рис. 3. Данные

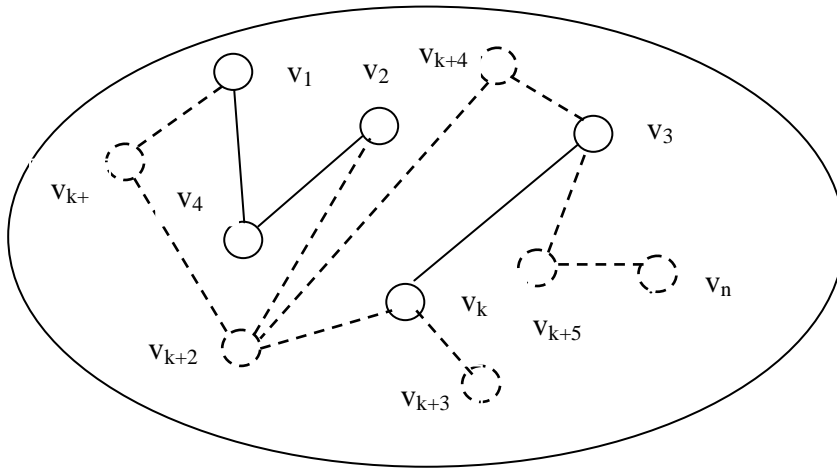


Рис. 4. Информация

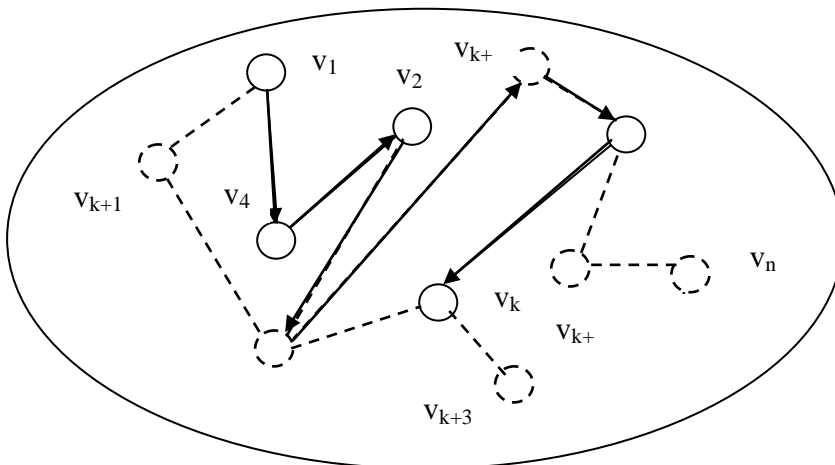


Рис. 5. Знания

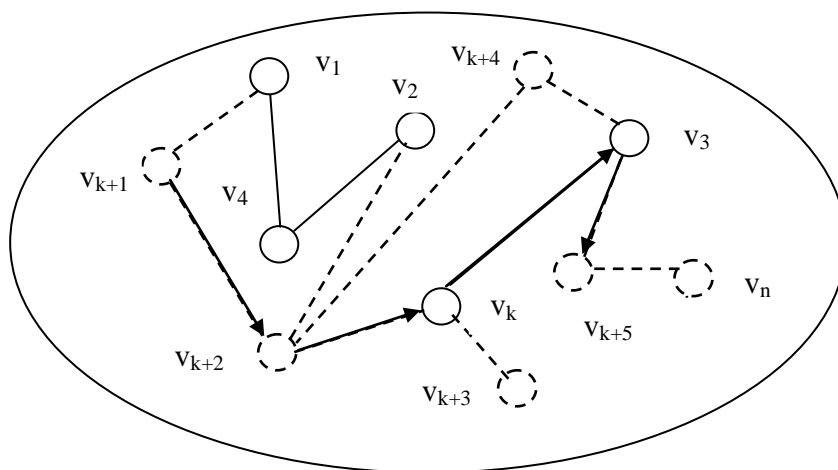


Рис. 6. Мудрость

Информация $G(V', E')$ в (1) у нас соответствует упоминаемому понятию «информация 4». Обратим, внимание, что при определенных условиях выполняется отображение

$$ZN \rightarrow G(V', E'),$$

причем заведомо $G(V, E) \subseteq G(V', E')$. Но тогда $G(V', E')$ можно считать понятием «информация 5», т.е., по сути, знания входят в «информацию 5». Но тогда получается «информация 4» и «информация 5» – одно и то же понятие. Но с определенной разницей, что термин «информация 4» можно трактовать только как граф $G(V', E')$, из которого мы еще не знаем, что является знанием, что мудростью. Понятие «информация 5» включает в себя совокупность: отдельно и описание данных, и $G(V', E')$ и описание всего множества путей S , определяющих собственно знание, и множество путей M_{sk} , определяющих мудрость.

Новая технология [31, 32] по прямому наложению знаний позволяет, в принципе, постепенно создавать реально базы знаний для интеллектуальных систем в рамках ИИ, которые будут уже действительно обладать свойствами графа $G(V', E')$ и включать уже объединенные специальным образом: и просто информацию уровня «информация 4», и знания S , и мудрость M_{sk} .

Это означает: несмотря на то, что исходно информация входит как структурная составляющая знания, в свою очередь, знание можно рассматривать как составляющий элемент информации. Такая трактовка удовлетворяет и понятию «информация 2», но лишь частично связана с понятием «информация 1». А термин «информация 3», связанный со статистической оценкой количества информации, является вспомогательным понятием и имеет возможности совмещения с понятиями «информация 3», «информация 4», «информация 5». Т.е. остаются два разных ключевых подхода, связанных с разными интерпретациями: «информация 1» и «информация 5».

Безусловно, 4-уровневая структура (рис. 1, б, в) имеет больше конструктивных возможностей для развития, чем 2-уровневая, ничего, по сути, не запутывая, а наоборот разъясняя. 5-уровневая структура Акоффа (рис. 2, з) практически ничем не отличается от 4-уровневой и сводится к ней. Взгляд на проблему [17] с 3-уровневой структурой (рис. 3, д) имеет место как методологический взгляд на проблему, который не противоречит 4-уровневой структуре знаний. 6-уровневое представление знаний (рис. 2, е) тоже можно счи-

тать просто методологическим представлением, по сути, ничем не отличающимся от 4-уровневой структуры (рис .1, б, в).

Выводы

Подобная формальная трактовка знаний и мудрости в 4-уровневой структуре знаний пригодна, как для формального описания научного знания, отражающего окружающую действительность, так и для описания личного знания и знаний, содержащихся в текстах на естественном языке. Появляются новые возможности для аналитического углубления в особенности знаний и информации, невозможные до сих пор. Рассмотренная трактовка структуры удобна для разработки новых подходов к созданию интеллектуальных систем в рамках ИИ.

Библиографический список

1. **Кохановский, В.П.** Основы философии науки / В.П. Кохановский [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 608 с.
2. Лингвистический энциклопедический словарь / под В.Н. Ярцева. – М.: Сов. энциклопедия, 1990. – 685 с.
3. **Колин, К.К.** Сущность информации и философские основы информатики // Информационные технологии. 2005. №5. С. 63-70.
4. **Кадомцев, Б.Б.** Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев. – М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1999. – 400 с.
5. **Гуревич, И.М.** Оценка информационных характеристик Вселенной // Информационные технологии. 2008. №12. Приложение. С. 1–32.
6. **Фридланд, А.Я.** О сущности информации: два подхода // Информационные технологии, 2005. №5. С. 75-85.
7. **Винер, Н.** Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М.: Советское радио, 1968. – 328 с.
8. **Шеннон, К.** Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: Иностранная литература, 1963. – 830 с.
9. **Bates, M.J.** Information and knowledge: an evolutionary framework for information science// Information Research, Vol. 10 No. 4, July 2005, paper 239.
10. Lederberg J., Sutherland G.L., Buchanan B.C., Feigenbaum E.A., Robertson A.V., Duffield A.M. and Djerassi C. Applications of artificial intelligence for chemical inference. 1. The number of possible organic compounds. Acyclic structures containing C,H, O and N//Journal of American Chemical Society, May 1969.
11. Fifth generation computer systems: proceedings of the international Conference on Fifth Generation Computer Systems. - Tokyo, Japan, October 19-22, 1981. – 287 p.
12. **Попов, Э.В.** Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ / Э.В. Попов. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
13. **Кандрашина, Е.Ю.** Представление знаний времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е.Ю. Кандрашина, Л.В. Литвинцева, Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
14. **Гаврилова, Т.А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
15. **Вагин, В.Н.** Знание в интеллектуальных системах // Новости искусственного интеллекта, 2002. №6(54). С. 8-18.
16. Carpenter S. A. A Primer:Enterprise Wisdom Management and the Flow of Understanding, 2008 <http://www.cognitivecybernetics.com/PrimerFoU.html>
17. Tuomi, I. Data is More than Knowledge: Implications of the Reversed Knowledge Hierarchy for Knowledge Management and Organizational Memory. Journal of Management Information Systems, 16(3) (Winter 1999-2000), 103-107
18. Cleveland H. Information as a Resource// The Futurist, December 1982 p. 34–39.
19. Zeleny M. Management Support Systems: Towards Integrated Knowledge Management// Human Systems Management 7 (1), 1987, p. 59–70.

20. Информационные технологии в бизнесе / под ред. М. Желены. – СПб: Питер, 2002. – 1120 с.
21. Zeleny Milan Human Systems Management: Integrating Knowledge// Management and Systems. World Scientific, 2005, p. 15–16.
22. Bellinger, G. Knowledge Management—Emerging Perspectives. Circa 1997. Last retrieved February 6, 2005: <http://www.systems-thinking.org/kmgmt/kmgmt.htm>
23. **Бронфельд, Г.Б.** Об одном подходе к построению интеллектуальных электронных книг и о молинге // Интеллектуальные системы: труды Восьмого международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2008. С. 230-234.
24. Ackoff R. From Data to Wisdom//Journal of Applied Systems Analysis,1989, №16, p.3–9.
25. Carpenter, S. A. and Cannady, J. Tool for Sharing and Assessing Models of Fusion-Based Space Transportation Systems. Proceedings of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, (July 11-14, 2004), Fort Lauderdale, Florida.
26. Информационные ресурсы для принятия решений / А.П. Вереvченко [и др.]. – М.: Академический проект, 2002. – 560 с.
27. Об информации, информационных технологиях и о защите информации. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ <http://base.garant.ru/12148555/>
28. **Бронфельд, Г.Б.** Комбинированное устройство: письменный стол-ПЭВМ / Г.Б. Бронфельд, А.И. Соболев // Микропроцессорные средства и системы. 1988. № 4. С. 95–96.
29. **Альтшуллер, Г.С.** Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г.С. Альтшуллер. – Новосибирск: Наука, 1986. – 209 с.
30. **Орлов, М.А.** Основы классической ТРИЗ. Практическое руководство для изобретательского мышления / М.А. Орлов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 416 с.
31. Бронфельд Г.Б. Прямое наложение знаний и некоторые его особенности // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-10): труды российской конференции. – М.: ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН, 2010. С. 201–211.
32. Пат. на изобретение, № 2440610 Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой / Бронфельд Г.Б.; заяв. 21.06.2010; опубл. 20.01.12, Бюл. № 2.

*Дата поступления
в редакцию 05.10.2012*

G. Bronfeld

OPPORTUNITIES OF FORMAL REPRESENTATION FOR KNOWLEDGE STRUCTURE

Purpose: Exploration of correlation of knowledge and information on the basis of new structural and formal representations.

Design/methodology/approach: The paper investigates a popular 4-layer structure of knowledge representation. Its structure contains data (concepts), information, actual knowledge and wisdom. Other structural knowledge representations -- 2-layer, 3-layer, 5-layer, and 6-layer are also considered.

Findings: The paper contains new representation of knowledge and wisdom as ways on the information's graph. It is considered by example of a concrete subject situation. A formal detailed model uses mathematical description and its graphic representation.

Conclusion: This represents new opportunities for analytical study of knowledge and information and realizations of new approaches in creation of intellectual systems. As a result there is more precise and evident correlation between information and knowledge and their false treatments are found out.

УДК 681.518.5

А.С. Базин

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан автоматизированный алгоритм тестирования программных комплексов, позволяющий повысить эффективность тестирования за счет использования принципа декомпозиции.

Ключевые слова: программный комплекс, тестирование, декомпозиция, алгоритм, граф.

Введение

Повышение надежности функционирования и эффективности тестирования программных комплексов, сложность которых непрерывно возрастает, является актуальной задачей, решение которой начинается уже на этапе их проектирования.

Известные методы тестирования, методы обеспечения качества программных комплексов носят, как правило, частный характер, т.е. разрабатываются заново для каждого комплекса. Не решена в общем виде задача повышения надежности и контролепригодности программных комплексов.

При тестировании программных комплексов методами тестирования технических средств возникают принципиальные трудности, связанные с основными особенностями программного комплекса: более сложными интерфейсами и трудностями формализации описаний.

В первую очередь сложность комплекса определяется сложностью решаемой проблемы и зависит от сложности отдельных компонент комплекса и связей между ними. Для повышения надежности и контролепригодности программного комплекса стремятся снизить зависимость между компонентами комплекса, т.е. стремятся разбить комплекс на такие модули, между которыми должно остаться по возможности меньшее количество связей [1].

Использование иерархических структур позволяет стратифицировать связи между компонентами комплекса.

В качестве модели программного комплекса предлагается использовать управляющий граф, вершинами которого являются процедуры, которые реализуют функции комплекса. Данный граф разбивается на подграфы. Подмножества вершин, входящих в образованные подграфы, соответствуют программным модулям комплекса. Далее программные модули тестируются отдельно и параллельно на основании использования их внутренних структур. Такой подход позволяет проводить тестирование программного комплекса за меньший промежуток времени, и при этом тестовое покрытие комплекса увеличивается.

В основе алгоритма разбиения комплекса на модули лежит количественная характеристика программных процедур комплекса: «популярность» (активность) процедур в комплексе, т.е. частота вызова той или иной процедуры другими процедурами комплекса.

Процедуры, выполняющие подзадачи, характерные для определенной функциональности в комплексе, могут быть вызваны только строго определенной процедурой, в этом случае вызываемая и вызывающая процедуры должны быть выделены в один и тот же модуль комплекса. В отличие от этого, процедуры, использующиеся для хранения или доступа к значениям в структурах данных, таких как списки или хэш-таблицы, вероятно, будут вызваны несколькими различными процедурами и такие «сервисные» процедуры должны быть выделены в отдельные модули.

В работе предлагается следующий подход к решению проблемы тестирования программного комплекса:

- осуществляем статический анализ исходного кода комплекса для выявления его структуры;

- разбиваем комплекс на модули согласно алгоритму, описанному ранее;
- тестируем выделенные модули с применением автоматизированной технологии генерации тестов;
- тестируем связи между выделенными модулями с применением автоматизированной технологии генерации тестов;
- анализируем результаты тестирования.

С помощью автоматизированной технологии генерации тестов можно обнаружить стандартные ошибки, такие как неожиданное завершение программы (crash), утверждения о нарушениях логики работы программы (assertion violation) и незавершение программы. Во время тестирования осуществляется направленный поиск (разновидность динамического формирования тестов) [2-3]. Начиная со случайного входного вектора, во время исполнения текущего теста вычисляется очередной вектор для следующего исполнения. Этот вектор содержит значения, которые являются решением символических связей, данное значение состоит из предикатов операторов ветвления (операторов перехода), накопленных в течение предыдущего исполнения. Новый входной вектор указывает программе новый путь выполнения. Повторяя этот процесс, направленный поиск стремится охватить все возможные пути исполнения программы.

Для автоматизированной генерации тестов предлагается использовать утилиту CUTE [4]. Данная утилита реализует символьное выполнение программ.

Рассмотрим предлагаемый подход на примере.

Построение управляющего графа программного комплекса

1. Построение управляющего графа для конкретного программного комплекса проводится по простым правилам с требуемой степенью детальности (и, как правило, автоматически).

В работе предлагается использовать управляющий граф программного комплекса, детализированный до пользовательских процедур. При таком подходе в вершинах управляющего графа будут располагаться пользовательские процедуры, операторы и стандартные процедуры языка программирования не будут образовывать вершины в графе.

Для примера рассмотрим программу, содержащую следующие пользовательские процедуры:

- 1) *main*
- 2) *chooseBehaviour*
- 3) *waitForMessage*
- 4) *sendTraffic*
- 5) *handleReceivedMessage*
- 6) *handleMgmtMessage*
- 7) *handleDataMessage*
- 8) *handleRoutingInfoMessage*
- 9) *handleSystemReq*
- 10) *sendAck*
- 11) *send2Network*
- 12) *sendData*
- 13) *sendMgmtMessage*

Передача управления в данной программе между процедурами происходит следующим образом:

- 1) *"main" -> "chooseBehaviour"*;
- 2) *"chooseBehaviour" -> "waitForMessage"*;
- 3) *"chooseBehaviour" -> "sendTraffic"*;
- 4) *"waitForMessage" -> "handleReceivedMessage"*;
- 5) *"handleReceivedMessage" -> "handleMgmtMessage"*;
- 6) *"handleReceivedMessage" -> "handleDataMessage"*;

- 7) `"handleMgmtMessage" -> "handleRoutingInfoMessage";`
- 8) `"handleMgmtMessage" -> "handleSystemReq";`
- 9) `"handleDataMessage" -> "sendAck";`
- 10) `"handleRoutingInfoMessage" -> "sendAck";`
- 11) `"handleSystemReq" -> "chooseBehaviour";`
- 12) `"sendAck" -> "send2Network";`
- 13) `"sendTraffic" -> "sendData";`
- 14) `"sendTraffic" -> "sendMgmtMessage";`
- 15) `"sendData" -> "send2Network";`
- 16) `"sendMgmtMessage" -> "send2Network";`
- 17) `"send2Network" -> "chooseBehaviour";`

Управляющий граф для данной программы с учетом предложенного подхода выглядит следующим образом (рис. 1).

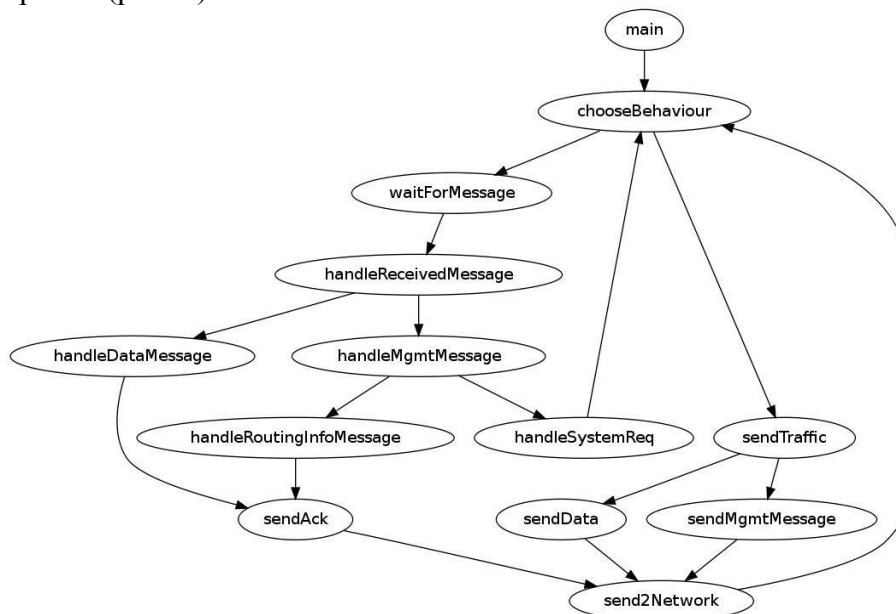


Рис. 1. Управляющий граф программы

Построение управляющего графа для конкретного программного комплекса может быть выполнено автоматически. Автор исследовал программные комплексы, реализованные на языке программирования C, опишем, как происходит автоматическое моделирование объекта для данного языка программирования.

Для выполнения данной задачи необходимо установить компиляторы GCC и Perl и выполнить следующие действия:

- 1) компилировать исходный код программного комплекса компилятором GCC с опцией `"-dr"`, результатом данной операции будут дамп-файлы с расширением RTL (Register Transfer Language);

- 2) запустить скрипт, написанный на языке программирования Perl, который извлекает всю информацию о вызовах процедур из файлов RTL.

Рассмотрим работу предложенного алгоритма на следующем примере:

- 1) программа состоит из трех файлов: `main.c`, `client.c`, `server.c`.

Компилировать исходный код программы компилятором GCC с опцией `"-dr"`:

```
# gcc -dr main.c client.c server.c
```

В результате данной операции создаются следующие файлы:

```
main.c.01.rtl, client.c.01.rtl, server.c.01.rtl;
```

- 2) запускаем Perl скрипт:

```
# rtl2callgraph main.c.01.rtl client.c.01.rtl server.c.01.rtl
```

Результатом этой операции будет диаграмма вызовов процедур в программе:

```
digraph callgraph {
  "main" -> "chooseBehaviour" [style=solid];
  "chooseBehaviour" -> "waitForMessage" [style=solid];
  "chooseBehaviour" -> "sendTraffic" [style=solid];
  "waitForMessage" -> "handleReceivedMessage" [style=solid];
  "handleReceivedMessage" -> "handleMgmtMessage" [style=solid];
  "handleReceivedMessage" -> "handleDataMessage" [style=solid];
  "handleMgmtMessage" -> "handleRoutingInfoMessage" [style=solid];
  "handleMgmtMessage" -> "handleSystemReq" [style=solid];
  "handleDataMessage" -> "sendAck" [style=solid];
  "handleRoutingInfoMessage" -> "sendAck" [style=solid];
  "handleSystemReq" -> "chooseBehaviour" [style=solid];
  "sendAck" -> "send2Network" [style=solid];
  "sendTraffic" -> "sendData" [style=solid];
  "sendTraffic" -> "sendMgmtMessage" [style=solid];
  "sendData" -> "send2Network" [style=solid];
  "sendMgmtMessage" -> "send2Network" [style=solid];
  "send2Network" -> "chooseBehaviour" [style=solid];
}
```

Полученную информацию о структуре программы можно использовать для построения управляющего графа.

Алгоритм разбиения комплекса на модули

Предлагаемый алгоритм генерирует распределение модулей комплекса, в которых процедуры f и g с большей вероятностью будут отнесены к одному и тому же модулю, если f вызывает g и процедура g не очень популярна.

Алгоритм можно описать следующим образом:

1. Строим граф «популярности» процедур комплекса, взвешенный направленный граф $G = (V, E)$ с множеством вершин $V = S$, где S – множество процедур комплекса и направленные ребра множества E обозначают вызовы между процедурами в комплексе. Вес каждого ребра равен «популярности» вызываемой процедуры (т.е. «популярности» процедуры, соответствующей вершине назначения ребра).

2. Выбираем значение c , равное средней «популярности» процедур в комплексе. На первой итерации алгоритма значение c определяется пользователем на основе эмпирических соображений (результаты вычислительных экспериментов показывают, что при $c=3$ на первой итерации алгоритма получаем оптимальное разбиение комплекса на модули), а при следующих итерациях значение c выбирается равным максимальному весу ребра в графе G .

3. Временно удаляем вершины в графе «популярности» процедур, для которых «популярность» соответствующей процедуры выше выбранной средней «популярности» процедур c , образуя граф G' .

4. В полученном графе G' находим вершины, для которых полустепень захода равна нулю.

5. Вычисляем множество достижимых вершин в G' из найденных вершин с нулевой полустепенью захода, если достижима хотя бы одна вершина, полученный набор вершин определяется как единое целое, модуль. Вершины, которые выделяются в модули, удаляются из графа G и из подграфа G' . Если не достижима ни одна вершина из найденной вершины, найденная вершина удаляется из графа G' .

Шаги со 2-го по 5-й повторяются до тех пор, пока все процедуры не будут выделены в модули. В результате мы получаем множество модулей U .

Рассмотрим работу данного алгоритма на примере.

Выделим модули в программе, управляющий граф которой изображен на рис. 1.

1. Построим граф популярности процедур. Затем выбираем значение средней «популярности» процедур $c = 2$ и временно удаляем вершины в графе, для которых «популярность» соответствующей процедуры выше выбранной средней «популярности» процедур $c=2$. Удаляем вершины *chooseBehaviour* и *send2Network*, так как «популярность» соответствующих процедур равна трем. Получаем граф G' (рис. 2).

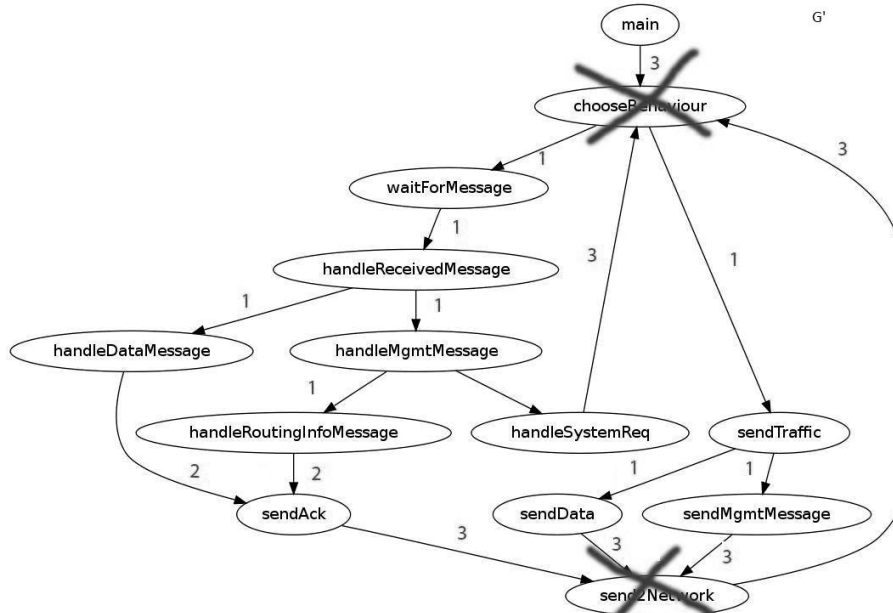


Рис. 2. Алгоритм разбиения комплекса на модули

2. В полученном графе G' находим вершины, для которых полустепень захода равна нулю, такими вершинами являются *main*, *waitForMessage* и *sendTraffic*. Вычисляем множество достижимых вершин в G' из найденных вершин. Из вершины *main* не достижима ни одна вершина графа G' , удаляем эту вершину из графа G' . Из вершины *waitForMessage* достижимы вершины: *handleReceivedMessage*, *handleMgmtMessage*, *handleDataMessage*, *handleRoutingInfoMessage*, *handleSystemReq*, *sendAck* – в таком случае объединяем эти вершины в модуль и удаляем их из графов G и G' . Из вершины *sendTraffic* достижимы вершины *sendMgmtMessage* и *sendData* – объединяем эти вершины в новый модуль и удаляем их из графов G и G' . Граф G' оказался пустым (рис. 3).

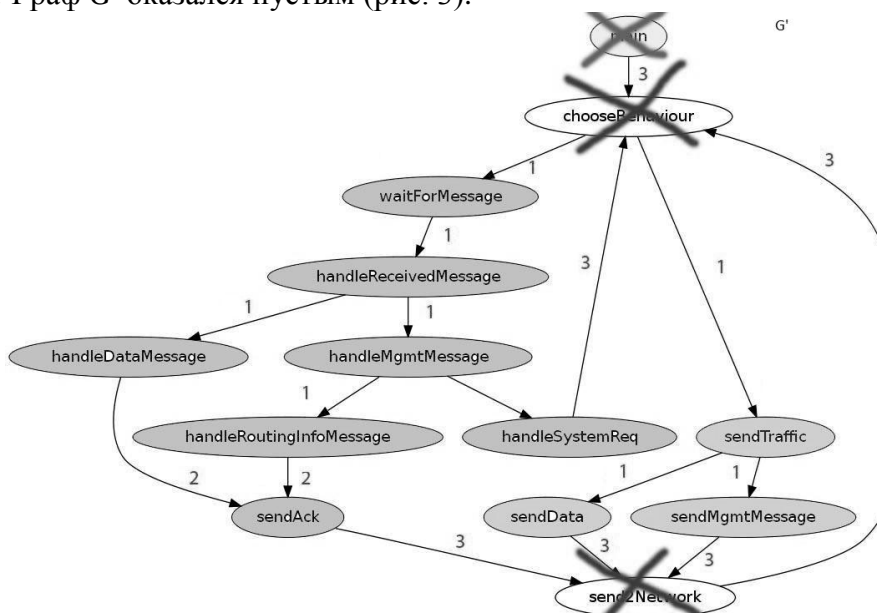


Рис. 3. Алгоритм разбиения комплекса на модули

3. В результате предыдущих шагов в графе G осталось всего три вершины: $main$, $chooseBehaviour$, $send2Network$. В этом графе находим вершины, для которых полустепень захода равна нулю, такими вершинами являются $main$ и $send2Network$. Вычисляем множество достижимых вершин в графе G из найденных вершин. Из вершины $main$ достижима вершина $chooseBehaviour$, объединяем эти вершины в модуль и удаляем из графа G . Осталась единственная нерассмотренная вершина $send2Network$, из нее не достижима ни одна вершина графа G , но, тем не менее, мы выделяем ее в отдельный модуль (рис. 4).

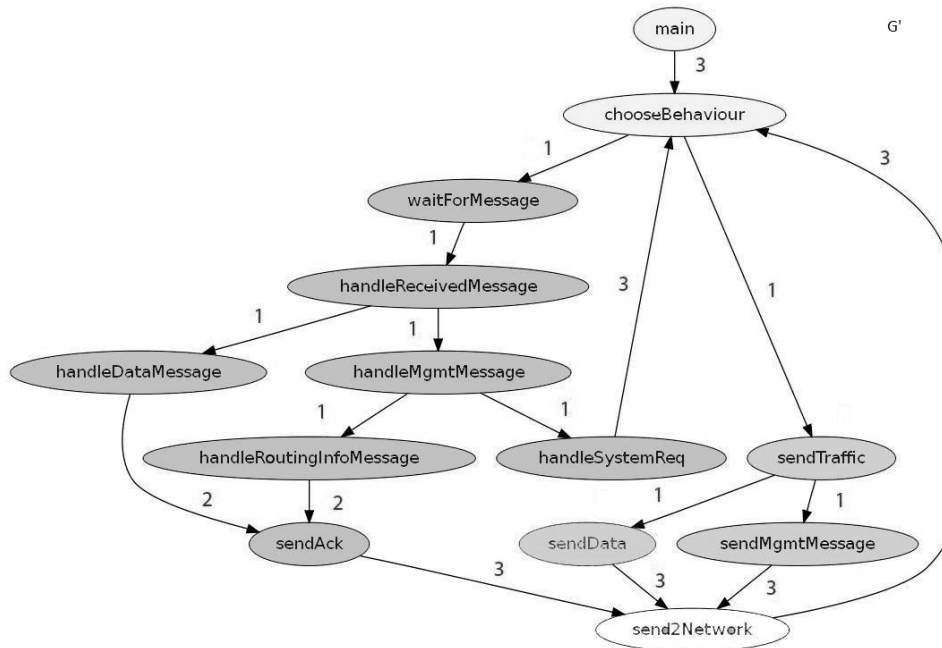


Рис. 4. Алгоритм разбиения комплекса на модули

Таким образом, программа была разбита на четыре модуля, содержащие следующие функции:

- 1) *waitForMessage*, *handleReceivedMessage*, *handleMgmtMessage*, *handleDataMessage*, *handleRoutingInfoMessage*, *handleSystemReq*, *sendAck*;
- 2) *sendTraffic*, *sendData*, *sendMgmtMessage*;
- 3) *main*, *chooseBehaviour*;
- 4) *send2Network*.

Алгоритм выделил клиентскую и серверную функции программы абсолютно верно (первый и второй модули).

Автоматизированная технология генерации тестов

Для автоматизированной генерации тестов в данной работе используется утилита CUTE (Concolic Unit Testing Engine for C and Java). Утилита CUTE является инструментом для систематического и автоматического тестирования программ, написанных на языках программирования C и Java. Данная утилита реализует символьное выполнение программ. Также CUTE позволяет обозревать все возможные пути исполнения программы и вести статистику тестового покрытия кода.

Команда запуска CUTE выглядит следующим образом:

#cute название_программы процедура_входа;

название_программы – название тестируемой программы;

процедура_входа – название входной процедуры, с которой начнется процесс тестирования.

Остановимся подробнее на методе написания тестовых драйверов программы.

Допустим, что мы хотим протестировать процедуру *testme* в небольшой программе (*cell.c*), написанной далее:

```
#include <stdio.h>:
#include <assert.h>

typedef struct cell {
    int v;
    struct cell *next;
} cell;

int g(int v) {
    return 2*v + 1;
}

int testme(cell *p, int x) {
    if (x > 0)
        if (p != NULL)
            if (g(x) == p->v)
                if (p->next == p)
                    assert(0);
    return 0;
}
```

Тест-драйвер объявляет две переменные: *p* и *x*. Затем указывается, что данные переменные будут братья из тестового окружения (*CUTE_input*) и процедура *testme* выполняется с переменными *p* и *x*.

```
f(){
    cell *p;
    int x;
    CUTE_input(p);
    CUTE_input(x);
    testme(p,x);
}
```

Теперь процедура *testme* может быть протестирована, но для начала компилируем данную программу с помощью утилиты *cutec*:

```
#cutec cell.c f
```

Данная команда показывает, что процедура *f* – процедура, с которой начнется процесс тестирования программы. Процесс компиляции генерирует два исполняемых файла: *cell.exe* и *cell.g.exe*. Программа *cell.exe* выполняется несколько раз, она генерирует новые входные данные для тестируемой программы. Сгенерированные входные данные сохраняются, чтобы помочь процессу отладки программы в случае ошибки.

После компиляции программы запускаем процесс тестирования:

```
#cute cell -i 1000
```

Данная команда указывает, что должно быть сгенерировано не менее 1000 различных входных данных для тестируемой программы.

Вычислительный эксперимент

Для демонстрации эффективности предложенного автором подхода был выбран программный комплекс Open SIP, разработка протокола установления сеансов (Session Initiation Protocol) с открытым исходным кодом. Протокол SIP описывает, каким образом клиентское приложение может запросить начало соединения у другого, возможно, физически удалённого клиента, находящегося в той же сети, используя его уникальное имя. Протокол определяет

способ согласования между клиентами об открытии каналов обмена на основе других протоколов, которые могут использоваться для непосредственной передачи информации. Допускается добавление или удаление таких каналов в течение установленного сеанса, а также подключение и отключение дополнительных клиентов (то есть допускается участие в обмене более двух сторон — конференц-связь). Протокол также определяет порядок завершения сеанса.

Реализация данного комплекса на языке программирования С доступна на сайте <http://www.gnu.org/software/osip/osip.html>. Для тестирования была использована версия продукта 2.2.1, исходный код комплекса состоит примерно из 30,000 строк программного кода.

Для тестирования был выделен программный код, отвечающий за кодирование и декодирование сообщений SIP протокола, данный фрагмент кода состоит из 70 процедур (~10,500 строк программного кода).

Построив управляющий граф для данного комплекса, можно увидеть, что 25 из 70 процедур мало популярны: вызываются лишь одной или двумя другими процедурами, 22 процедуры вызываются 5-ю другими процедурами, 15 процедур вызываются 10 другими процедурами, и 8 процедур очень популярны, вызываются 20 разными процедурами.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Алгоритм разбиения	Количество выделенных модулей	Тестовое покрытие исходного кода комплекса
Случайное разбиение комплекса на 6 модулей (r6)	6	0,44
Случайное разбиение комплекса на 11 модулей (r11)	11	0,49
Случайное разбиение комплекса на 16 модулей (r16)	16	0,32
Разработанный автором алгоритм	18	0,85
Случайное разбиение комплекса на 21 модулей (r21)	21	0,5
Случайное разбиение комплекса на 26 модулей (r26)	26	0,49
Алгоритм Fiduccia-Mattheyses (FM)	30	0,75
Случайное разбиение комплекса на 31 модулей (r31)	31	0,52
Алгоритм Kernighan-Lin (KL)	35	0,65
Случайное разбиение комплекса на 36 модулей (r36)	36	0,58
Случайное разбиение комплекса на 41 модулей (r41)	41	0,52
Случайное разбиение комплекса на 46 модулей (r46)	46	0,56
Случайное разбиение комплекса на 51 модулей (r51)	51	0,68
Каждая процедура комплекса выделяется в отдельный модуль (sml)	55	0,63

Алгоритм, предложенный автором, разбил данный комплекс на 18 модулей. Далее тестирование полученных модулей проводилось утилитой CUTE, которая генерировала до

1000 различных входных данных для каждого модуля, в результате чего было обнаружено несколько ошибок в реализации протокола SIP, которые могли повлечь к неожиданному завершению работы комплекса. Покрытие исходного кода комплекса тестами составило 85%.

Для подтверждения эффективности алгоритма, предложено автором, был проведен следующий эксперимент. Описанный в программный комплекс был разделен на модули разными алгоритмами (случайное разделение на N частей, алгоритм Kernighan-Lin [5], алгоритм Fiduccia-Mattheyses [6]), и далее полученные модули тестировались программой CUTE, генерировалось 1000 различных входных данных для каждого модуля. В процессе тестирования велась статистика тестового покрытия исходного кода.

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Результат эксперимента можно представить в виде графика (рис. 6).

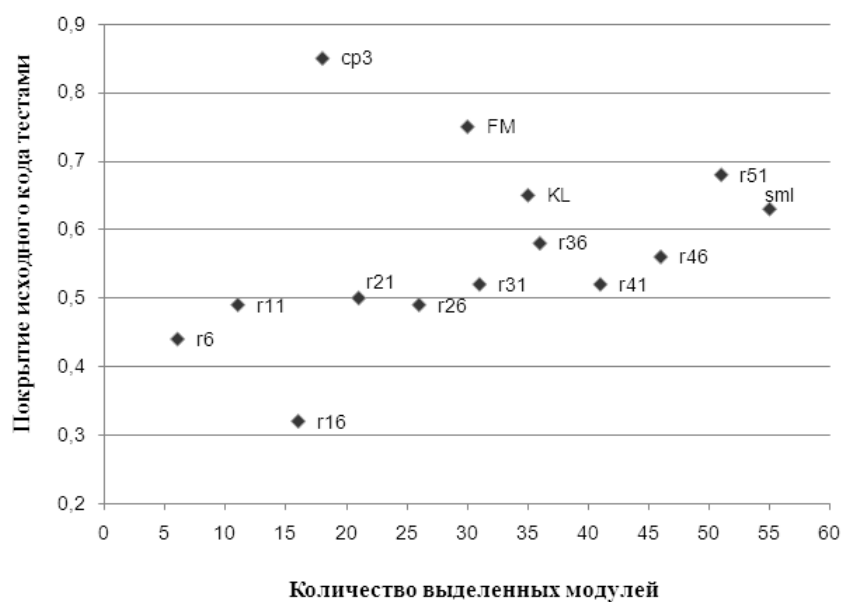


Рис. 5. Тестовое покрытие исходного кода комплекса

Вычислительный эксперимент показал, что наилучшее разбиение достигается при использовании алгоритма, предложенного автором, при использовании данного алгоритма достигается максимальное покрытие кода тестами. Это можно объяснить следующим образом: другие алгоритмы разбиения в большинстве не учитывают направление ребер в управляющем графе комплекса, и в результате этого при разбиении некоторые вершины в модулях становятся не достижимыми ни из одной другой вершины модуля, и, как результат, некоторые процедуры остаются протестированными. Предложенный автором алгоритм объединяет вершины в модули, которые достижимы из некоторой начальной вершины модуля, тем самым гарантируя, что все вершины в модуле достижимы и все процедуры модуля могут быть протестированы. В связи с этим улучшается качество тестирования программного продукта.

Полученные результаты вычислительного эксперимента подтвердили целесообразность применения декомпозиционного подхода к решению задачи тестирования программных комплексов.

Библиографический список

1. **Липаев, В.В.** Программная инженерия. Методологические основы / В.В. Липаев. – М.: ТЕИС, 2006.
2. Korel V. A dynamic Approach of Test Data Generation // IEEE Conference on Software. IEEE Computer Society Press, 1990. November. Pp. 311-317.

3. Gupta N., Mathur A.P., and Soffa M.L. Generating test data for branch coverage. // Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Automated Software Engineering. IEEE Computer Society Press, 2000. September. Pp. 219-227.
4. Sen K., Marinov D., and Agha G. CUTE: A concolic unit testing engine for C. // Proceedings of the 10th European software engineering conference held jointly with 13th ACM SIGSOFT international symposium on Foundations of software engineering, 2005. Pp. 263-272.
5. Pothen A., Simon H., and Liou K.-P. Partitioning sparse matrices with eigenvectors of graphs. // SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications, 1990. № 11. Pp. 430-452.
6. Mattheyses R.M. and Fiduccia C.M. A linear time heuristic for improving network partitions. // In Proceedings 19th IEEE Design Automation Conference, 1982. Pp. 175-181.

*Дата поступления
в редакцию 05.10.2012*

A.S. Bazin

AUTOMATED TESTING OF SOFTWARE SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: A key problem for effective testing of software systems is the difficulty of partitioning large software systems into appropriate units that can be tested in isolation.

Design/methodology/approach: We present an approach that identifies control and data inter-dependencies between software components using static program analysis, and divides the source code into units where highly-intertwined components are grouped together.

Findings: Those units can then be tested in isolation using automated test generation techniques and tools, such as dynamic software model checkers.

Experimental results: We discuss preliminary experimental results showing that automatic software partitioning can significantly increase test coverage.

Key words: bundled software, testing, decomposition, algorithm, graph.

УДК 519.8

Д.Е. Шапошников, М.Н. Ушакова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Целями разработки моделей и методов принятия решений являются формирование концепции электроэнергетических сетей, то есть иерархических распределенных канальных систем (ИРКС) в электроэнергетике; применение и адаптация сетевых потоковых моделей для моделирования ЭЭС при планировании, анализе и эксплуатации. В статье предлагаются обоснованные математические модели и вычислительные процедуры для планирования нагрузки электроэнергетической сети. Методы и алгоритмы основаны на сетевых потоковых моделях и методах оптимизации. Результаты работы могут быть применены в отрасли энергетики при планировании нагрузки и оценки эффективности работы электроэнергетической сети.

Ключевые слова: электрические распределенные сети, графовые модели, сетевые потоковые модели, линейное программирование.

В современной научной литературе отмечается, что изменение организационных форм собственности и формирование рыночных условий обусловили возникновение для энергетических компаний новой системы требований стейкхолдеров (акционеров, законодателей, регулирующих органов, потребителей, общественных и экологических организаций), суть которых состоит в повышении надежности электроснабжения, снижении операционных издержек, повышении доходов инвесторов, снижении численности персонала и др. [1].

С другой стороны, развиваются и принципиально новые подходы, в которых ведущая роль отводится ядру электроэнергетической системы – электрической сети как структуре, обеспечивающей надежность и эффективность связи генерации и потребителя. Современные технические средства корректировки параметров электрических сетей вместе с новыми системами сбора, передачи и обработки информации, быстродействующими программами оценки состояния (текущего режима) и прогнозирования будущих узких мест энергосистемы, а также гибкой системой управления (сочетание централизованного и локального управления) всеми ее элементами способны вывести электроэнергетику на качественно новый уровень. Реализация этой концепции существенно повысит надежность и экономичность функционирования и развития ЭЭС России, улучшит качество обслуживания потребителей электрической энергии при удешевлении поставляемой электроэнергии и сопутствующих услуг [2].

В настоящее время важной задачей является создание интегрированной, саморегулируемой, распределенной системы электроснабжения, обеспечивающей автоматическое управление электросетями и объединяющей энергетические, информационные и финансовые потоки в едином канале по силовым цепям.

Основной концептуальной чертой данного подхода является использование сетевых потоковых моделей для моделирования работы электроэнергетической сети, а также для управления её конфигурацией и развитием. Сетевые потоковые модели предназначены для моделирования системы доставки потребительского ресурса (электроэнергии) по системе географически распределенных каналов и узлов от источников (генераторов) к потребителям (абонентам). Описывая в данном случае электроэнергетическую сеть в виде математического графа, состоящего из множества вершин (узлов) и дуг (каналов), можно построить систему математических моделей распределенной электроэнергетической сети для оптимизации её структуры и организации работы.

Распределенная электроэнергетическая сеть является многоуровневой в зависимости от распределяемой мощности и напряжения [2]. В распределительной сети первого уровня узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты 20 кВ, а в сети второго уровня узлы являются подстанциями 220 кВ, третий уровень – 500 кВ и выше.

Наиболее подходящей концепцией для потокового моделирования многоуровневых электроэнергетических сетей является концепция иерархических распределенных канальных систем (ИРКС), основные характеристики которой заключаются в следующем.

1. *ИРКС состоит из узлов и каналов передачи ресурса (электроэнергии).* В электроэнергетических сетях узлы и каналы предназначены для преобразования и передачи электрической мощности соответственно.

2. *Каждый узел сети может иметь несколько потребителей ресурса (абонентов).* Абоненты, которые присоединены к узлу, имеют известные потребности в ресурсах.

3. *Каждый узел может иметь несколько входящих и/или исходящих каналов.* Направление движения ресурса в канале может меняться в процессе управления сетью, в том числе, в реальном времени.

4. *Каждый узел может иметь соединение с узлом вышестоящего уровня.* В электроэнергетических сетях это означает, что теоретически каждый узел может соединяться каналом передачи электроэнергии с вышестоящим уровнем иерархии, который выступает в данном случае в роли генератора (источника электроэнергетической мощности).

5. *Общее количество входящих и исходящих каналов в каждом узле не может превышать трех.* В это количество включается и канал от вышестоящего уровня, если он присутствует.

6. *Каждый канал обладает ограничениями на пропускную способность (минимальная и максимальная передаваемая электрическая мощность),* при этом, в частности, минимально допустимая мощность может отсутствовать, то есть быть равной нулю.

ИРКС можно представить в виде структуры, в которой сеть каждого напряжения представлена в виде плоскости. В случае распределенных электрических сетей плоскости имеют соединения в узлах нагрузки 500/220/20 кВ.

Общая схема графа, моделирующего ИРКС, представлена на рис. 1.

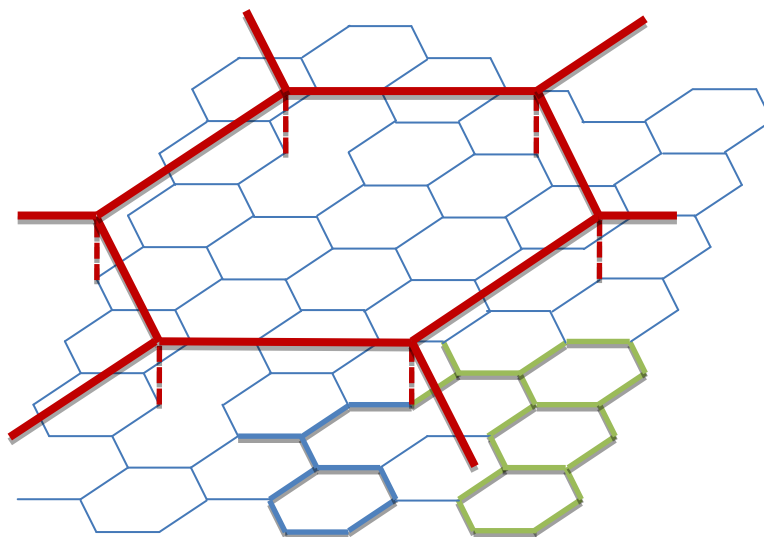


Рис. 1. Общая схема графа, моделирующего ИРКС

Таким образом, ИРКС представляет собой многослойный граф, подграфы каждого слоя в котором являются (чаще всего) планарными, что повышает их иллюстративность и соответствует реальной конфигурации сети, географически распределенной по некоторой

ограниченной территории. Планарность не является сколько-нибудь обязательным требованием, так как реально граф ИРКС планарным не является даже в теории.

В силу перечисленных особенностей, необходимо рассматривать и осуществлять раздельное планирование и управление функционированием сети для каждого слоя иерархии. Кроме, как уже было отмечено, каналы ИРКС в общем случае принадлежат разным владельцам с различными интересами и являются различными по длине, стоимости и характеристикам. Все это необходимо учитывать при распределении нагрузки на них.

Будем рассматривать ориентированный граф $G(V, E)$, описывающий иерархическую сетевую каналную систему. Граф $G(V, E)$ представляет собой мультиграф с несколькими иерархическими подграфами (слоями) $G^s(V^s, E^s)$, $s = 1, \dots, S$.

Потребители узла являются:

- конечными потребителями (в последнем слое иерархии $s = S$);
- потребителями нижележащего слоя иерархии $s = 1, \dots, S - 1$.

Последнее свойство позволяет анализировать и оптимизировать слои ИРКС независимо.

Дуги в данной модели могут быть ненаправленными и т передавать ресурс в двух направлениях (зависит от текущего состояния сети). При этом везде в сети соблюдается баланс количества генерируемого, передаваемого и потребляемого ресурса

Введем следующие обозначения:

- генераторы (интерфейсы к верхнему уровню):
 - $G_i, i = 1, \dots, m$, – генераторы (интерфейсы);
 - $g_i, i = 1, \dots, m$, – количество генерируемой мощности;
- узлы передачи / потребления:
 - $N_j, j = 1, \dots, n$, – узлы передачи и потребления;
 - $c_j, j = 1, \dots, n$, – потребление абонентов в данном узле;
- каналы передачи (дуги в графе):
 - $D_k, k = 1, \dots, K$, – канал передачи ресурса;
 - $d_k, k = 1, \dots, K$, – нагрузка на канал передачи ресурса;
- соединение канала и узла:
 - $D_+(N_j)$ – множество каналов-поставщиков ресурса в узел;
 - $D_-(N_j)$ – множество транзитных каналов узла.

Пример топологии и обозначений приведен на рис. 2.

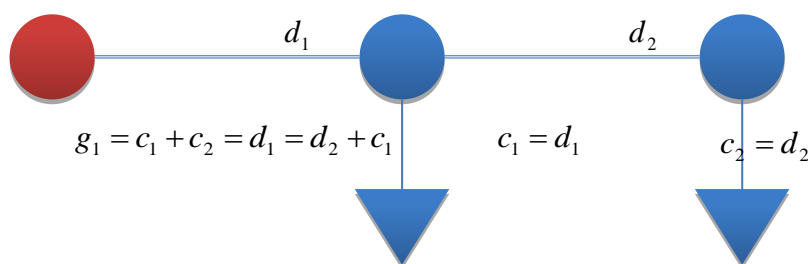


Рис. 2. Пример топологии и обозначений

Ограничения области допустимых значений в данной модели включают следующие соотношения.

1. Ограничения на пропускную способность канала:

$$d_k \leq d_k^+, k = 1, \dots, K.$$

2. Уравнение общего баланса генерации-потребления по всей сети:

$$\sum_{i=1}^m g_i = \sum_{j=1}^n c_j.$$

То есть количество генерируемого (вводимого на данный иерархический уровень) ресурса должно полностью потребляться присоединенными к данной сети абонентами.

3. Уравнение баланса узла:

$$\sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j$$

или

$$\sum_{k \in D_+(N_j)} d_k - \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l - c_j = 0.$$

То есть, количество поставляемого в узел ресурса равно потреблению в узле и транзиту из узла.

Показатели работы сети и нагрузки на сеть имеют следующий вид.

1. Общая нагрузка на сеть.

Нагрузку на сеть характеризует вектор $d = (d_1, \dots, d_K)$. Данный векторный показатель является интегральным, то есть, характеризующем всю сеть в совокупности.

2. Загрузка отдельного узла $j \in \{1, \dots, n\}$.

Данный показатель представляет собой характеристику загрузки узла и равен количеству ресурса, проходящего через узел в единицу времени (транзитная мощность плюс местное потребление):

$$t_j = \sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j.$$

3. Загрузка канала $k \in \{1, \dots, K\}$.

Представляет собой величину d_k .

4. Загрузка генератора (интерфейса) $i \in \{1, \dots, m\}$.

Представляет собой величину g_i .

Общая нагрузка на сеть – характеристика, важная с точки зрения административного деления. Показатель загрузки узла важен с точки зрения характеристики оборудования. Загрузка канала является величиной, определяющей финансовый доход владельцев канала.

Важной системной характеристикой, определяющей взаимодействие и сочетание взаимнопротиворечивых интересов владельцев каналов может служить предпочтительность пропуск ресурса через канал k , которую обозначим через z_k . Оценка предпочтительности может определяться стоимостью, длиной, сложностью, предпочтительностью, мощностью, современностью или другими характеристиками. Данная оценка и все стоимости являются внешними и неизменными величинами с точки зрения математической модели.

Цель макроэкономической системы – распределить возможность получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае – операторов-владельцев):

$$d_i \rightarrow \max_{d \in D_d}.$$

Один из обоснованных методов такого распределения – равномерность получения доходов владельцам каналов при функционировании системы (критерий Гермейера):

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq j \leq n} d_j.$$

Система может также должна учитывать экономические интересы и технические требования вышестоящего уровня – равномерность нагрузки на генераторы. Это может быть также реализовано при помощи максиминного критерия:

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq i \leq m} t_i.$$

Как известно, максимизация с использованием данного обобщенного критерия оптимальности приводит к эффективному решению (Подиновский, Ногин, 1982).

В случае применения z_i как оценки предпочтительности пропуска ресурса через канал k целью макроэкономической системы будет являться распределение возможности получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае – операторов-владельцев):

$$d_i / z_i \rightarrow \max_{d \in D_d}.$$

Один из обоснованных методов такого распределения – равномерность получения доходов владельцам каналов при функционировании системы (критерий Гермейера):

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq j \leq n} d_i / z_i.$$

Величины (коэффициенты) $1/z_i$ могут быть использованы в качестве весовых коэффициентов в обобщенном критерии оптимальности.

Как известно, максимизация с использованием данного обобщенного критерия оптимальности также приводит к эффективному решению [3].

При предположении, что:

- 1) ограничения снизу на нагрузку каналов отсутствуют;
- 2) все каналы являются направленными,

решение данной задачи может быть получено при решении следующей задачи линейного программирования:

$$\begin{aligned} & \max v; \\ & d_k / z_k \geq v, k = \overline{1, K}; \\ & \sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j, j = \overline{1, n}; \\ & \sum_{i=1}^m g_i = \sum_{j=1}^n c_j; \\ & d_k \geq 0, k = \overline{1, K}; \\ & g_i \geq 0, i = \overline{1, m}. \end{aligned}$$

В случае, если для некоторых $k \in K' \subseteq K$ ограничения сверху на нагрузку каналов не выполняются:

$$d_k > d_k^+, k \in K',$$

то для решения исходной задачи можно применить следующий алгоритм.

Алгоритм 1

1. Решаем исходную задачу без ограничений на пропускную способность каналов (дуг).
2. Если при этом нагрузка всех каналов удовлетворяет ограничениям сверху, то задача решена (конец работы алгоритма).
3. Выбираем произвольный $k' \in K'$.
4. К ограничениям задачи 1 добавляем ограничение $d_{k'} = d_{k'}^+$.
5. Из ограничений задачи 1 исключаем ограничение $d_{k'} / z_{k'} \geq v$.
6. Переходим к п. 1 (повторно решаем задачу).

Данные модели и методы были применены для решения задач анализа и планирования нагрузки на электрическую распределенную сеть и показали эффективность методик и применимость подходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.516.11.6063 от 28.04.2011 г.).

Библиографический список

1. **Кобец, Б.Б.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
2. **Соснина, Е.Н.** Топология городских распределенных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ // Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. 2012. №5. – С. 11–17.
3. **Подиновский, В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
4. **Лазарев, Е.А.** Генетические алгоритмы оптимизации сети передачи данных / Е.А. Лазарев, Д.Е. Шапошников, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии, 2011, №4 (46). С. 59–63.

*Дата поступления
в редакцию 05.10.2012*

D.E. Shaposhnikov, M.N. Ushakova

ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS MODELLING BASED ON THE CONCEPT OF HIERARCHICAL DISTRIBUTION CHANNEL SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The development of decision-making models and methods are the concept power networks formation.

Design / Methodology / Approach: The conception of the hierarchically distributed channel systems in electric power industry, application and adaptation of the network flow models for simulation of Electric power networks in planning, analysis and exploitation.

Findings: The mathematical models and computational procedures for capacity planning of the power grid. The methods and algorithms are based on network flow models and methods of optimization.

Originality/value: Findings of this work can be used in the area of commercial electrical power distribution, generation and metering in the planning and evaluation of load efficiency. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as part of government contract from October 11 2011, № 16.526.12.6016The results can be applied to the energy sector in the planning and evaluation of load efficiency power grid.

Key words: electrical distribution network graph models, network flow models, linear programming.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК .004.12; .001.63

В.М. Медунецкий, С.В. Солк

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАК ИСХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАУКОЁМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассмотрены понятия «качество» и «проектирование» с учётом современного развития техники и технологий, дан анализ и сформулировано новое понимание термина «качество» с учётом затраченных ресурсов на его достижение. Выявлена целесообразность оценки уровня качества по этапам жизненного цикла наукоёмких и высокотехнологичных изделий. Предложена методика, которая рассматривает проектирование в качестве исходного процесса обеспечения качественных показателей изделия на всех стадиях его жизненного цикла, рассмотренная на примере оптико-механической системы прибора.

Ключевые слова: качество, проектирование, жизненный цикл изделия.

Введение

В настоящее время всё более актуальной становится проблема повышения качества промышленной продукции. Уровень её качества определяет конкурентоспособность продукции в условиях современной рыночной экономики, а в целом, престиж, страны, как постиндустриальной державы. Известно, что эффективно повысить качество изделий можно в процессе проектирования.

Таким образом, вопросы обеспечения и оценки качества проектирования являются сегодня важными и нередко приоритетными. Однако анализ как литературных источников, так и нормативных документов показывает наличие существенных разночтений понятий «качество» и «проектирование» уже на терминологическом уровне, а эти вопросы особенно актуальны для российских производителей в связи с вхождением России в ВТО.

Термин «качество» как неоднозначное понятие

Существует большое количество различных определений термина «качество». Ещё в 60-е годы прошлого века в работе [1] основоположник квалиметрии Г.Г. Азгальдов писал, что такое многообразие формулировок нельзя просто объяснить субъективными ошибками того или иного учёного. В той же работе на основании анализа нескольких сотен статей и книг приведены 42 разновидности формулировок понятия «интегральное качество продукции». Прошло 50 лет, но вопрос остался открытым, поэтому ведутся профессиональные дискуссии на эту тему, в том числе и в сети Интернет.

В настоящее время наиболее часто под качеством продукции понимается (в соответствии с ГОСТ 15467-79) совокупность её свойств, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением. В международном словаре ИСО 8402-1994 «качество» – совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворить установленные или предполагаемые потребности. Международ-

ный стандарт ИСО 9000:2005 определяет качество как степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования (потребности или ожидания, которые установлены, обычно предполагаются или являются обязательными).

Существует большое количество и других определений и концепций, но на наш взгляд, в них, как правило, учитывается лишь полученный результат – в настоящее время или в перспективе и не полностью учитываются ресурсы, необходимые для достижения этого результата (временные, людские, технические и финансовые). Если строго следовать предложенным определениям, то для производства «качественной» продукции придётся создать нечто очень сложное и дорогое. Также требуется учесть такой важный фактор, как нанесение ущерба окружающей среде или минимизация этого ущерба. В ряде стран в последнее время под давлением общественного движения «зелёных» были приняты законы, запрещающие применение неразборных конструкций, которые содержат неизвлекаемые и трудноутилизируемые детали.

Следует отметить, что к высокоточным и наукоёмким изделиям, которыми, в частности, являются изделия для научных исследований и изделия военного назначения, не всегда корректно применять такие выражения, как удовлетворение определённых потребностей. В ряде случаев представляется целесообразным применение изделий с невысокими техническими характеристиками, но позволяющими получить требуемый результат и относительно дешёвыми в производстве.

Таким образом следует отметить, что *качество – совокупность свойств продукции, позволяющих с заданной результативностью выполнять определённые функции, установленные или предполагаемые, с учетом требуемых затрат ресурсов (временных, людских, технических, экономических и экологических) на её разработку, изготовление и эксплуатацию.*

Следует пояснить, что под результативностью понимается (согласно ИСО 9000:2005) степень, в какой реализована запланированная деятельность и достигнуты запланированные результаты.

Может показаться, что предложенное определение дублирует понятие «интегральный показатель качества продукции», приведённый в ГОСТ 15467-79 и определяемый как показатель качества продукции, являющийся отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на её создание и эксплуатацию или потребление. Однако, на наш взгляд, это не так. Если формально следовать этому определению, то может оказаться, что интегральный показатель качества некомфортного, устаревшего морально, неэкологичного и часто ломающегося устройства, но при этом дешёвого в производстве и не требующего квалифицированного обслуживания, окажется достаточно высоким. При этом важно подчеркнуть, что использование экономических показателей при оценке качества является во многом дискуссионным. Так, в работе [2] подчёркивается, что во взглядах на экономическую сущность качества сохраняются значительные расхождения и противоречия.

Проектирование – цели и критерии оценки

Как уже было отмечено, уровень качества изделия в современных условиях в основном закладывается на стадии его проектирования. Вопросы проектирования рассмотрены в большом количестве печатных работ, основная часть которых посвящена конкретным областям техники. Значительно меньшее количество посвящено общим вопросам методики проектирования, а их анализ показывает наличие существенных разночтений.

Следует отметить отсутствие чёткого представления, что же представляет собой проектирование. В широко известной работе [3] приводится более десятка формулировок: от «разработки чертежей, которые могли бы получить одобрение клиента» до «целенаправленной деятельности по решению задач» или «осуществления очень сложного акта интуиции».

Знаменитому авиаконструктору А.С. Яковлеву приписывают слова, что проектировать нужно не то, о чём просит заказчик, а то, что ему нужно. В ряде случаев такой подход

имеет смысл. Заказчик может не иметь опыта работы с проектируемым изделием или «на всякий случай» значительно завышать требуемые характеристики. Неслучайно в памятке конструктора чехословацкого предприятия «Свит» было написано: «Научитесь работать на разработанном изделии или его аналоге. Это позволит вам глубже освоить его особенности». Такой разброс суждений затрудняет разработку методик и подходов к процессу проектирования изделий, а также выработку критериев оценки его качества.

Считается, что для проектировочной деятельности исходным является социальный заказ, т.е. потребность в создании определённых объектов, вызванная некими общественными потребностями. Однако в современном обществе потребления в условиях массового производства социальный заказ во многих случаях формируется под действием рекламы. В работах по проектированию, опубликованных в последние годы, подчёркивается, что общество с развитой рыночной экономикой требует от инженера всё большей ориентации на вопросы маркетинга и психологии потребителя.

Качественные показатели изделий во взаимосвязи с их жизненным циклом. Методика проектирования

Показатель качества продукции (согласно ГОСТ 15467-79) – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в её качество, рассматриваемых применительно к определённым условиям её создания и эксплуатации или потребления.

В соответствии с нормативным документом РД 50 – 149 – 79 (на настоящий момент аннулирован без замены), должны применяться следующие группы показателей: назначения, надёжности, эргономические, эстетические, технологичности, транспортабельности, унификации, патентно-правовые, экологические и показатели безопасности. В зависимости от назначения изделия, условий изготовления или эксплуатации некоторые указанные группы могут не использоваться.

Показатели качества закладываются при проектировании и изготовлении продукции. Далее в процессе эксплуатации они изменяются, как правило, в сторону ухудшения и, в ряде случаев, требуют проведения мероприятий по их восстановлению. Поэтому целесообразно рассматривать качественные показатели во взаимосвязи с этапами жизненного цикла изделия.

Считается, что термин «жизненный цикл» впервые ввёл американский экономист Теодор Левит в 60-е годы прошлого века. Под жизненным циклом понимается совокупность этапов или последовательных процессов, которые проходит изделие в процессе своего существования.

Можно предложить такую методику проектирования, согласно которой при проектировании изделия необходимо рассмотреть его полный жизненный цикл, определить требуемые качественные показатели и определить, на каких стадиях жизненного цикла они будут обеспечиваться с учётом затрат ресурсов на их обеспечение и наличия этих ресурсов.

Предложенную методику можно рассмотреть на примере жизненного цикла оптико-механических систем (ОМС) высокоточных ИК приборов. Производство таких систем является наукоёмким и высокотехнологичным процессом. Поэтому в России и в других странах таких производителей гораздо меньше, чем, например, производителей оптико-механических систем видимого диапазона. Предложенные решения могут применяться при проектировании и других видов точных приборов и машин.

Предлагаемая методика заключается в следующем. На первом этапе определяется перечень качественных показателей, которые должны быть обеспечены для данного изделия. На втором этапе рассматриваются возможные варианты их обеспечения. На третьем – определяется влияние различных параметров (вариантов) на группы качественных показателей и необходимые ресурсы для их реализации и принятия окончательного решения.

На рис. 1 приведена схема жизненного цикла ОМС. На этапе концептуализации определяются наличие потребности в изделии, техническая возможность и экономическая целе-

сообразность его изготовления. Функциональное проектирование заключается в разработке оптических, электрических, кинематических и других схем изделия. На стадии конструирования разрабатывается конструкторская документация, по которой изделие будет изготовлено. Технологическая подготовка производства сводится к разработке технологических процессов, необходимой оснастки, технологической документации. Производство включает в себя изготовление оптических и механических деталей, сборку и юстировку отдельных узлов и изделия в целом, проведение контрольно-измерительных операций на всех стадиях изготовления.

Следующий этап жизненного цикла – это проведение испытаний. В случае единичного производства (например уникального прибора) далее следует эксплуатация. Вопросы, связанные с реализацией и утилизацией, как правило, нет, и блоки 5 и 7 можно не учитывать, так как в этом варианте изделие изготавливается по конкретному техническому заданию для конкретного заказчика. Возможен также вариант, когда после проведения испытаний дальнейшая работа с изделием признаётся нецелесообразной и жизненный цикл на этом завершается.

В случае серийного производства жизненный цикл повторяется: осуществляется переход из блока 4 в блок 2. В конструкцию могут вноситься изменения, связанные с недостатками, выявленными на этапе проведения испытаний, также могут быть изменения связаны с корректировкой технологии изготовления отдельных деталей и узлов. Так, лепестки диафрагм сложной формы в единичном производстве изготавливаются с использованием лазерной резки с компьютерным управлением. В массовом – первоначально изготавливается дорогостоящая оснастка для вырубки лепестков [4], соответственно, изменяется технологическая подготовка производства. После изготовления опытной партии проводятся её испытания, и наступают этапы реализации и эксплуатации. Этап утилизации имеет смысл выделять в том случае, когда в изделии имеются детали, требующие особых условий утилизации.

Для сложных, дорогостоящих изделий, например крупногабаритных оптических систем, необходимо предусмотреть возможность их модернизации и учесть возможность перехода из блока 6 в блок 2. Например, с появлением матричных фотоприёмных устройств (ФПУ) на многих оптических телескопах вместо окуляров были установлены компенсаторы полевых aberrаций и матричные ФПУ. При проектировании таких систем целесообразно предусмотреть дополнительные (неиспользуемые в данный момент) резьбовые и гладкие отверстия, а также заглушки на отверстия для установки при необходимости электрических разъёмов.



Рис. 1. Схема жизненного цикла оптико-механической системы прибора

Варианты обеспечения качественных показателей должны рассматриваться отдельно как для единичных образцов, так и для серийных. В противном случае опытный образец изделия может не пройти испытания, или, наоборот, образец, прекрасно показавший себя в

единичном исполнении, при серийном производстве может оказаться малопригодным к эксплуатации.

Например, как показала практика, дляИК объективов самым «слабым местом» являются просветляющие, отражающие, спектроразделительные и другие покрытия. Объективы, как правило, работают в сложных условиях (перепад температур, повышенная влажность, соляной туман, динамическое воздействие пыли), что приводит к деградации покрытий [5]. Обеспечение показателей надёжности может осуществляться на следующих стадиях жизненного цикла ИК объектива:

- на этапе конструирования. Выбор покрытий повышенной стойкости. Герметизация прибора с заполнением внутренних полостей азотом или другим газом;
- технологической подготовки производства. Отработка новых типов оптических покрытий;
- производства. Использование нового современного оборудования, более чистых пленкообразующих материалов;
- эксплуатации. Прокачка осушенного газообразного азота через внутренние полости изделия через определённые временные интервалы. Периодическая замена иллюминаторов, контактирующих с вредной средой.

Необходимо учитывать, что улучшение показателей надёжности может привести к ухудшению показателей назначения, например, к уменьшению спектрального пропускания объектива.

Далее необходимо определить затраты ресурсов, необходимых для реализации каждого из вариантов, и выбрать наиболее целесообразный.

Следует отметить итерационный характер выбора вариантов. Наличие или отсутствие необходимых технологий, возможности их разработки и освоения производством непосредственно влияют на конструкцию изделия. В то же время конструкторские решения заставляют технологов искать новые пути и подходы. Так, была разработана технология изготовления пресс-форм алмазным точением и технология вакуумного прессования оптических элементов [6].

Методы повышения и оптимизации уровня качества изделий

Наиболее полно методы повышения качества оптико-механических приборов на стадии проектирования рассмотрены [7]. В этой работе дана классификация методов проектирования и приведены примеры их применения. Показано, что повысить качество прибора можно технологическим, проектно-конструкторским или компенсационным методами. Подчёркивается важность технико-экономического обоснования выбора метода, так как он зависит от большого количества трудно учитываемых факторов: серийности изделия, технологической оснащённости производства, квалификации рабочих и многих других. Рассмотрены случаи, когда методы, дающие хороший технический результат, ведут к большой незавершённости производства.

В работе [8] приведены широко распространённые в технической литературе методики определения оптимального уровня качества продукции, в том числе и иллюстрированные графиками. Уровень качества продукции, согласно ГОСТ 15467-79, является относительной характеристикой качества продукции, основанной на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей.

В первом случае оптимальным уровнем качества считается такой, при котором сумма производственных затрат и затрат на эксплуатацию за весь жизненный цикл изделия будет минимальной. Во втором – когда разность между доходом потребителя и затратами на приобретение и эксплуатацию будут максимальными.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение уровня качества целесообразно лишь до определённого предела. Однако опыт таких флагманов мировой экономики, как «Сони», «Панасоник», «Ай-Би-Эм», «Дженерал Электрик» и других, убедительно

доказывает, что повышенный уровень качества продукции играет важную роль в конкурентной борьбе, а доходы от его повышения не могут быть определены простыми арифметическими расчётами.

Выводы

Использование предложенной методики направленной на обеспечение качества изделий (продукции) с учётом заданной результативности и необходимых для этого затрат ресурсов, а также с рассмотрением нескольких ветвей жизненного цикла изделий (отдельно для единичного образца и для серии), апробировано при проектировании и изготовлении таких ИК объективов как «ИК-05», «Сажень ТА-ИК», «Берет – 01» и других. Предложенные рекомендации позволяют, по нашему мнению, детализировать и формализовать процесс проектирования и избежать каких-либо «слабых» вариантов.

Библиографический список

1. **Азгальдов, Г. Г.** Что такое качество / Г. Г. Азгальдов, А. В. Гличев, В. П. Панов. – М.: Экономика, 1968. – 135 с.
2. **Злобин, Б.К.** Экономический механизм повышения качества продукции / Б.К. Злобин. – М.: Мысль, 1980. – 151 с.
3. **Джонсон, Дж. К.** Методы проектирования: [пер. с англ.] / Дж. К., Джонсон. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
4. **Макин, В.С.** Технология изготовления лепестков диафрагм / В.С. Макин [и др.] // Тезисы докладов 20-й международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2008. С. 200–201.
5. **Сабинин, В.Е.** Аппаратура для климатических испытаний малогабаритных оптических элементов / В.Е. Сабинин, С.В. Солк, С.Е. Шевцов // Прикладная оптика –2006: сб. трудов международной конференции. – СПб., 2006. Т. 1. С. 204-207.
6. **Сабинин, В.Е.** Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов В.Е.Сабинин, С.В.Солк // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 61–64.
7. **Латыев, С.М.** Конструирование точных (оптических) приборов: учеб. пособие / С.М. Латыев – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.
8. **Федюкин, В.К.** Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции: учеб. пособие / В.К. Федюкин. – М.: КНОРУС, 2009. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2012*

V.M. Medunetskiy, S.V. Solk

DESIGNING AS INITIAL PROCESS OF PROVIDING QUALITY INDICATORS OF SCIENTIFIC AND HI-TECH PRODUCTS

St. Petersburg National Research University
Information Technologies, Mechanics and Optics

Nowadays there are no unified views on such important notions as «quality» and «designing» of industry production. In the following article these notions were considered according to current development of technics and technology. In the work an analysis is presented and a new presentation of the term «quality» with due regard for the resource inputs made for its acquisition is given. Expediency of quality evaluation according to stages of life cycle of scientific and hi-tech products was identified. A conception, in which the designing is considered as an original process of providing qualitative indices of a product at all its life cycle stages, is proposed and presented on the tools optic-mechanical system example.

Key words: quality, designing, article life cycle.

УДК 621.9.026

Ю.Г. Кабалдин¹, О.В. Кретинин¹, С.В. Серый², Д.А. Шатагин¹**НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗАНИИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет²

Изучен процесс наноструктурирования контактных поверхностей режущего инструмента при механической обработке. Указаны принципы формирования износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного инструмента.

Ключевые слова: твёрдые сплавы, износ, наноструктурные покрытия.

Согласно современным воззрениям [1, 2], сопротивляемость инструментальных материалов разрушению и изнашиванию существенно определяется как исходной структурой, так и динамической, которая формируется в процессе нагружения и вызывает диссипацию подводимой энергии.

Развитие представлений о прочности и механизмах изнашивания режущего инструмента в значительной степени определяется новейшими достижениями в области материаловедения, физики и химии твердых тел. Сложность физико-химических процессов, протекающих на контактных поверхностях инструмента, недоступность зоны резания обуславливает также необходимость адекватного моделирования указанных процессов и разработку методов расчета прочности и износостойкость режущего инструмента.

В последние годы резко возрос интерес к наноматериалам и нанотехнологиям [3, 4]. При переходе к нанометровым размерам материалы начинают менять свои фундаментальные свойства. Это происходит из-за изменения соотношения поверхностных и объемных атомов индивидуальных частиц. Поверхность самого идеального кристалла может считаться большим двумерным дефектом (на поверхности атомы с одной стороны ничем не связаны). Поверхностные атомы в общем случае находятся на более близких расстояниях друг от друга, чем атомы в объеме кристаллической решетки, и обладают повышенным запасом энергии. До определенного размера частиц доля этих атомов мала, их вкладом в общие характеристики вещества можно пренебречь. У наночастиц свойства поверхностных атомов становятся определяющими. Другими словами, наночастицы проявляют квантовые свойства в отношении своих размеров. Это означает, что в определенном материале могут устойчиво существовать наночастицы только определенных размеров ~ 100 нм.

В настоящее время в качестве инструментальных материалов широко используются твердые сплавы и твердые сплавы с покрытием. Структура твердых сплавов включает тугоплавкие карбиды TiC, WC, TiCN и т.д., а в качестве связующей фазы используют кобальт, сплав никель-молибден и др.

Спеченные твердые сплавы – это композиционные инструментальные материалы [1], прочность, которых с точки зрения контактного взаимодействия при резании будет определяться прочностью каждого структурного элемента.

Структурными элементами в спеченных твердых сплавах являются: связка, зерно, граница «зерно – зерно», граница «зерно – связка». Твердые сплавы можно рассматривать и как дисперсно-упрочненные материалы [5]. Расчет σ_p разрушающих напряжений структурных элементов проводился по литературным данным [6] оценки вязкости разрушения - K_{IC} и по результатам собственных исследований.

Величина вязкости разрушения твердых сплавов приведена в табл. 1.

Таблица 1
Коэффициент вязкости разрушения

Марка твердого сплава	K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$
ВК8	11,6
T15K6	7,2

Для определения разрушающих напряжений используются следующие зависимости [6]:

$$K_{IC} = \sigma_p \sqrt{\pi \cdot l_{кр}} \quad (1)$$

$$K_{IC} = \sigma_p \sqrt{3\pi \cdot \lambda} \quad (2)$$

где σ_p – разрушающее напряжение; $l_{кр}$ – критическая величина дефекта; λ – толщина связующей прослойки.

Электронномикроскопическими исследованиями установлено, что размер зерен карбидной фазы в твердых сплавах изменяется от ~ 0,5 до 6 мкм, а размер прослойки – от нескольких ангстрем (нанометров) до ~ 3 мкм. По формулам (1, 2) рассчитывали разрушающие напряжения прослоек при известном параметре K_{IC} вязкости разрушения твердого сплава [6] и ее толщины (рис. 1).

Расчеты показывают, что с увеличением температуры разрушающие напряжения σ_p снижаются (рис. 1). Наибольшей прочностью, как видно из рис. 1, обладают прослойки связующей фазы с минимальной толщиной. С ростом температуры наблюдается тенденция роста σ_p с уменьшением λ толщины прослойки, особенно в мелкозернистых твердых сплавах с низким содержанием связующей фазы (%-ное отношение).

Для определения разрушающих напряжений на межфазной границе и по границе «зерно-связка» величину K_{IC} рассчитывали по зависимости, которая устанавливает связь между параметром вязкости разрушения и модулем сдвига G [5] (рис. 1).

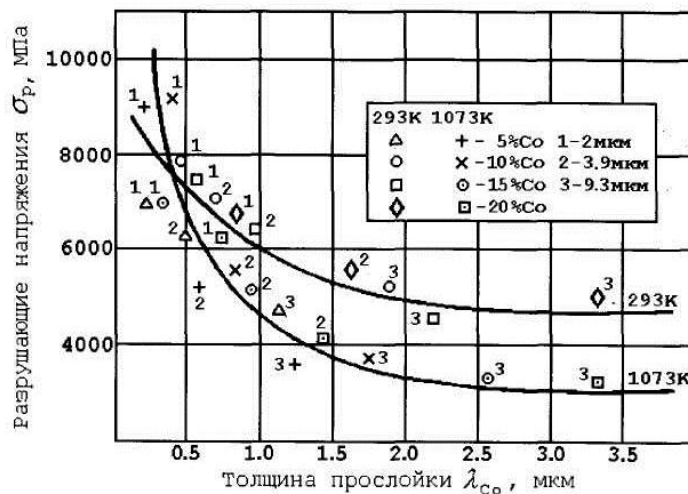


Рис. 1. Зависимость разрушающих напряжений прослойки Co от толщины и температуры:
1 – ВК8; 2 – Т15К6

$$K_{IC} = 2\sigma^B \sqrt{\frac{Gb}{\tau_{сдв}}} \quad (3)$$

где σ^B – напряжение у вершины трещины, при котором обеспечивается ее хрупкое распространение ($\sigma^B = 730...1090$ Н/мм²); $\tau_{сдв}$ – сопротивление пластическому сдвигу; b – вектор Бюргера.

Преобразуем уравнения (1, 2) с учетом (3) и получим уравнения (4) и (5) для определения разрушающих напряжений для границы «зерно-зерно» или для границы «зерно-связка» соответственно:

$$\sigma_{p(z-z)} = \frac{2\sigma^6 \sqrt{G_{(z-z)} \cdot b \cdot \tau_{сдв}}}{\sqrt{\pi \cdot l_{кр}}} \tag{4}$$

где $G_{(z-z)}$ – модуль сдвига зерен карбидной фазы.

$$\sigma_{p(z-c)} = \frac{2\sigma^6 \sqrt{G_{(z-c)} \cdot b \cdot \tau_{сдв}}}{\sqrt{\pi \cdot l_{кр}}} \tag{5}$$

где $G_{(z-c)}$ – модуль сдвига для границы зерно-связка.

Результаты расчетов сведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2
Результаты расчета разрушающих напряжений для структурных элементов твердого сплава ВК8

Структурный элемент	Разрушающее напряжение σ_p , МПа
Связка ($\lambda = 1,5$ мкм)	5000
Зерно (2 мкм)	180
Граница «зерно – зерно»	80
Граница «зерно – связка»	100

Таблица 3
Результаты расчета разрушающих напряжений для структурных элементов твердого сплава Т15К6

Структурный элемент	Разрушающее напряжение σ_p , МПа
Связка ($\lambda = 1,5$ мкм)	4500
Зерно (2 мкм)	$\sigma_{pWC} = 180$ $\sigma_{p(TiW)C} = 120$
Граница «зерно – зерно»	$\sigma_{pWC-WC} = 52$ $\sigma_{pWC-(TiW)C} = 46$
Граница «зерно – связка»	$\sigma_{pWC-Co} = 74$ $\sigma_{p(TiW)C-Co} = 68$

На рис. 2 приведена гистограмма результатов расчета разрушающих напряжений σ_p структурных элементов.

Таким образом, по результатам расчетов видно, что наиболее слабым структурным элементом в твердом сплаве являются межзеренные границы, а наиболее прочным – связующая фаза.

Приведенные расчеты позволяют утверждать, что хрупкая прочность твердых сплавов существенно определяется прочностью связующих прослоек, соизмеримых с размерами нанофаз [3, 4].

Следовательно, при спекании твердых сплавов в результате взаимодействия системы «карбид-связка» формируются тончайшие прослойки связующей фазы – нанофазы (наносистемы), обладающие высокими σ_p разрушающими напряжениями.

На рис. 3 приведены микрофотографии поверхностей изломов хрупкого разрушения режущей части инструмента из твердого сплава ВК8 и Т15К6. На рис. 3, а видно, что зерна WC разрушаются сколом и по межзеренному механизму, а связка – по вязкому (виден ямоч-

ный рельеф). В твердом сплаве Т15К6 преобладает разрушение микросколом зерен (TiW)C, причем скол переходит из зерна в зерно вследствие их срастания в процессе спекания.

Следовательно, более высокая хрупкая прочность твердого сплава ВК8, по сравнению со сплавом Т15К6, обусловлена микромеханизмами разрушения этих сплавов. Высокие разрушающие напряжения прежде всего связующей фазы способствуют ее вязкому микроразрушению, который является более энергоемким, т.е. более эффективно диссипирует энергию разрушения, чем скол.

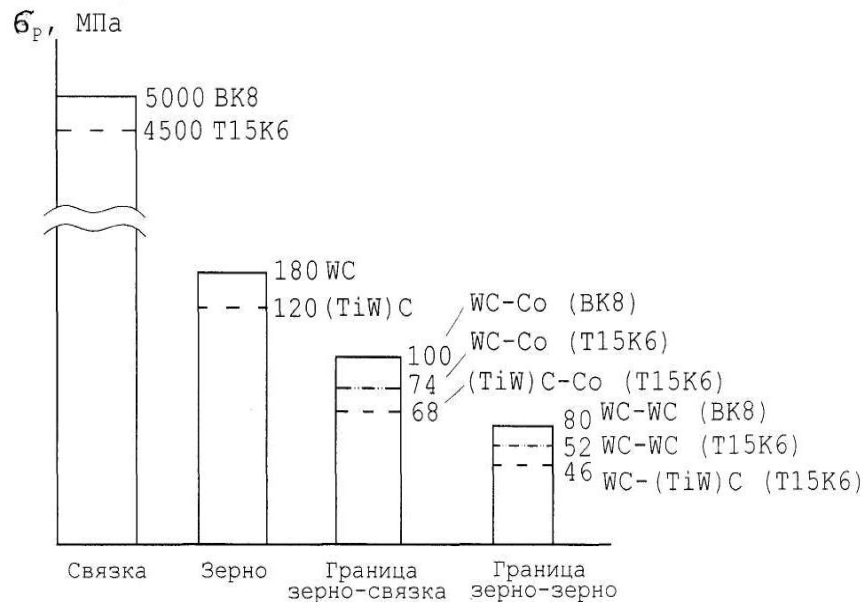


Рис. 2. Гистограмма, иллюстрирующая соотношение прочности структурных элементов твердого сплава

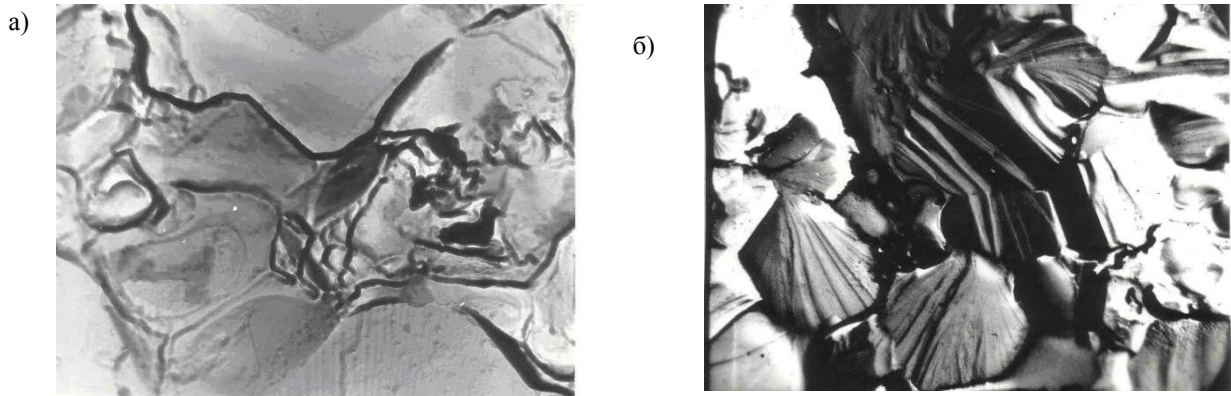


Рис. 3. Микрофотографии поверхности разрушения твердого сплава: а – ВК8; б – Т15К6 (x 9000)

В работах [1, 2] показано, что изнашивание твердых сплавов при низких скоростях сопровождается быстрым разрушением связки, раскалыванием и вырывом зерен карбидной фазы (рис. 4). Это в значительной степени обусловлено неоднородным распределением дислокаций в зернах карбидной фазы. Скопление дислокации (рис. 4, а) в локальных объемах зерен карбидной фазы вызывает их раскалывание (рис. 4, б). Установлено, что процесс изнашивания твердых сплавов при $V_{\text{опт}}$ (оптимальной скоростью резания) сопровождается наноструктурированием микрообъемов зерен карбидной фазы вследствие высоких контактных нагрузок и интенсивной пластической деформации поверхностных слоев инструмента.

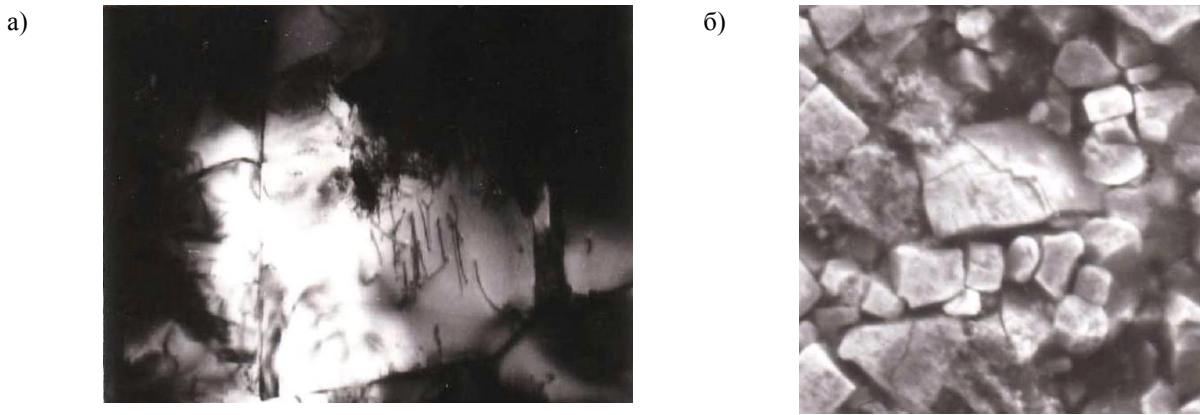


Рис. 4. Микрофотографии:

a - дислокационной структуры твердого сплава ТН-20 ($\times 14000$), $V=15$ м/мин; *б* – поверхности изнашивания твердого сплава ТН-20 ($\times 5000$), $V=15$ м/мин, $a=0,2$ мм

При $V_{\text{опт}}$ оптимальных скоростях резания зависимости $T-V$ (T – стойкость инструмента) в результате роста температуры и в целом изменения температурно-скоростных условий зерна карбидной фазы фрагментируются, образуется фрагментированная (ячеистая) дислокационная структура (рис. 5, *a*). Размеры фрагментов составляют $\sim 0,1$ мкм, а границы фрагментов $20\dots 30$ нм. В результате при трении карбидной фазы происходит преимущественное изнашивание зерен (рис. 5, *б*), размер частиц износа совпадает с размером фрагмента, т.е. около 100 нм.

В связи с этим, продукты износа зерен карбидной фазы следует рассматривать как наночастицы, которые под влиянием высоких температур и давлений в дальнейшем образуют ансамбли наночастиц, залегающие (рис. 5, *в*) в межзеренных пространствах, где удалена связка, способствуя образованию карбидного каркаса.

Следовательно, в процессе изнашивания при $V_{\text{опт}}$ реализуется механизм наноструктурирования зерен карбидной фазы с последующим образованием ансамбля наночастиц, который следует рассматривать как результат самоорганизации системы резания. Стойкость инструмента при этом резко возрастает, и зависимость $T-V$ является немонотонной [1, 2]. Дальнейшее увеличение скорости резания сопровождается разрушением связующей фазы (течением), замещением ее обрабатываемым материалом, что облегчает срез группы зерен карбидной фазы, и стойкость T инструмента снижается.

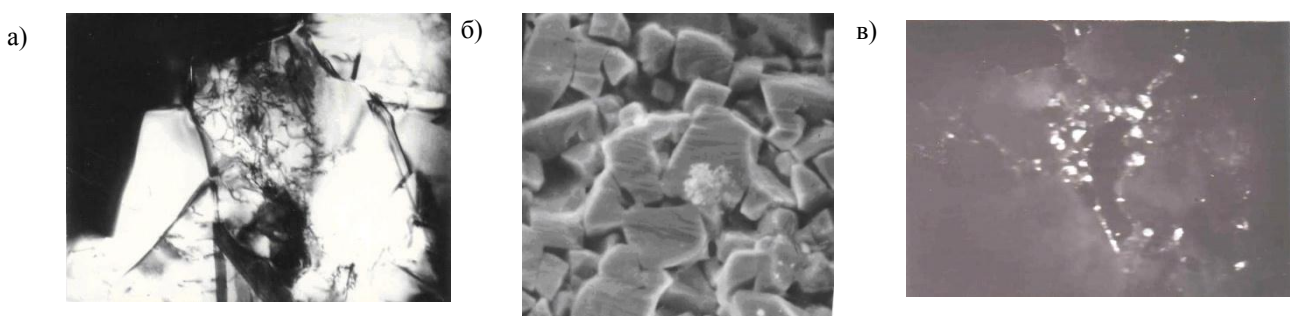


Рис. 5. Микрофотографии:

a – дислокационной структуры твердого сплава ТН-20 ($\times 14000$), $V=50$ м/мин; *б* – ($\times 5000$); *в* – ($\times 14000$) – поверхности изнашивания твердого сплава ТН-20, $V=50$ м/мин, $a=02$ мм

Возникновение новой структуры есть следствие самоорганизации [7]. Самоорганизация весьма разнообразна. Особое место занимает ее проявление в диссипативных (рассеивающих энергию) неравновесных средах. Формирование структур при необратимых процессах происходит при определенных условиях: главное из них – наличие качественного скачка при

достижении критических (пороговых) значений параметров порядка. Предпосылкой для его выполнения и формирования устойчивых диссипативных структур в открытых системах, обменивающихся энергией и веществом с внешней средой, является существование определенного соотношения между производством энтропии в самой системе и обменом энтропии со средой. Количественной характеристикой устойчивости новых диссипативных структур является D_F фрактальная размерность. Оценка D_F фрактальной размерности ансамбля наночастиц осуществлялась по соотношению [8]

$$m_{\text{ан.}} \cong d^{D_F},$$

где $m_{\text{ан.}}$ – масса ансамбля наночастиц; d – размер ансамбля.

Расчеты показывают, что D_F ансамбля наночастиц стремится к трем. Это свидетельствует о том, что ансамбль наночастиц является плотной объемной структурой, обладающей высокой устойчивостью.

Процессы наноструктурирования контактных поверхностей режущего инструмента выявлены и при использовании твердых сплавов с покрытием. Установлено, что низкая термостойкость покрытий, являющихся непрерывным карбидным каркасом, способствует их мгновенному растрескиванию (рис. 6, а) при резании. Затем происходит отрыв частиц покрытия (рис. 6, б, в). Отрыв мельчайших частиц (наночастиц) также сопровождается формообразованием их в ансамбли, которые залегают в местах вырыва зерен твердосплавной основы. Это обстоятельство повышает износостойкость инструмента на участке «нормального» износа.

В связи с этим, было проведено межатомное взаимодействия твердых тел при взаимном перемещении. Квантово-механические расчеты позволили оценить конкретную совместимость различных структурных составляющих инструментальных и обрабатываемых материалов, а также провести расчеты энергии адсорбции различных компонентов смазки. В результате предложены как механизмы межатомного взаимодействия при трении.

При моделировании межатомного взаимодействия необходимо учитывать положение и свойства каждого атома. Эта задача сейчас успешно решается путем квантово-механических расчетов из первых принципов (*ab initio*). Задача осложняется тем, что если в традиционных металлических материалах положение атомов в узлах кристаллической решетки определено, т.е. существует обычная повторяемость или простая трансляция элементарной ячейки, то в сложной пространственной структуре межатомного взаимодействия организацию атомов сложно задавать. Поэтому возникает вопрос: каковы принципы организации межатомных взаимодействий, последовательностей расположения атомов в пространственной структуре и ее форма для обеспечения заданных функциональных свойств?

Существует ряд методов оптимизации пространственной организации атомов при расчете минимума энергии межатомных связей в структуре. Однако в силу требований, т.е. необходимость точного определения выгодного, с точки зрения энергетического состояния, координат каждого атома, существующие программные продукты, оказываются недостаточно эффективными при первопринципном математическом моделировании структур достаточно большого порядка (10^2 - 10^3 атомов). Кроме того, в силу прогресса в вычислительной технике и распараллеливании вычислений, становится возможным на основе расчета множеств эффективных энергетических состояний (атомарных конфигураций с минимальной энергией) прогнозировать функциональные свойства структур. В связи с этим, предлагаются новые подходы к прогнозированию межатомного взаимодействия элементов структур и их дальнейшему эмпирическому обоснованию.

Ранее мы уже отмечали, что разработаны и численно реализованы эффективные методы моделирования сложных структур на основе теории функционала электронной плотности (ТФП, англ. DTF). Согласно ТФП, все электронные свойства системы, включая общую энергию, могут быть получены из электронной плотности (без знания волновых функций) атомов.

В программном коде программного комплекса *ab-initio* расчетов FHI (fhi96md, fhi98md) используется реализация ТФП на основе метода псевдопотенциала, позволяющего заменить часть базисных функций на некоторый эффективный потенциал. Такая замена про-

изводится автоматически при расчёте. От пользователя требуется выбрать псевдопотенциал требуемого типа. В работе используются псевдопотенциалами предлагаемыми по умолчанию в пакете FHI98pseudo.

Авторами ставилась цель: провести *ab-initio* исследовании общей энергии элемента и распределения его электронной плотности, но и исследовать его прочностные свойства и затем эмпирически убедиться в достоверности расчетов. В связи с этим, проведены расчеты при взаимодействии со структурными составляющими твердосплавной режущей пластинки из WC-Co (зерна карбида вольфрама в кобальтовой связке) при взаимодействии с алюминием, титаном и железом.

Теоретические расчеты также основаны на теории функционала электронной плотности (DFT) в приближении обобщенного градиента (GGA), совмещенного с методом псевдопотенциалов и базисе плоских волн. Для расчетов использовался программный пакет FHI98md, позволяющий оптимизировать атомную конфигурацию системы и находить ее полную энергию. Данный пакет представляет собой эффективный инструмент для проведения полноэнергетических расчетов многоатомных систем (молекулы, кристаллы, дефекты, поверхности) для широкого класса материалов.

Псевдопотенциалы для алюминия, кобальта и железа были сконструированы по схеме Труллера-Мартинса. *s*- и *p*- компоненты атомов находились по методике Хамана, а *d*- компонента – по схеме Труллера-Мартинса. В качестве базиса были выбраны плоские волны, энергия обрезания в расчетах составила 40 ридбергов. В качестве *k*-точки использовалась Γ -точка зоны Бриллюэна. Для вычисления обменной и корреляционной энергии использовалось градиентное приближение в форме, предложенной Педью и Вэнгом.

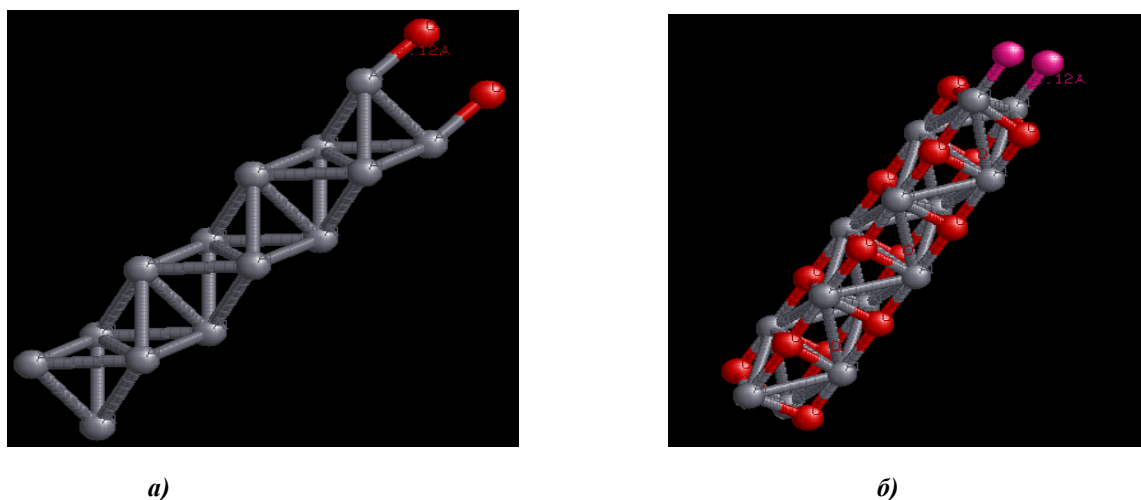


Рис. 6. Расчетные схемы взаимодействия :
a – элементарной ячейки кобальта с атомами алюминия;
б – карбида вольфрама с атомами алюминия

Псевдопотенциалы вычислялись с помощью пакета FHI98pp, они были испытаны на отсутствие ложных состояний (ghoststates) и проверены на способность воспроизвести основные решеточные характеристики объемных материалов (постоянную решетки и модуль упругости), получены распределения электронной плотности состояний и СТМ-изображения карбида вольфрама, кобальта, алюминия, титана и железа.

На рис. 6 приведены расчётные схемы для определения энергии межатомных взаимодействий CoAl и WCcAl.

В табл. 5 представлены результаты оценки межатомного взаимодействия различных систем.

Таблица 5

Расчетные значения общей энергии в системах

Система	WC-Al	Co-Al	Co - Fe	Co-Ti	WC-Ti
E, а.е.	-	-31,09	-32,6	-33,85	-

Наилучшие результаты при расчетах (табл. 5) достигнуты при поиске минимума энергии Co и Al, а также Co и Ti. Здесь обеспечивается наибольшая сходимость расчетов межатомных взаимодействий. При расчете взаимодействий карбида вольфрама с алюминием и титаном при переборе возможных пространственных атомарных конфигураций сходимости не достигнуто. Энергия взаимодействия в системе WC-Co составила 78,84 а.е. (атомных единиц). В табл. 6 приведены значения коэффициентов диффузии различных элементов в кобальт-связующую фазу твёрдого сплава WC-Co.

Таблица 6

Коэффициенты диффузии в системах

Система	Al→Co	Fe→Co	Ti→Co
Коэффициент диффузии, см ² /с	1,3	1,32	1,4

Таким образом, как и при расчете энергии межатомного взаимодействия (табл. 5), так и при расчете коэффициента диффузии (табл. 6) видно, что титан обладает как наибольшей энергией, так и наибольшим коэффициентом диффузии в кобальте.

В табл. 7 приведены расчёты энергии связи атомов Al-Ti и Al-Cr методом функционала электронной плотности. Там же приведены значения микротвёрдости покрытий, полученных при магнетронном напылении интерметаллидов – (AlTi)N и (AlCr)N.

Таблица 7

№ п/п	Система (интерметаллид)	Энергия связи (эВ)	Микротвёрдость, HV	Фрактальная раз- мерность интерме- таллида
1.	Al-Ti	15,6	4125	2,048
2.	Al-Cr	13,2	3931	2,042

Предложена модель образования рельефа пленок, формируемого при осаждении на поверхность потока атомов на основе роста структур из одиночных атомов, диффундирующих по поверхности. Причиной появления сложной фрактальной структуры пленки является образование устойчивых кластеров либо в результате флуктуационного образования зародышей критического размера, либо на примесных атомах, являющихся центрами зарождения кластеров. При высоких температурах возможен перенос атомов к более горячим элементам рельефа вследствие убывания энергии активации диффузии с ростом температуры. Это способствует образованию фрактальной структуры пленки. На более поздней стадии роста фрактальной пленки основным механизмом роста становится диффузионно ограниченная агрегация осаждаемых атомов.

Анализ результатов исследований (табл. 7) показывает, что энергия связи атомов в наносистемах (в интерметаллидах) коррелирует с их фрактальной размерностью, т.е. устойчивостью межатомных связей интерметаллидов, обеспечивая функциональные свойства (твёрдость) тугоплавких соединений.

На рис. 7 представлены микрофотографии, иллюстрирующие разрушения твёрдых сплавов с покрытием. Анализ показывает, что вначале происходит интенсивное трещинообразование покрытий. Это объясняется тем, что покрытие – это сплошной карбидный либо

нитридный каркас с низкой прочностью межзёренных границ. Трещины из покрытия прорастают в твёрдосплавную основу, либо расслаиваются на границе раздела «покрытие-подложка». Затем изнашивается и твёрдосплавная основа. Полученные результаты объясняют высокий износ инструмента при обработке титановых сплавов, причем после разрушения покрытия, изнашивается прежде всего кобальтовая связка.

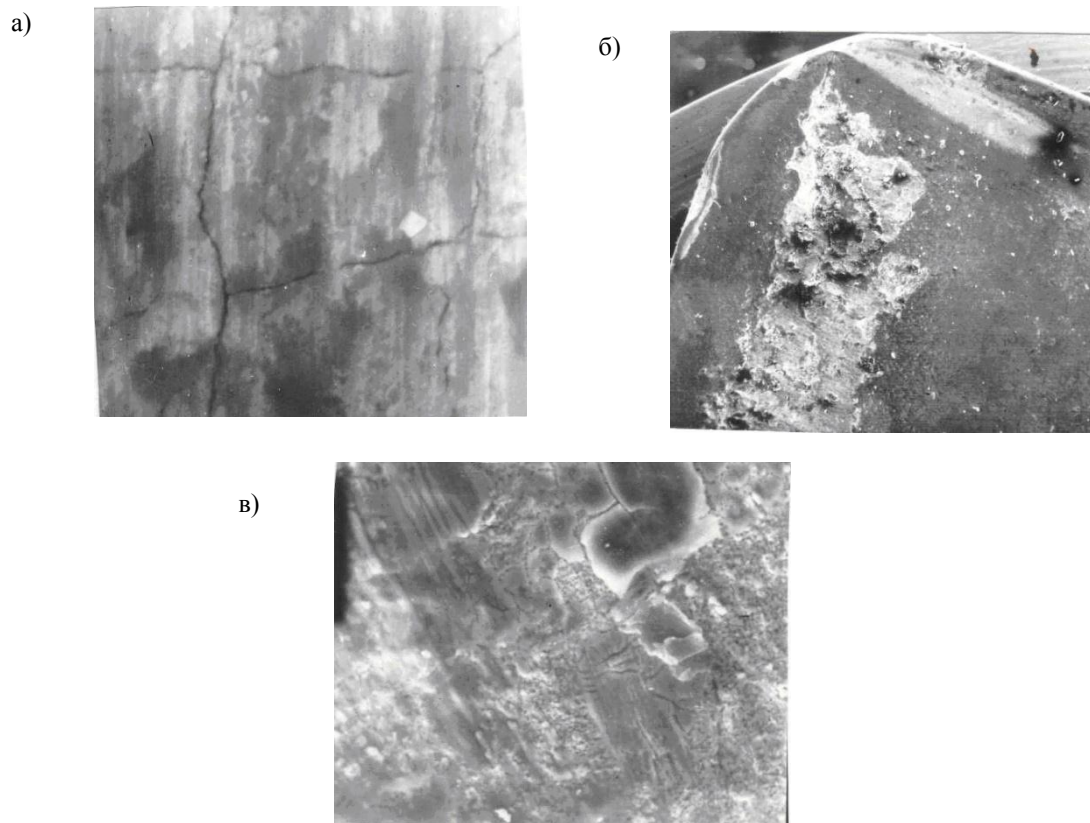


Рис. 7. Микрофотографии: *а* – микроразрушения покрытия $\text{TiC} + \text{TiCN} + \text{TiN}$ после резания 60 с ($\times 5000$), $V = 150$ м/мин; *б* – износа инструмента с покрытием $\text{Ti} - \text{TiCN} + \text{TiN}$ ($\times 100$), $V = 150$ м/мин, $a = 0,2$ мм; *в* – лунки износа твердосплавного инструмента с покрытием $\text{TiC} + \text{TiCN} + \text{TiN}$, время резания 10 мин, $V = 150$ м/мин, $a = 0,2$ мм

Проведенные исследования указывают на возможность управлять процессом наноструктурирования инструментальных материалов и получать новые структурные состояния с различной иерархией ансамблей наночастиц. При конструировании режущего инструмента на твердосплавной основе следует создавать многослойные покрытия. Нижние слои должны обеспечивать прочное сцепление покрытия с твердосплавной основой и вязко тормозить рост трещин в нее при растрескивании покрытия. Верхние слои должны обеспечивать низкую фрикционную совместимость с обрабатываемым материалом. В состав СОТС (смазочно-охлаждающих технологических средств) следует вводить наночастицы медьсодержащих соединений, помещенных в микрокапсулы. В зоне резания при разрушении микрокапсул наночастицы выполняют роль твердой смазки и, тем самым, повышают стойкость инструмента.

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю.Г.** Структура, прочность и износостойкость композиционных материалов / Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток.: Дальнаука, 1996. – 183 с.
2. **Кабалдин, Ю.Г.** Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания твердых сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 4. С. 127-131.
3. **Гусев, А.И.** Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / А.И. Гусев. – Екатеринбург. РАН. Уральское отделение. Институт химии твердого тела. 1998. – 200 с.

4. **Золотухин, И.Б.** Нанокристаллические металлические материалы // Сорский образовательный журнал. 1998. № 1. С. 103 – 106.
5. **Трефилов, В.И.** Дисперсные частицы в тугоплавких металлах / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев. – Киев.: Наукова думка, 1975. – 240 с.
6. **Новиков, Н.В.** О влиянии скорости нагружения и температуры на трещиностойкость твердых сплавов / Н.В. Новиков, Н.К. Коваленко, А.Л. Майстренко // Сверхтвердые материалы. 1984. № 5. С. 20–26.
7. **Пригожин, И.** Порядок из хаоса / И. Пригожин, И. Стрингер. – М.: Прогресс, 1986. – 429 с.
8. **Смирнов, В.Ф.** Физика фрактальных кластеров / В.Ф. Смирнов. – М.: Наука, 1998. – 256 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

J.G. Kabaldin¹, O.V.Kretinin¹, S.V.Sery², DA Shatagin¹

NANOSTRUCTURING CONTACT SURFACE CARBIDE TOOLS INCUTTING

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev¹,
Komsomolsk-on-Amur State Technical University²

Objective: To study the mechanism of destruction carbide coated.

Methodology: A complex study involving micro-electronic spectroscopy and quantum-mechanical calculations.

The results: nanostructuring process identified as carbide in their manufacture (sintering) and the deposition of wear-resistant coatings. The mechanism of destruction of the cutting tool is coated. Shows a fractal mechanism of deposition of coatings and coating damage by their cracking and separation of the coating.

Conclusions: are the principles of deposition of multilayer coatings with high resistance tion cracking and abrasion.

Key words: hard alloys, wear, nanostructured coatings.

УДК 621.017.11

Ю.Г. Кабалдин

КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан электронно-дислокационный механизм деформации и трещинообразования твердых тел при усталостном нагружении как результат динамического возбуждения атомов, образование волн смещения, перестройки их электронной структуры в локальных циклически деформируемых объемах кристаллической решетки, а также структурных изменений как в дефектной, так и электронной подсистемах с образованием атомных и дислокационных нанокластеров (квантовых систем) и последующего их согласованного (кооперативного) взаимодействия, вследствие нелокального обмена информацией между ними, с образованием микро-трещин.

Ключевые слова: усталостные испытания, нанокластеры, микротрещины.

В настоящее время существуют различные взгляды [1–7] на механизмы образования микротрещин при усталостном нагружении. В ряде работ [1–4, 6] образование микротрещин рассматривается с позиции теории синергетики [8–11] как неравновесный фазовый переход с образованием диссипативных структур в результате самоорганизации.

Согласно [6], дислокации являются линейными дефектами структуры материалов на наноуровне, определяющими на микроуровне при совместном взаимодействии с вакансиями, устойчивость системы к сдвигу в условиях повышенного в системе уровня запасенной упругой энергии. *При достижении в объеме критического уровня запасенной энергии происходит неравновесный фазовый переход с самоорганизацией в разреженной объемной среде фрактальных поверхностных объектов в виде субграниц.*

Представляет интерес выявление механизма зарождения микротрещин в зонах локализации деформации в результате структурных изменений как в дефектной, так и в электронной подсистеме. *В связи с этим, нами высказано предположение, что носителями деформации в кристаллической решетке при усталостных испытаниях могут являться не только дислокации или дисклинации, но и волны смещения, появляющиеся в ней из-за колебания атомов при растяжении либо сжатии цепочки атомов. В результате при усталостном нагружении в циклически деформируемых объемах, где происходит локализация деформации, протекают сложные структурные переходы, существенно определяющие как зарождение микротрещин, так и их перерастание в макротрещины.*

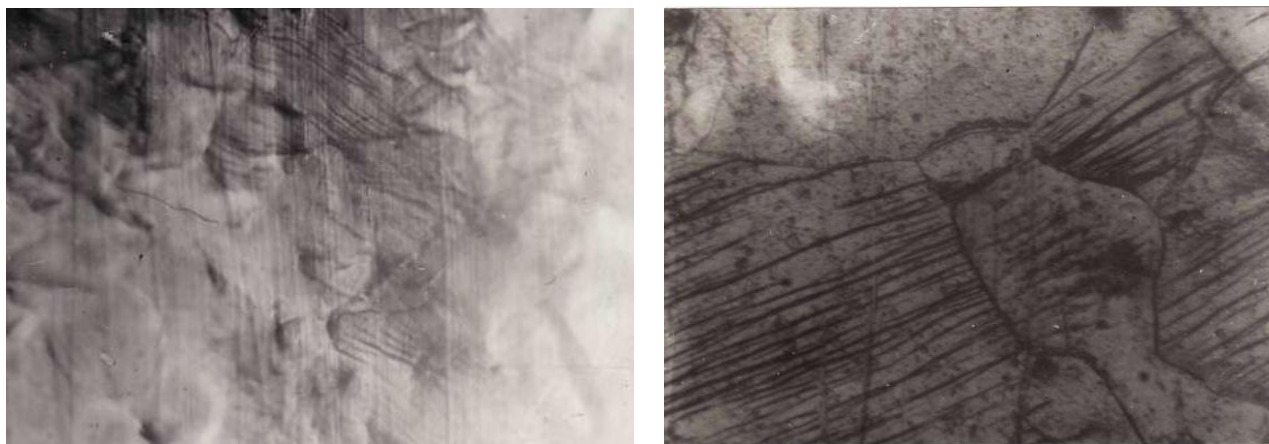
Исследования механизмов структурообразования при усталостном нагружении проводили на установке, описанной в работе [7]. В процессе испытаний проводили регистрацию сигналов акустической эмиссии (АЭ). Далее сигналы АЭ подвергались анализу с определением D_F – фрактальной размерности и H – информационной энтропии Шеннона [8].

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг выполнялись с использование просвечивающего электронного микроскопа JEM-7A. Исследовались образцы из стали 20 после их усталостного нагружения. Исследования повреждаемости поверхностных слоев в виде полос скольжения и микротрещин осуществлялись на растровом электронном микроскопе JSM-3U при различных циклах нагружения.

На рис. 1 представлены микрофотографии структурных изменений стали 20 на макро- и микроуровнях. На рис. 1, а видно, что на начальных стадиях циклического упрочнения материалов образуется специфический рельеф в виде впадин и выпуклостей.

По мере увеличения числа циклов нагружения в благоприятно ориентированных зернах феррита формируются линии скольжения, а затем устойчивые полосы скольжения и микротрещины (рис. 1, б). При электронно-микроскопическом исследовании установлено,

что циклическом нагружении образование дислокаций сосредоточено вблизи границ ферритных зерен. Их формирование происходит уже на стадии микротекучести. По мере возрастания числа циклов нагружения в ферритных зернах на стадии деформационного упрочнения образуется хаотическая, а затем ячеистая дислокационная структуры (рис. 2).



а)

б)

Рис. 1. Микрофотографии, иллюстрирующие процессы деформации при циклическом нагружении образцов из стали 20:

а – преимущественная деформация в приграничных объемах (x450);

б – устойчивые полосы скольжения (x450)

При анализе сигналов АЭ установлено [7], что с ростом числа циклов нагружения увеличивается как информационная энтропия, так и D_F – фрактальная размерность. Значения D_F находились в интервале от $D_F \geq 1$ до $D_F \leq 3$. Рост фрактальной размерности свидетельствует также о том, что в дефектной подсистеме происходит не только периодическая временная, но и периодическая пространственная организация дислокаций из-за роста степеней свободы.

На основе выполненных исследований разработан механизм структурообразования в дефектной подсистеме и возникновение коллективных эффектов. Его суть заключается в следующем. При образовании дислокации создается локальное внутреннее напряжение, и она излучает сигнал (он регистрируется как сигнал АЭ), т.е. передает определенную информацию, которая суммируется при образовании других дислокаций. В итоге формируется внутреннее механическое поле за счет сильного согласованного взаимодействия дислокаций, которое при их плотности $\rho \sim \rho_{\text{крит}}$, т.е. при критических параметрах в подсистеме обеспечивает коллективные эффекты.

В работе [9] указывается, что реакция системы дислокаций на внешнее воздействие определяется не столько индивидуальными свойствами дефекта, сколько солитонными свойствами ансамбля в целом. Иными словами, дислокацию можно представить как солитон, обладающего волновым пакетом с длиной волны λ . Солитонными свойствами, по-видимому, обладает каждая дислокация, однако солитонные свойства дислокации в большей степени проявляются при их кооперативном взаимодействии. Тем самым, волновой пакет является характеристикой как отдельной дислокации, так и их ансамбля. Поэтому энергию поступательного движения дислокации (ансамбля) можно описать солитонным уравнением.

Согласно теории синергетики [8, 10, 11], дефектная подсистема является термодинамически неустойчивой, нелинейной подсистемой, что обуславливает в ней периодическое хаотическое состояние и структурные переходы в более устойчивое состояние с нарушением симметрии и разрушением прежних когерентных структур. Способность дефектной подсистемы осуществлять структурные превращения свидетельствует о том, что она обладает памятью, т.е. вновь образованные структуры помнят о прежнем структурном состоянии.



Рис. 2. Электронная микрофотография, иллюстрирующая изменение дислокационной структуры в деформированных объемах образцов из стали 20: ячеистая дислокационная структура на стадии деформационного упрочнения (x14000)

Как уже отмечалось, существует ряд механизмов, объясняющих структурные перестройки в дефектной подсистеме [1–3, 5, 12] от хаотического распределения дислокаций к более организованному с образованием ячеек и фрагментов. Наделение ансамбля (группы) дислокаций волновыми свойствами позволяет предложить механизм структурной перестройки как результат самоорганизации в дефектной подсистеме, являющейся открытой нелинейной системой. Наличие волновых свойств обеспечивает как движение ансамбля дислокаций, так и перестройку дислокационных структур при внешнем воздействии. При совпадении частот групп дислокаций резонансы вызывают хаотическое состояние (волновой хаос) в дефектной подсистеме. Иными словами, различные дислокации обладают различными длинами волн и частотами. Поэтому хаотическое состояние в дефектной подсистеме, предшествующее структурной перестройке – самоорганизации, происходит при равенстве частот колебаний ансамблей дислокаций. Вероятность этого события возрастает при $\rho \approx \rho_{кр}$.

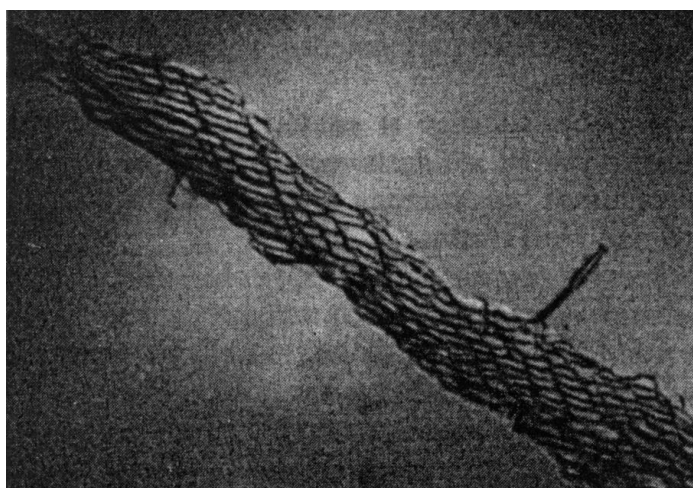


Рис. 3. Вихревая структура субграницы при деформации алюминия

Таким образом, модель поступательного движения ансамбля дислокаций как волнового пакета, обеспечивает в условиях резонансных явлений формирование субграниц и субзерен. Дислокации – это дефекты кристаллического строения, имеющие атомную структуру в их ядрах, поэтому волновой пакет не расплывается, т.е. не испытывает дисперсию.

Следовательно, [5], так и осуществлять перестройку групп дислокаций в организованные (упорядоченные) структуры – субграницы и субзерна – как самоподдерживающийся процесс. На рис. 3 приведена микрофотография структуры субграницы [13] при высокотемпературной деформации чистого алюминия ($T = 632\text{K}$, $\sigma = 2,8 \text{ НМ/м}^2$), где видно, что структура субграницы имеет винтовую упорядоченную укладку в виде отдельных групп дислокаций.

Образование сетки дислокаций при их перестройке может определяться диффузией точечных дефектов (массопереносом) [5, 7], возникающих в большом количестве в результате пересечения дислокаций при их движении. Однако, скорость такой диффузии при комнатной температуре мала. Такого рода диффузия должна быть особенно существенной при высоких плотностях дислокаций (т.е. тем в большей мере, чем большее упрочнение), что может быть причиной «переползания» взаимодействующих дислокаций, ускорения неконсервативного движения порогов, закручивания дислокаций, имеющих винтовую компоненту вектора Бюргерса, в геликоиды и т.д. Учитывая, что размер области, охваченной указанной дислокационной перестройкой, определяется размером субзерен L и, зная коэффициент линейной диффузии D , можно приближённо оценить характерное время их перестройки величиной $\sim L_s^2/D$.

По различным данным [5], для железа порядок $L_s \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$ см, а $D \approx 10^{-9}$ см²/с. Для среднего размера субзерна $L_s \approx 10^{-4}$ см находим, что $L_s^2/D \approx 10$ с. Полученное время t можно применять для ориентировочной оценки. Однако диффузионная модель формирования полигональной сетки [5, 9] не объясняет механизм образования субграниц с винтовой структурой (рис. 3).

По-видимому, согласованность действий групп дислокаций не может быть реализовано без обмена между ними информацией. Однако появление у дислокаций волнового характера движения указывает, что это свойство заложено самой Природой, квантовым происхождением Вселенной. Поэтому волновое движение дислокаций будет оказывать влияние не только на их стягивающее действие, но и на обмен информацией между ними. Можно полагать, что группы дислокаций, как квантовые системы, будут излучать энергию дискретно, что наблюдается при регистрации сигналов АЭ.

Таким образом, разработанная модель самоорганизации дислокаций в дефектной подсистеме основывается на определяющей роли волнового движения дислокаций в процессе структурообразования субграниц, а следовательно, и субзерен. Поэтому формирование субграниц следует рассматривать как квантовое явление, в котором большую роль играет квантовый (волновой) хаос, обусловленный резонансными явлениями. Следует также отметить, что размер границ (субграниц) ячеек составляет порядка $\sim 20 \dots 30$ нм (рис. 2). В связи с этим, структурные превращения в дефектной подсистеме можно классифицировать как наноструктурирование. Образование наноструктур в виде субграниц объясняет их повышенную сопротивляемость внешним нагрузкам [6]. Критерием их устойчивости может являться фазовое пространство состояний и фрактальная размерность.

Известно, что при усталостном нагружении пластически деформируется прежде всего поверхностный слой [3, 4]. В результате в циклически деформируемых локальных объемах формируются растягивающие и сжимающие напряжения, а также касательные напряжения. При этом формируется холмистый рельеф (рис. 1, а). Подобный рельеф, на наш взгляд, свидетельствует о формировании выпуклостей (холмов) за счет ротации структурных элементов как целого в зонах сдвиговой деформации, вызванный увеличением объема атомов при их возбуждении.

Атомный механизм деформации твердых тел рассмотрен в работе [18]. Согласно [18], изменения степени перекрытия электронных орбиталей (волновых функций электронов) происходит как при растяжении так и при сжатии цепочки атомов. Это означает [17] нарушение симметрии кристаллической решетки и уменьшение прочности межатомного взаимодействия и, как следствие, снижение её сдвиговой устойчивости.

Можно полагать, что атомы, находящиеся в локальных зонах циклического деформирования, где реализуются неравновесные структурно-фазовые переходы, образуют еди-

ную квантовую систему, которую можно рассматривать как нанокластер. Когерентное поведение атомов с образованием нового электронно-энергетического состояния в этой квантовой системе (кластере) следует изучать на основе принципов квантовой механики [19]. В связи с этим, в ней происходят смещение атомов, возрастание их амплитуды колебаний и рост энергии электронов, а следовательно, изменение степени перекрытия электронных орбиталей и изменение (увеличение) атомного объема, рост степеней свободы и образование новой электронной конфигурации атомов.

Известно [14], что атомы и электроны имеют дискретный спектр «возбужденных» состояний. Поэтому деформация кристаллической решетки будет периодической. В результате изменяется как информационное, так и энергетическое состояние этой квантовой системы, которое следует рассматривать как новое разрешенное структурное состояние [15] в кристаллической решетке.

Таким образом, при внешнем механическом нагружении исходный материал в результате структурно-фазовых переходов изменяет и квантовое состояние в зонах локализации деформации. Дислокации вызывают начальное «возбужденное» состояние атомов в кристаллической решетке. В электронной подсистеме возбуждение атомов обуславливают рост амплитуды их колебаний, образование волн смещения [20], усиливаемые электронами, и увеличение объема атомов за счёт их изменения их квантового состояния (ридберговское состояние). Это вызывает периодическую деформацию кристаллической решетки и обеспечивает дислокациям преодоление энергетического барьера Пайерсла-Набарро кооперативным (согласованным) движением. Поэтому при усталостном нагружении структурные переходы в кристалле реализуются как в дефектной подсистеме, так и в электронной.

С увеличением зоны растягивающих или сжимающих напряжений с ростом числа циклов нагружения будет увеличиваться и число атомов, вовлекаемых в кластер, устойчивость которого будет уменьшаться вследствие снижения прочности межатомного взаимодействия [19]. Согласно [19], прочность межатомного взаимодействия будут характеризовать спиновые квантовые числа, при этом спины электронов будет определять симметрию их волновых функций. При антипараллельных спинах завихренность вследствие суперпозиции спинов (локального вихря) оказывает стягивающее действие на электронные облака, т.е. на прочность межатомного взаимодействия.

Как указывалось ранее, дислокации являются линейными дефектами на наноуровне. Коллективное взаимодействие дислокаций – это результат наноструктурирования, поэтому группу дислокаций можно рассматривать также как нанокластер, т.е. как квантовую систему. В связи с этим, существующий дислокационный механизм деформации материалов [1–4] путем образования субграниц, ячеек (рис. 2) и фрагментов, по-видимому, будет не полным, поскольку в нем не учтён атомный механизм деформации твердых тел, взаимодействие дефектной и электронной подсистем.

Проведенный термодинамический и квантовый анализ структурного состояния деформируемой кристаллической решетки показывает, что при усталостном нагружении материалов происходит наноструктурирование основных носителей деформации. В связи с этим, нами разработан электронно-дислокационный (нанокластерный) механизм деформации твердых тел как результат динамического смещения атомов, образование волн смещения, перестройки их электронной структуры в локальных циклически деформируемых объемах кристаллической решетки, а также структурных изменений в дефектной подсистеме с образованием атомных и дислокационных нанокластеров (квантовых систем) и последующего их согласованного (кооперативного) взаимодействия при внешнем нагружении, вследствие обмена информацией между ними.

Таким образом, для реализации структурно-фазовых переходов в кристаллической решетке необходимы согласованные действия электронной и дефектной подсистем. Согласованность, в свою очередь, возможна только в результате обмена информацией между ними. Ранее указывалось [17], что электроны хранят информацию (память) об эволюции атома.

Высказано предположение, что информационный потенциал электрона хранится и передается при межатомном взаимодействии в виде волн де Бройля. Кроме того, наличие спина, т.е. собственного момента импульса электрона, обеспечивает ему свойство нелокальности, т.е. дальнедействующую связь с другими электронами во времени и в пространстве. Поэтому характер ориентации спинов будет сказываться на возможности электрона передавать информацию с высокой скоростью (мгновенно). Это волновое свойство электрона положено в основу квантовой телепортации [22]. Роль спиновых квантовых чисел, как указывалось ранее, является также определяющей при межатомном взаимодействии [19].

Следует отметить, что в условиях растягивающих или сжимающих напряжений, движение дислокаций, обладающих определенным зарядом, будет происходить по ослабленным межатомным связям в электрическом поле, создаваемом ядрами и внутренними электронами атомов, входящими в нанокластер (квантовую систему). Поэтому роль параметра порядка и информатора будет выполнять электрическое поле, вызывая образование ротационных структур в электронной и дефектной подсистеме, т.е. формирование электронных флуктуационных состояний в атомном кластере, и вихревых структур в виде субграниц (рис. 3).

Как электронные ансамбли, так и солитоны, как указывалось ранее, обладают информацией, т.е. памятью. Поэтому атомные и дислокационные наноструктуры могут обмениваться информацией, а следовательно действовать согласованно. Взаимосвязь электронной и дефектной подсистем подтверждается также линейной зависимостью плотности электронных состояний на уровне Ферми и энергии дефекта упаковки (э.д.у.) [5].

Следовательно, можно полагать, что новые электронные состояния, образующиеся при формировании атомного кластера, посредством обмена информацией, будет влиять на подвижность и пространственную организацию дислокаций в кристаллической решетке.

Как уже указывалось, в работе В.Е. Панина [15] высказано предположение, что в электронно-энергетическом спектре кристалла уже заложен генетический код, определяющий появление в нем новых разрешенных структурных состояний. По-видимому, генетический код служит тем алгоритмом, который задает последовательность расположения атомов в кристаллической решетке. Можно полагать, что электронно-энергетическое состояние атомного кластера будет определять плоскость низкоэнергетического скольжения, подвижность дислокационного кластера и механизм его структурной перестройки в дефектной подсистеме.

Центральным моментом при построении волнового механизма движения дислокаций является идея о механизме подкачки её энергией. В термодинамических неравновесных атомных системах, это связано с изменением (генерацией) волн, излучаемых атомами при возбуждении электронов прежде всего в электронной подсистеме ядер дислокаций, имеющей атомную структуру. Исходя из квантовых представлений, определена ν_δ - частота колебаний дислокаций: $E_\delta = h \nu_\delta$, или $\nu_\delta = \frac{E_\delta}{h}$, где E_δ – энергия дислокации, h – постоянная Планка.

Расчет ν_δ при $E_\delta = 5$ электронвольт, частота $\nu_\delta \sim 10^{13}$ с, т.е. находится в диапазоне гиперзвуковых волн, совпадающих с частотой волн смещения [20], излучаемых атомами. Иными словами, подкачка энергии движущейся дислокации определяется резонансными явлениями в квантовой системе. Такой подход объясняет наличие порогового значения плотности дислокаций при формировании субграниц.

Поэтому согласно нашей модели, решающим фактором в перестройке (самоорганизации) дислокаций является волновой (дискретный) характер движения дислокаций. Причем движущейся силой самоорганизации дислокаций в упорядоченные субструктуры, как указывали ранее, являются резонансы. В связи с этим, можно полагать, что вихревая упаковка структуры субграниц (рис. 3) обусловлена взаимодействием и наложением друг на друга групп дислокаций в ансамбле, имеющих различные частоты.

Ротационная укладка группы дислокаций в субграницах (рис. 3), на наш взгляд, обеспечивает рост и информационного содержания, поскольку субзёрна – это более организованные структуры. Поэтому согласованное движение групп дислокаций и структурные измене-

ния не могут быть реализованы без обмена между ними и другими дефектами информацией. Известно, что электроны обладают спином. Спин - проявление квантового характера развития микромира. Поэтому направление спинов в ядрах дислокаций будет оказывать не только стягивающее действие с закручиванием при коллективном взаимодействии дислокаций, но и влиять на обмен информацией между ними, т.е. между ядрами дислокаций по механизму квантовой телепортации (нелокальной далекодействующей связью).

Проведенный термодинамический и квантовый анализ позволил предложить обобщенную модель механизма зарождения микротрещин и их дискретного роста, при усталостном нагружении как результат последовательных, согласованных переходов на различных структурных уровнях. На микроуровне размножение дислокаций приводит к росту искажения кристаллической решетки и снижению ее сдвиговой устойчивости с образованием разорванных межатомных связей и полос локализации деформации. Переход хаотической дислокационной структуры в кристаллической решетке по мере роста плотности дислокации в ячеистую и полосовую как результат самоорганизации контролируется внутренним механическим полем, являющимся параметром порядка и информатором. Формирование наноструктур в виде субграниц и рост степени перекрытия электронных орбиталей повышают сдвиговую устойчивость кристаллической решетки движению вновь генерируемым дислокациям при дальнейшем росте деформации.

Однако образование устойчивых полос скольжения в зонах локализации деформации, по мере роста числа циклов усталостного нагружения, накопление здесь энтропии, разрушение (рассыпания) винтовых субграниц (рис. 3) под действием вновь образованных высокоэнергетических ансамблей дислокаций внутри субзерен и снижение устойчивости атомных кластеров, вследствие роста амплитуды колебаний атомов, возникают условия для перехода деформации на более высокий структурный (мезо-) уровень. Иными словами, накопленная деформация передается в смежные зерна либо в приграничную зону деформации, вызывая прорастание микротрещин в смежные зерна, либо они расслаиваются на межзеренных границах.

Таким образом, квантовый подход позволил также предложить механизм согласованного взаимодействия деформационных дефектов, образованных на микроуровне, с мезоуровнем, рассматривая их как единую квантовую систему со смешанным состоянием, впервые представленной Э. Шрёдингером [19]. Поэтому взаимодействие деформационных дефектов в этой смешанной квантовой системе при их переходе из зерна в зерно возможен, если потенциальная энергия нанокластера достаточна для преодоления границ зерен. Предложенный механизм подтверждается экспериментальными исследованиями. Современное состояние квантовой механики позволяет описать смешанное квантовое состояние системы математически.

Необходимо отметить, что ротационный характер движения структурных элементов в условиях сдвиговой деформации на мезоуровне самоподобно реализуется и на наноуровне (рис. 3) в виде ротационного характера образования субграниц из групп дислокаций, на наш взгляд, устойчивость структурных элементов при таком характере их формирования будет определяться, по-видимому, критическим углом их скручивания.

Следовательно, при циклическом нагружении металлов реализуется самоподобный согласованный вихревой механизм пластической деформации на различных структурных уровнях. Свойство самоподобного образования вихревых структур на различных масштабных уровнях (масштабная инвариантность) заложено самой Природой, квантовым характером образования Вселенной [14]. Это подтверждается тем, что вихревые структуры как инварианты мы наблюдаем как на мезоуровне (поворот зерен как целого), так и на наноуровне – путём вихревого характера образования субграниц.

Можно полагать, что наноуровень «программирует» характер движения структурных элементов при циклическом нагружении на различных структурных уровнях, что и обуславливает согласованное, самоподобное развитие вихревых мод деформации в условиях усталостного нагружения. Масштабная инвариантность, как и другие характеристики, по-

видимому, формируется в металлах уже на стадии кристаллизации. В ряде работ указывается, что атомы химических элементов в первичной коре Земли порождались вращающимися как целое. В связи с этим, физика планковских масштабов определяет плотность материала, темп его растяжения или сжатия при циклическом нагружении.

Таким образом, информационная модель самоподобного образования и движения структурных элементов на различных масштабных уровнях при циклическом нагружении позволяет объяснить механизмы согласованной передачи пластических сдвигов через границы зерен в деформируемом поликристалле (рис. 1, б) за счет обмена информацией. Для этого необходимо также формирование на границах зерен группы дислокаций, т.е. нанокластера. Иными словами, локальные структурные превращения распространяются в смежные зерна на наноуровне в виде деформационных дефектов – нанокластеров. При различии в квантовом состоянии структурных элементов и на поверхностях разделов часть информации теряется. В результате в зернах и на границах зерен будут образовываться микротрещины (рис. 1, б), и система переходит в новое более устойчивое состояние с образованием диссипативных структур – нано- и микротрещин. Этот период определяется степенью деформационного упрочнения и остаточного ресурса пластичности материала. Таков, на наш взгляд, масштабный переход от нано- к мезоуровню пластической деформации и далее к макроразрушению, согласно электронно-дислокационному (нанокластерному) подходу.

Важным направлением в материаловедении является упрочнение материалов (деталей) с целью уменьшения локализации деформации при циклическом нагружении, вызывающих образование микротрещин. В связи с этим, становятся понятными целенаправленные пути повышения сопротивляемости материалов разрушению при пластическом деформировании (экструзии, прокатке, ковке, воздействием ультразвуком и т.д.). В частности, за счет сообщения структуре материалов при упрочнении определенной информации, воздействуя на энергетическое состояние дефектной подсистемы, для перехода ее в более устойчивое состояние с образованием более прочных структурных элементов в виде наноразмерных субграниц.

Разработанная методика регистрации акустических сигналов при испытаниях с последующей оценкой его фрактальной размерности позволяет прогнозировать сопротивляемость усталостному зарождению трещин на ранней стадии. Фрактальная размерность характеризует информационное содержание структур, их организованность.

Библиографический список

1. **Конева, Н.А.** Накопление дефектов, запасенная упругая энергия и самоорганизация субструктуры. Н.А. Конева [и др.] // Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов: сб. Ленинград, 1987. С. 20-35.
2. **Конева, Н.А.** Дислокационные субструктуры и их трансформация при усталостном нагружении (обзор) / Н.А. Конева [и др.] // Известия вузов. Физика. 2002. № 3. С. 87-98.
3. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермед Инжиниринг, 2002. – 288 с.
4. **Терентьев, В.Ф.** Эволюция структуры при усталости металлов как результат самоорганизации диссипативных структур. Синергетика и усталостное разрушение металлов / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 1989.
5. **Трефилов, В.И.** Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирсов. – Киев: Наук, думка, 1975. – 315 с.
6. **Иванова, В.С.** Введение в междисциплинарное материаловедение / В.С. Иванова. – М.: УРСС. 2005. – 252 с.
7. **Кабалдин, Ю.Г.** Наноструктурирование металлических материалов при усталостном нагружении / Ю.Г. Кабалдин, С.Н. Муравьев, А.А. Бурков // Структурообразование и интеллектуальные технологии синтеза наноматериалов: сб. научных трудов. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ. 2007. Вып.8. С. 36-48.

8. **Хакен, Г.** Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам: [пер. с англ.] / Г. Хакен. – 2-е изд., доп. – М.: КомКнига. – 248 с.
9. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В.А. Лихачев [и др.]. – Киев: Наукова думка. 1989. – 320 с.
10. **Николис, Г.** Структурообразование в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
11. **Хакен, Г.** Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М.: Мир, 1985. – 411 с.
12. **Смирнов, Б.И.** Дислокационная структура и упрочнение кристаллов / Б.И. Смирнов. – Л.: Наука, 1981. – 236 с.
13. **Судзуки, Т.** Динамика дислокаций и пластичность: [пер. с япон.] / Т. Судзуки, Х. Ёсиага, С. Такеути. – М.: Мир, 1969. – 296 с.
14. **Окунь, П.Б.** Элементарное введение в физику элементарных частиц / П.Б. Окунь. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 136 с.
15. **Панин, В.Е.** Атомвакансное состояние в кристаллах / В.В. Панин [и др.] // Известия вузов. Физика. 1987. №1. С. 5-16.
16. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.В. Панин [и др.]. – Новосибирск: Наука. 1995. Т. 1. – 297 с.
17. **Кабалдин, Ю.Г.** Синергетика. Информационные модели самосборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии / Ю.Г. Кабалдин. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2007. – 186 с.
18. **Григорович, В.К.** Металлическая связь и структура металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1988. – 296 с.
19. **Степанов, Н.Ф.** Квантовая механика и квантовая химия / Н.Ф. Степанов. – М.: Мир. 2001. – 519 с.
20. **Кашенко, М.П.** Волновая модель роста мартенсита при γ - α превращении в сплавах на основе железа / М.П. Кашенко. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 224 с.
21. **Слядников, Е.Е.** Квантовая система псевдоспинов и структурный переход в деформируемом кристалле // Известия высших учебных заведений. Физика. 2003. №2. С. 3-12.
22. **Бауместер, Д.** Физика квантовой информации / Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цеймингер. – М.: Постмаркет. 2002. – 376 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

J.G. Kabaldin

QUANTUM MODEL OF CRACKING IN METAL MATERIALS WHEN FATIGUE LOADING

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alexeev

Objective: To develop a quantum model of cracking during fatigue testing.

Methodology: electron microscopic studies and quantum-mechanical calculations.

The results of research: is to develop quantum mechanism of nucleation of microcracks in solids, considering the local deformation in the area of the defect and electron subsystems as nanoclusters.

Conclusion: The developed model allows you to control the quantum processes that use material fracture during fatigue testing.

Key words: fatigue tests, nanoclusters, microcracks.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.53

В.А. Кольцов¹, В.Н. Лотов¹, А.Б. Победоносцев², А.В. Тимофеев²

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Рассматриваются вопросы построения системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива ядерного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Описываются особенности построения системы с учётом специфики технологического процесса, отличия от аналогичных систем управления, предлагаются новые принципы построения системы на современных программно-аппаратных средствах.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, перегрузка топлива, система управления, энергоблок, атомная электростанция.

Начиная с 2010 г., в РФ действует Федеральная целевая программа (ФЦП) «Ядерные энерготехнологии нового поколения», значительная часть которой посвящена развитию технологий реакторов на быстрых нейтронах и замкнутому ядерному топливному циклу (ЗЯТЦ). Кроме того, задача по формированию новой технологической платформы (НТП) атомной энергетики с реакторными установками на быстрых нейтронах включена в президентскую программу модернизации и технологического развития экономики страны.

В настоящее время Россия является мировым лидером в области промышленного освоения технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Только в России уже более 30 лет работает единственный в мире промышленный быстрый реактор БН-600 на 3-м энергоблоке Белоярской АЭС.

Французский аналог – проект «Суперфеникс» – выведен из опытной эксплуатации, а европейский быстрый реактор EFR находится на стадии разработки.

Одним из эксплуатационных режимов энергетических ядерных реакторов является режим перегрузки ядерного топлива.

В отличие от реакторов на тепловых нейтронах перегружаемые тепловыделяющие сборки реакторов на быстрых нейтронах имеют более высокое удельное энерговыделение. Процесс транспортирования топлива внутри реактора типа БН проходит под уровнем натрия.

Внутриреакторное перегрузочное оборудование является составной частью первого контура и обеспечивает его герметизацию, поэтому по окончании перегрузки оно из реактора не извлекается [1].

Такие жесткие условия работы и невозможность визуального контроля процесса перегрузки требуют обеспечения высокой надежности оборудования и полной автоматизации процесса перегрузки.

В состав оборудования перегрузки реакторной установки типа БН (рис.1) входят поворотные пробки, внутриреакторный механизм перегрузки, элеваторы, подковообразные

герметичные боксы с перегрузочными машинами, вне реакторные барабан-хранилище свежих сборок и барабан-хранилище отработавших сборок, заполненный натрием, перегрузочная машина свежих сборок и перегрузочная машина склада свежего топлива. Кроме того, в состав оборудования обращения со сборками активной зоны входят также перегрузочные контейнеры и комплекс оборудования для обращения со сборками активной зоны в водяном бассейне выдержки [5].

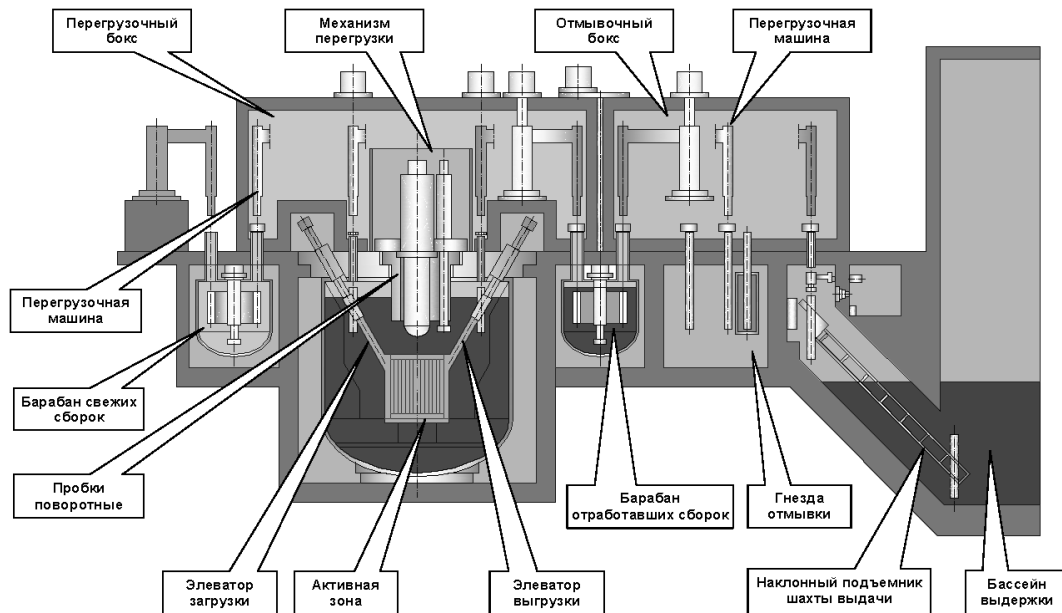


Рис. 1. Схема перегрузки реактора типа БН

Под сборками понимаются тепловыделяющие сборки (ТВС) активной зоны, зоны воспроизводства, сборки стальной и борной защиты и другие элементы активной зоны, имеющие конфигурацию ТВС.

Механизмы транспортно-технологического оборудования для обращения со сборками участвуют в выполнении следующих технологических процессов – это:

- доставка свежих сборок на склад свежего топлива (ССТ), размещение их в транспортных упаковочных комплектах (ТУК) на стеллажах временного хранения;
- перегрузка свежей сборки из ТУК в стапель – калибр, проведение контрольных операций со свежей сборкой в стапеле – калибре и загрузка ее во внутриобъектовый транспортно-упаковочный контейнер (ВТУК) в соответствии с требуемой для очередной перегрузки реактора картограммой загрузки барабана свежих сборок (БСС);
- загрузка свежих сборок из ВТУК механизмом передачи свежих сборок в БСС (в соответствии с требуемой картограммой загрузки БСС);
- перегрузка реактора в соответствии с программой (техническим решением) на конкретную перегрузку с проведением работ по отбору проб газа при контроле герметичности ТВС и наведения реакторной установки при контроле расхода натрия через ТВС;
- выгрузка отработавших сборок из барабана отработавших сборок (БОС), их отмывка и передача в приемный отсек бассейна выдержки (БВ);

При создании системы управления ТТО устанавливаются следующие основные требования (критерии):

- обеспечение совместно с транспортно-технологическим оборудованием и механизма-

ми ядерной и радиационной безопасности при проведении операций по перегрузке ядерного топлива;

- единичные отказы элементов в системе не должны приводить к потере ее работоспособности;
- структура системы управления и ее размещение должны учитывать размещение оборудования по помещениям АЭС;
- сигналы защит и блокировок должны иметь приоритет над командами управления;
- степень автоматизации функций управления и быстродействие системы должны обеспечивать выполнение операций по перегрузке топлива за минимально возможное время с учетом существующих ограничений;
- высокая точность позиционирования механизмов (отклонение от заданной координаты не должно превышать 3 мм на расстоянии до 10 м);
- эксплуатационный персонал должен иметь возможность централизованного контроля за процессом перегрузки;
- система должна предусматривать возможность обучения персонала в режиме «тренажер» или предусматривать отдельный тренажерный комплекс [2].

С целью обеспечения заданных требований по назначению возможны несколько вариантов построения системы. Для облегчения анализа все варианты построения системы представим в виде однотипной трёхуровневой иерархической структуры, нижний уровень которой образуют датчики (L – аналоговый датчик, K – дискретный датчик, Enc – датчик перемещения/поворота) и исполнительные механизмы ИМ (M – электродвигатель с тормозным устройством), средний уровень – подсистемы управления, построенные на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), аварийные расцепители и преобразователи, верхний уровень – пункты дистанционного управления (автоматизированные рабочие места операторов-технологов – АРМ), построенные на базе промышленных компьютеров.

Вариант 1 – структурная схема показана на рис. 2.

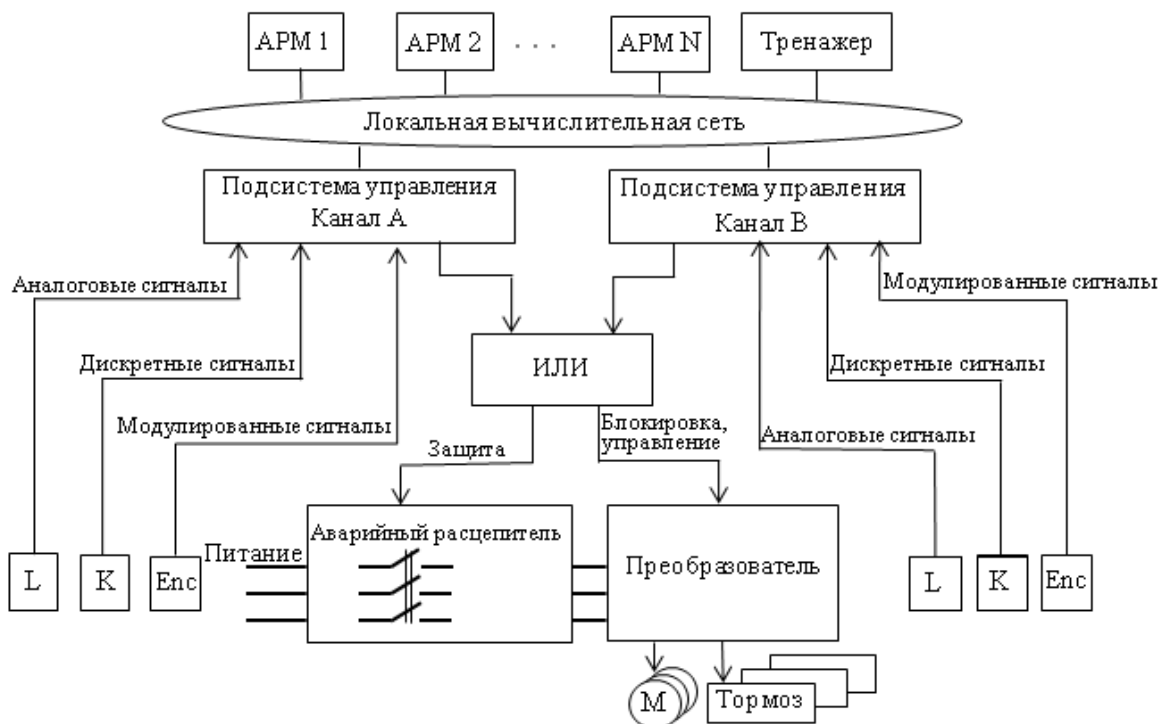


Рис. 2. Структурная схема системы управления (вариант 1):

АРМ – автоматизированное рабочее место;

K – дискретный датчик; L – аналоговый датчик; M – электродвигатель;

Enc – датчик перемещения/поворота

Данная структура имеет два канала контроля и управления: канал А и канал В, реализованные в одном ПЛК. Принятие решения по управлению (защита, технологическая блокировка, управляющее воздействие) осуществляется в блоке ИЛИ, построенном на релейной логике. Функции режима «тренажёр» выполняет отдельный компьютер с соответствующим программным обеспечением (ПО), подключенный к локальной вычислительной сети верхнего уровня. Аналогичная схема реализована в системах управления машинами перегрузочными (СУМП) для реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-600 в 70-х – 80-х годах XX века.

Вариант 2 – структурная схема показана на рис. 3.

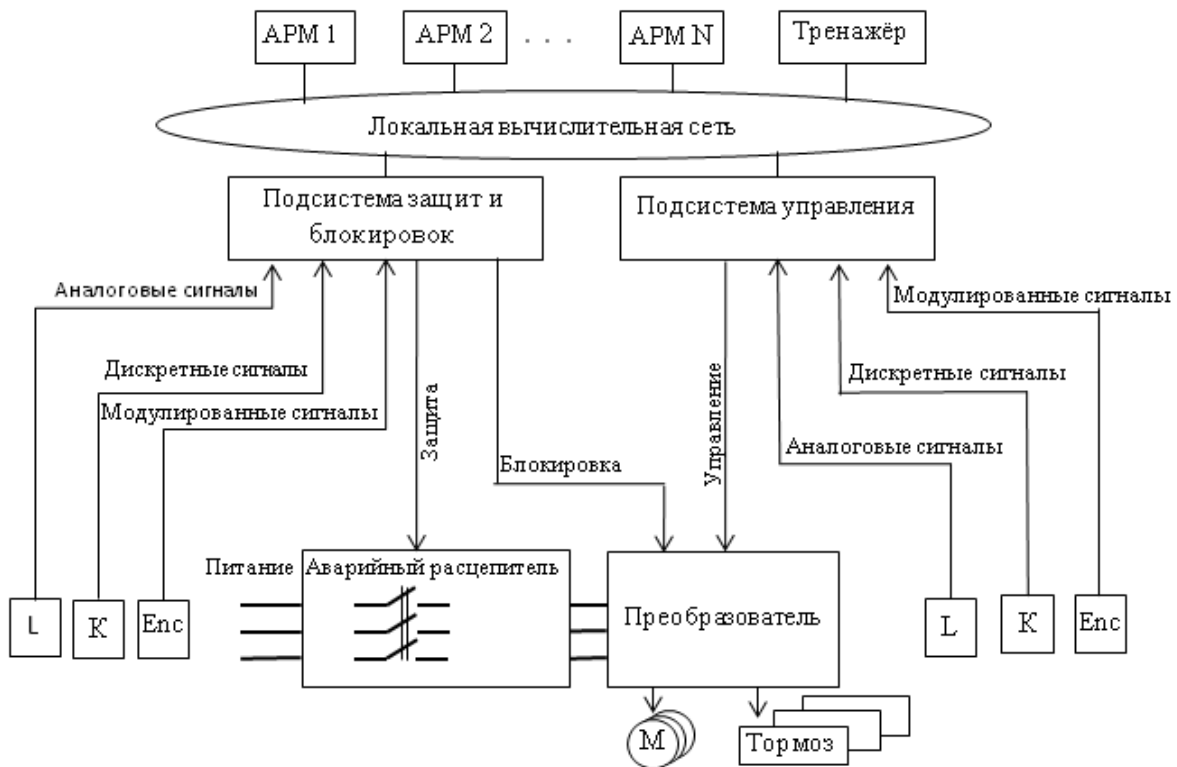


Рис. 3. Структурная схема системы управления (вариант 2):

АРМ – автоматизированное рабочее место;

К – дискретный датчик; L – аналоговый датчик; М – электродвигатель;

Enc - датчик перемещения/поворота

В данной структуре функции защит/блокировок и функции управления выделены в две независимые подсистемы и выполняются на различных контроллерах. Реализация режима «Тренажёр» аналогична предыдущей схеме. Преимуществом такой системы является повышение безопасности выполнения управляющих операций, недостатком – аппаратная избыточность и, как следствие, увеличение стоимости системы управления. Аналогичная схема применяется в модернизированных СУМП для реакторов ВВЭР-1000 в настоящее время [4].

Вариант 3 – структурная схема показана на рис. 4.

В данной структуре сочетаются принципы построения систем управления перегрузкой топлива ядерных реакторов по вариантам 1 и 2 с учётом развития современной программно-аппаратной базы систем промышленной автоматизации, позволяющей добиваться заданных требований по назначению и надёжности с минимальными затратами. В основу новой структуры заложен принцип распараллеливания вычислительных процессов, реализуемых в верхнем и среднем уровнях управления:

- процесс А – содержит основную управляющую программу перегрузки (последовательность законченных операций движения ИМ), формируемую из технологической

программы перегрузки (технического решения на конкретную перегрузку), математическую модель объекта управления (ММОУ), блок принятия решений, программу «Помощь» (советы оператору), программу «тренажёр». Процесс *A* выполняется в многозадачном режиме на верхнем уровне управления;

- процесс *B* – содержит программу опроса датчиков и выработки сигналов технологических защит, ограничений и блокировок (ТЗОБ) по технологическим параметрам;
- процесс *C* – содержит программу опроса датчиков и алгоритмы элементарных движений ИМ. Процессы *B* и *C* независимы и выполняются параллельно на среднем уровне управления.



Рис. 4. Структурная схема системы управления (вариант 3):
 АРМ – автоматизированное рабочее место; *K* – дискретный датчик;
L – аналоговый датчик; *M* – электродвигатель;
Enc – датчик перемещения/поворота

Данная схема предлагается для реализации в качестве основы при построении системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования (СКУ ТТО) перегрузки топлива для современных реакторов на быстрых нейтронах типа БН [3].

В качестве электроприводов механизмов оборудования обращения со сборками активной зоны предлагается использовать электродвигатели переменного тока в комплекте с преобразователями частоты, обеспечивающими плавное изменение скорости перемещения механизмов в широком диапазоне.

В качестве датчиков положения механизмов предлагается применять синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, индуктивные и герконовые датчики. Датчики различных типов позволяют создавать дублированные каналы контроля положения механизма.

Основу среднего уровня управления должны составлять устройства связи с объектом, построенные на базе ПЛК с циклом опроса не более 5 мс (реальное время процесса).

Верхний уровень будет представлять собой набор АРМ, выполняющих также функции серверов сбора информации и коммутаторов ЛВС.

Общий алгоритм функционирования системы контроля и управления транспортно-технологическим оборудованием (СКУ ТТО) представлен на рис. 5.

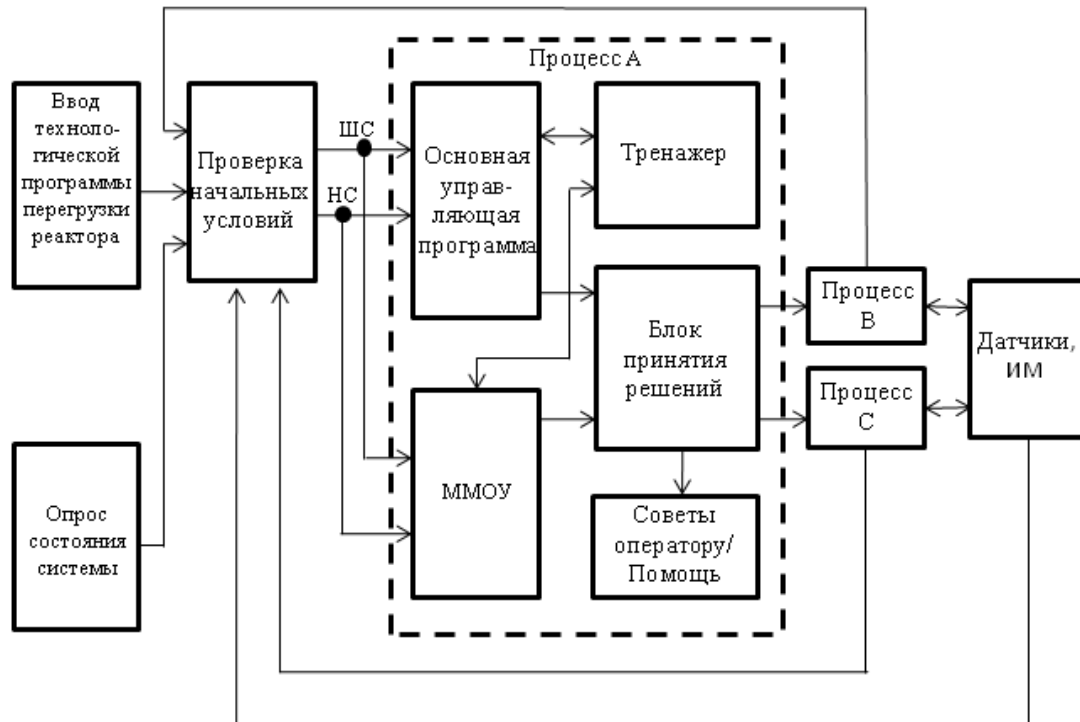


Рис. 5. Общий алгоритм функционирования СКУ ТТО:

ШС – штатная ситуация; НС – нештатная ситуация;

ММОУ – математическая модель объекта управления;

ИМ – исполнительные механизмы

Технологическая программа (решение) перегрузки реактора (загрузки, отмывки) готовится инженерами-физиками атомной электростанции (АЭС) с использованием специализированной системы подготовки данных и вводится в СКУ ТТО на электронном энергонезависимом носителе и/или по локальной вычислительной сети (ЛВС) АЭС.

Далее, после подачи оператором команды начала работы в автоматическом режиме, производится опрос состояния системы управления (самодиагностика), включающий в себя:

- наличие в ЛВС системы управления всех абонентов, участвующих в технологической программе (включая целостность линий связи);
- исправность абонентов ЛВС;
- целостность линий связи с датчиками и ИМ;
- контроль электропитания.

Обобщённая и детализированная информация о самодиагностике системы и её составных частей выводится на специализированные видеокдры АРМ оператора, а также формируется обобщённый сигнал (флаг) для разрешения/запрещения дальнейшего алгоритма функционирования системы.

Так как механизмы ТТО после последней перегрузки (контроля технического состояния, ремонта) могут находиться в состоянии, отличном от исходного (заранее определённого), а также после выполнения предшествующего шага алгоритма, то производится проверка

начальных условий выполнения первого или очередного шага технологического алгоритма, заключающаяся в опросе данных от процессов В и С. В случае отсутствия ТЗОБ и наличия детерминированного состояния ИМ вырабатывается признак штатной ситуации (ШС), начинается выполнение следующего шага алгоритма. В случае присутствия сигналов ТЗОБ и/или недетерминированного состояния ИМ (недоход/переход/несрабатывание) вырабатывается признак нештатной ситуации (НС), который затем анализируется основной управляющей программой и ММОУ параллельно (в режиме on-line).

ММОУ содержит в своём составе математические модели (ММ) всех технологических алгоритмов, а также ММ всех шагов технологических алгоритмов в виде поведенческих и расчётно-кинематических моделей ТОУ. В случае штатной ситуации «мнения» основной управляющей программы и ММОУ совпадают, и блок принятия решений вырабатывает адекватную команду на вход процесса С для последующей выработки управляющего воздействия на ИМ. В случае нештатной ситуации ММОУ формирует множество решений по приведению комплекса СКУ – ТОУ к штатной ситуации. Блок принятия решений оптимизирует решения по критериям безопасности с учётом ТЗОБ, возможных степеней свободы ИМ, минимизации времени выполнения операций и другими и переводит СКУ из автоматического в интерактивный режим. При этом ММОУ и блок принятия решений передают на АРМ оператора данные для программы «Советы оператору/помощь». Оператор в пошаговом автоматизированном режиме принимает окончательные решения по выводу комплекса в штатное состояние (в случае такой возможности).

В случае невозможности выполнения операций в автоматизированном режиме оператор принимает решение о переходе на управление с местных пультов управления и/или на ручное управление ИМ с помощью механического привода (без использования электропривода). При этом при любом способе управления СКУ через процессы В и С отслеживает состояния ИМ, и при обнаружении детерминированного состояния ИМ вырабатывает признак ШС, необходимый для перевода СКУ в автоматический режим для продолжения выполнения технологического алгоритма.

Как правило, перегрузка топлива для реакторов типа БН занимает в среднем 500 ч и осуществляется два раза в год. В остальное время СКУ ТТО находится в режиме ожидания, в котором осуществляется мониторинг состояния ИМ и возможно проведение операций, не связанных непосредственно с перегрузкой топлива активной зоны реактора (работы на ССТ, БВ и ХТРО).

Таким образом, время между перегрузками можно использовать для обучения сменных операторов работам по перегрузке топлива на штатных АРМ из состава СКУ ТТО (режим «тренажёр»). В данном режиме участвуют функциональные блоки алгоритма: «ввод технологической программы перегрузки», «основная управляющая программа», ММОУ, «блок принятия решений», «советы оператору/помощь» – без выдачи управляющих воздействий в процессы В и С. При этом динамическая имитация датчиков производится с помощью ММОУ. Режим «тренажёр» позволяет создавать типовые штатные и нештатные ситуации и является обязательным инструментом для сдачи экзаменов и допуска персонала к работам на роботизированном комплексе СКУ – ТОУ.

Выполнение требований (критериев) к созданию СКУ ТТО обеспечивается:

- за счёт рационального распределения функций между аппаратным и программным обеспечением с необходимым резервированием датчиков, линий связи, устройств и процессов;
- наличия математической модели ТОУ, позволяющей осуществлять приоритетное управление в штатных и аварийных ситуациях при всех возможных режимах управления ТТО (автоматическом, автоматизированном, дистанционном, ручном) с минимизацией времени выполнения технологических операций;
- ведения единой информационной базы данных, позволяющей, в том числе, идентифицировать местонахождение и параметры ТВС в любой момент времени;

- использования развитой системы диагностики, режима «помощь оператору» и режима «тренажёр» на штатных программно-аппаратных средствах.

Предлагаемые решения по структуре комплекса технических средств и организации вычислительного процесса в системе управления ТТО для реактора типа БН позволяют создать систему на передовом техническом уровне, полностью удовлетворяющую основным критериям (требованиям), предъявляемым к системам управления и контроля аналогичного назначения.

Библиографический список

1. **Дементьев, Б.А.** Ядерные энергетические реакторы / Б.А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 349 с.
2. **Юркевич, Г.П.** Системы управления энергетическими реакторами / под ред. академика РАН Н.С. Хлопкина. – М.: Издательство ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
3. **Кольцов, В.А.** Принципы построения системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива ядерного реактора / В.А. Кольцов, В.Н. Лотов, А.Б. Победоносцев, А.В. Тимофеев // XVII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2011 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2011. С. 170.
4. **Жильников, Д.В.** Создание роботизированных комплексов для перегрузки ядерного топлива на АЭС с ВВЭР / Д.В. Жильников, С.М. Ефремов, М.Э. Пинчук, С.А. Марченко, А.М. Кобелев, В.В. Коробкин // V Международный научно-промышленный форум «Ярмарка атомного машиностроения» / Конференция «Проектирование в XXI веке» / ОАО «НИАЭП». – Нижний Новгород, 2010. С. 47–54.
5. **Тимофеев, А.В.** Опыт создания и совершенствования систем перегрузки быстрых реакторов в России / А.В. Тимофеев, М.А. Любимов // Техническая встреча по системам перегрузки быстрых реакторов в Калпаккаме (Индия), 2008.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

V.A. Koltsov¹, V.N. Lotov¹, A.B. Pobedonostsev², A.V. Timofeev²

AUTOMATION OF REFUELING PROCEDURE OF FAST-NEUTRON REACTOR

Measuring system research institute n. a. Yu.Ye. Sedakov, Nizhny Novgorod¹,
Joint stock company «OKBM n.a Afrikantov»²

The subject of this article is consideration of building control systems and control mechanisms of transport and technological refueling equipment for nuclear fast-neutron reactor. The purpose is to analyze experience of creation such control systems for thermal and fast-neutron reactors and to create recommendations for the building of the modern software and hardware.

The methodology of this paper is a structural and functional analysis, aimed at optimizing solutions for the specified requirements for the control system.

The paper presents a comparative analysis of the structural patterns of building management systems for VVER-440 and VVER-1000, BN-600. The solutions for the regime "Simulator" using a mathematical model of controlled object are described.

Nowadays, the results are used to create the control system of refueling of the reactor for Unit-4 of Beloyarsk nuclear power station.

The proposed solutions allow creation a control system of robotic complex of overloading nuclear fuel for fast-neutron reactor, satisfying all requirements specific to the process associated with nuclear and radiation safety.

Key words: fast-neutron reactor, refueling, control system, power unit, nuclear power plant.

УДК 621.37.029.6

В.В. Бирюков, В.А. Грачев

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВОЗБУЖДЕНИИ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен расчет приемной щелевой антенны как линии передачи, возбуждаемой распределенными источниками. Используемый метод расчета характеризуется краткостью, простотой понимания и легкостью в использовании (не требует решения громоздкой краевой электродинамической задачи). Приведены полученные зависимости от угла падения плоской электромагнитной волны, ее частоты и поляризации.

Экспериментально исследованы частотные свойства и диаграммы направленности щелевых антенн рассмотренных конфигураций. Описана схема экспериментальной установки. Представлены подробные результаты эксперимента.

Проведено сравнение результатов измерений и результатов расчета и численного моделирования.

Ключевые слова: коэффициент прохождения, щелевая антенна, диаграмма направленности, поляризация.

Введение

В связи с возросшим в настоящее время интересом ученых к космическому (в частности, к реликтовому) излучению радиочастотного диапазона, необходимо разрабатывать сверхвысокочувствительную аппаратуру, способную принимать это излучение с минимумом искажений его характеристик. Одним из наиболее важных элементов таких систем является приемная антенна либо антенная решетка. В качестве основных типов антенн применяются дипольные и щелевые антенны, однако предпочтение отдают все же последней, вследствие более высоких поляризационных характеристик [1], [2].

Обычно расчет характеристик щелевой антенны основывается на применении принципа перестановочной двойственности, т.е. сводится к решению аналогичной задачи, но для симметричного электрического вибратора [3]. Рассчитываются характеристики передающей антенны, которые на основании принципа взаимности приписываются рассматриваемой приемной антенне. В настоящей работе предлагается простая методика непосредственного расчета характеристик приемной щелевой антенны, приводится сравнение с известными теоретическими результатами и результатами эксперимента.

Теоретическая часть

Приемную планарную щелевую антенну (ЩА) можно рассматривать как отрезок щелевой линии, расположенной на слое диэлектрика конечной толщины и возбуждаемой сторонними электрическими и магнитными полями. В приближении телеграфных уравнений это означает введение в эквивалентную схему линии распределенных источников тока и напряжения, определяемых амплитудами электрического и магнитного полей падающей на антенну волны с учетом коэффициента прохождения сквозь диэлектрический слой [4].

Таким образом, задачу расчета частотных и поляризационных характеристик планарной ЩА, а также определения ее диаграммы направленности можно разбить на несколько этапов:

- определение коэффициента прохождения электромагнитных волн различной поляризации сквозь плоско-параллельную диэлектрическую пластинку (ППДП) конечной толщины, которая является подложкой планарной ЩА;
- исследование зависимостей коэффициента прохождения сквозь ППДП от вида поляризации волны, ее угла падения и толщины ППДП;

- составление дифференциального уравнения для отрезка щелевой линии, возбуждаемой распределенными источниками. Нахождение и анализ его решения, то есть определение влияния параметров щелевой линии (длины линии по отношению к длине волны падающего излучения, а также вида поляризации этого излучения) на свойства антенны в целом.

При рассмотрении возбуждения линии передачи внешним магнитным полем будем считать, что на некотором участке линии существует однородный в пространстве и переменный во времени магнитный поток, как показано на рис. 1, а. На основании закона электромагнитной индукции для контура 1–2–3–4–1 справедливо выражение

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Интегралы по сторонам контура 2–3 и 4–1 равны нулю, так как силовые линии электрического поля перпендикулярны проводникам. Учитывая связь напряжения с напряженностью электрического поля

$$U_{ab} = \int_a^b \vec{E} d\vec{l},$$

можно записать для э.д.с. электромагнитной индукции

$$U_{34} - U_{21} = E.$$

Это соотношение соответствует эквивалентной схеме с включенным последовательно источником напряжения.

Если в месте расположения линии передачи существует внешнее переменное во времени электрическое поле, то ему соответствует ток смещения, плотность которого определяется выражением

$$\vec{J}_{см} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Если внешние источники создали между проводниками линии ток, то это означает наличие распределенных источников тока с некоторой линейной плотностью. Таким образом, эквивалентная схема бесконечно малого участка линии принимает вид, показанный на рис. 1, б.

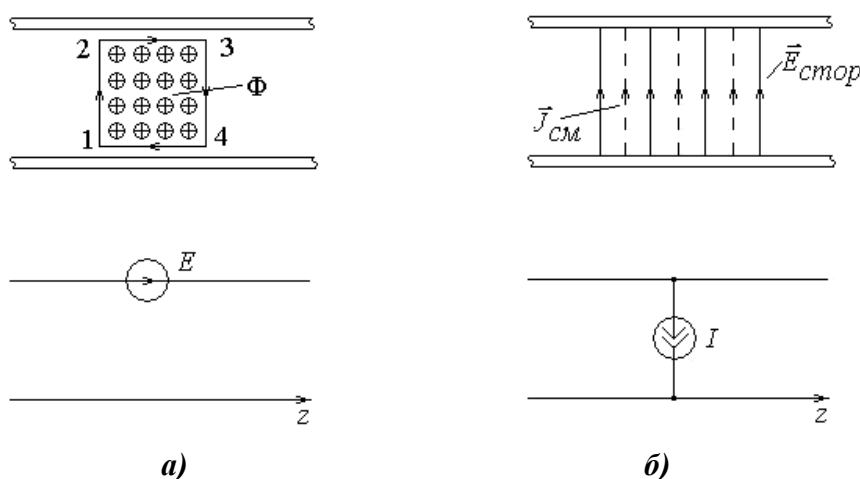


Рис. 1. Возбуждение линии внешними:
а – магнитным; б – электрическим полями

В случае падения на линию передачи плоской электромагнитной волны ее электрическое и магнитное поля играют роль внешних распределенных источников, возбуждающих в линии волны тока и напряжения. Обозначив погонные значения соответствующих источни-

ков тока и напряжения $I_{\text{внеш}}^{\text{пор}}(z)$ и $U_{\text{внеш}}^{\text{пор}}(z)$ соответственно, получим систему телеграфных уравнений, описывающих линию передачи, находящуюся под внешним воздействием:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dz} = -Z_1 \dot{I}(z) + \dot{U}_{\text{внеш}}^{\text{пор}}(z) \\ \frac{d\dot{I}}{dz} = -Y_1 \dot{U}(z) + \dot{I}_{\text{внеш}}^{\text{пор}}(z). \end{cases}$$

Дифференцируя оба уравнения по z и объединяя их, получаем неоднородные уравнения Гельмгольца относительно лишь одной из неизвестных величин – тока или напряжения:

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz^2} - \gamma^2 \dot{U} = -Z_1 \dot{I}_{\text{внеш}}^{\text{пор}} + \frac{d\dot{U}_{\text{внеш}}^{\text{пор}}}{dz} = -F(z), \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dz^2} - \gamma^2 \dot{I} = -Y_1 \dot{U}_{\text{внеш}}^{\text{пор}} + \frac{d\dot{I}_{\text{внеш}}^{\text{пор}}}{dz},$$

где Z_1, Y_1 – погонные сопротивление и проводимость линии; γ – комплексный коэффициент распространения волны в линии, заглавными буквами обозначены комплексные амплитуды соответствующих величин [5].

Так как щелевая антенна представляет собой закороченный с обоих концов отрезок щелевой линии, возбуждаемый полем падающей электромагнитной волны, граничными условиями являются нулевые значения комплексных амплитуд напряжения на концах линии:

$$\dot{U}(0) = 0, \quad \dot{U}(l) = 0,$$

где l – длина линии передачи.

Рассмотрим уравнение Гельмгольца (1). Поскольку функция $F(z)$ определяется значениями напряженностей электрического и магнитного полей в падающей плоской электромагнитной волне, ее можно представить в виде

$$F(z) = F_0(\theta, \alpha) e^{j \frac{2\pi}{\lambda_0} z \sin \theta},$$

где θ, α – углы падения волны в азимутальной и меридиональной плоскостях, а экспоненциальный множитель описывает изменение фазы эквивалентных источников вдоль линии.

Решение неоднородного уравнения (1) ищем с помощью метода Лагранжа как сумму двух функций, одна из которых является решением однородного уравнения с ненулевыми граничными условиями, другая – решением неоднородного уравнения с нулевыми граничными условиями. В результате получаем распределение комплексной амплитуды напряжения вдоль линии

$$\dot{U}(z) = F_0 \left\{ \frac{e^{j\xi z}}{\xi^2 + \gamma^2} + \text{sh } \gamma z \frac{\text{ch } \gamma l - e^{j\xi l}}{(\xi^2 + \gamma^2) \text{sh } \gamma l} - \frac{\text{ch } \gamma z}{\xi^2 + \gamma^2} \right\}, \quad (2)$$

где $\xi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta$.

В случае нормального падения волны S -поляризации на линию длиной $\lambda/2$ распределение напряжения вдоль линии представляет собой колоколообразную зависимость с максимумом при z равном половине длине щели и нулями по краям щели. Распределения реальной и мнимой частей комплексной амплитуды напряжения имеют аналогичный вид, однако по абсолютной величине они различаются в три раза. Вещественная часть превалирует над мнимой.

Зависимость амплитуды напряжения в центре линии от длины линии имеет ярко выраженный резонансный характер, при этом максимальное значение напряжения достигается для полуволновой щели. Амплитуда этого максимума сильно зависит от величины согласования между щелью и нагрузкой (съемником сигнала) подключенной к ней. При отношении

l/λ находящемся в пределах от 0,65 до 1,45 значение напряжения, снимаемое со ЩА, практически постоянно и составляет порядка 0,7 от максимальной величины. При дальнейшем увеличении отношения l/λ величина напряжения, снимаемого со ЩА, монотонно уменьшается.

Для расчета диаграмм направленности необходимо найти и подставить в (2) выражение для функции $F_0(\theta, \alpha)$. На рис. 2 изображены случаи падения на щель под произвольными углами волн двух различных поляризаций. Угол θ отсчитывается от плоскости XOY , угол α - от плоскости XOZ .

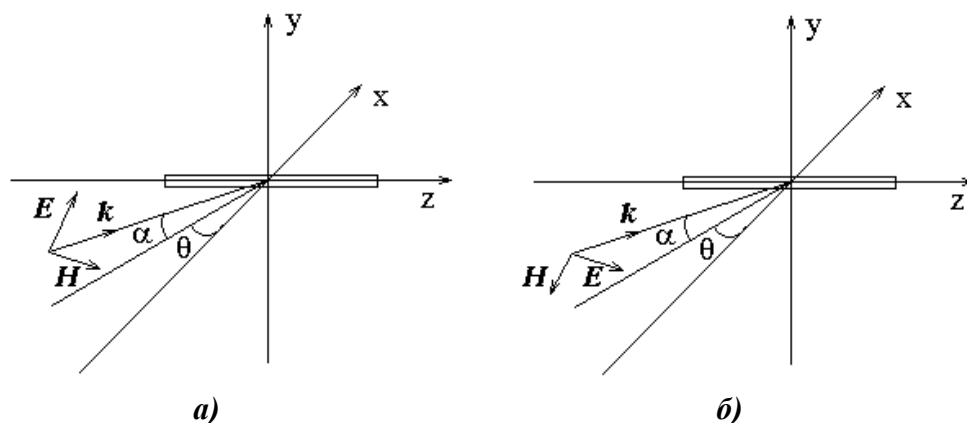


Рис. 2. Падение волн различной поляризации на щель:
а – S-поляризации ; б – P-поляризации

Стоящие в правой части уравнений Гельмгольца погонные источники тока и напряжения связаны с компонентами падающей волны следующим образом:

$$I_{\text{внеш}}^{\text{пог}} = j\epsilon_0 \omega d_{\text{э}} E_y, \quad U_{\text{внеш}}^{\text{пог}} = j\omega \mu_0 W H_x,$$

где $d_{\text{э}}$ – эквивалентная толщина линии, определяемая степенью локализации собственного поля щелевой линии.

В случае падения волны S-поляризации значения компонент поля равны

$$E_x = E \sin \alpha \cos \theta, \quad E_y = E \cos \alpha, \quad E_z = E \sin \alpha \sin \theta, \\ H_x = -H \sin \theta, \quad H_y = 0, \quad H_z = H \cos \theta.$$

В случае P-поляризации:

$$E_x = -E \sin \theta, \quad E_y = 0, \quad E_z = E \cos \theta, \\ H_x = -H \sin \alpha \cos \theta, \quad H_y = -H \cos \alpha, \quad H_z = -H \sin \alpha \sin \theta.$$

Таким образом, функция $F_0(\theta, \alpha)$ для S- и P-поляризации падающей волны имеет вид

$$F_0^{\perp}(\theta, \alpha) = \omega E \left[j\epsilon_0 d_{\text{э}} Z_1 \cos \alpha - \mu_0 W \frac{k_0}{Z_0} \sin^2 \theta \right] \cos \alpha \cos \theta, \quad (3)$$

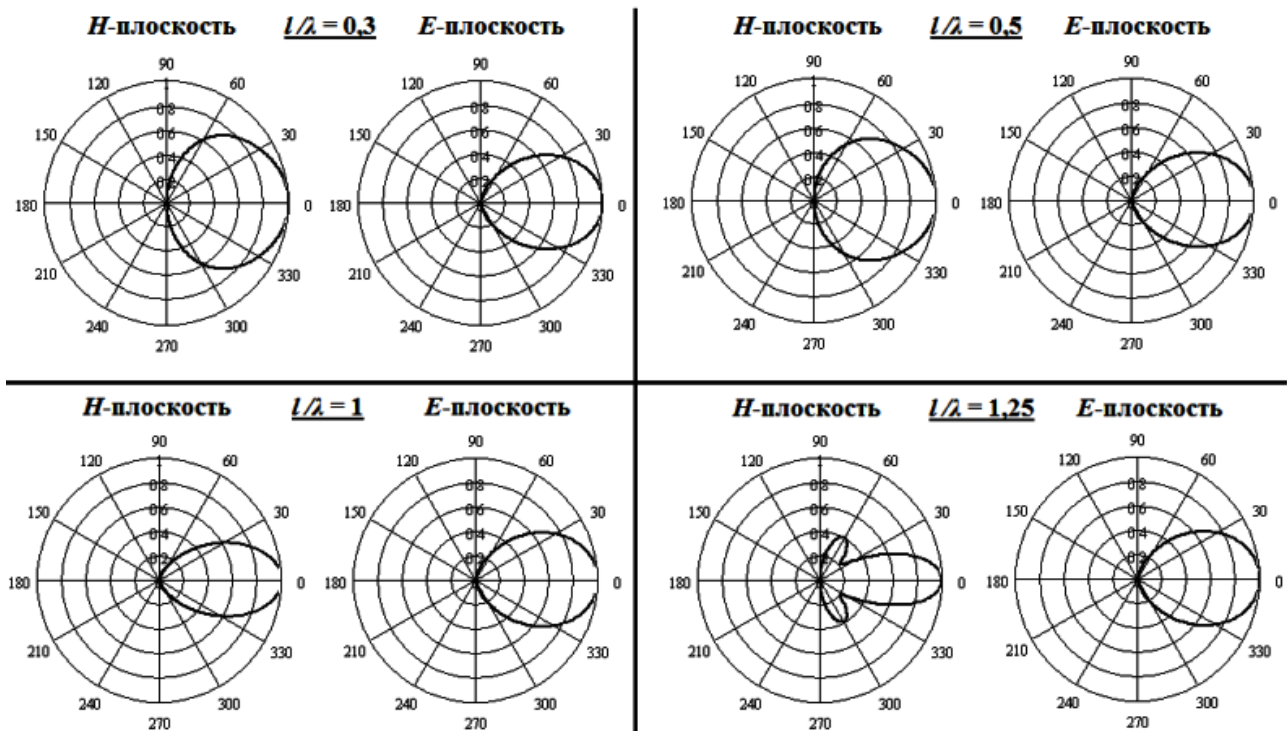
$$F_0^{\parallel}(\theta, \alpha) = \omega E \left[-\mu_0 W \frac{k_0}{Z_0} \sin \alpha \cos \theta \sin \theta \right] \cos \alpha \cos \theta. \quad (4)$$

Следовательно, подставляя выражения (3) и (4) в выражение (2) при фиксированном значении $z = l/2$, что эквивалентно подключению съемника по центру щели, можно рассчитать диаграммы направленности щелевой антенны. Рассчитанные таким образом нормированные диаграммы направленности для волн S- и P-поляризации при различных параметрах щелевой антенны представлены на рис. 3.

В рамках данной модели в случае нормального падения волны P-поляризации колебания в щелевой антенне не возбуждаются. Однако поворот антенны в любой плоскости при-

водит к резкому нарастанию амплитуды колебаний, достигающей максимального значения при углах порядка $30^\circ - 40^\circ$.

S-поляризация:



P-поляризация:

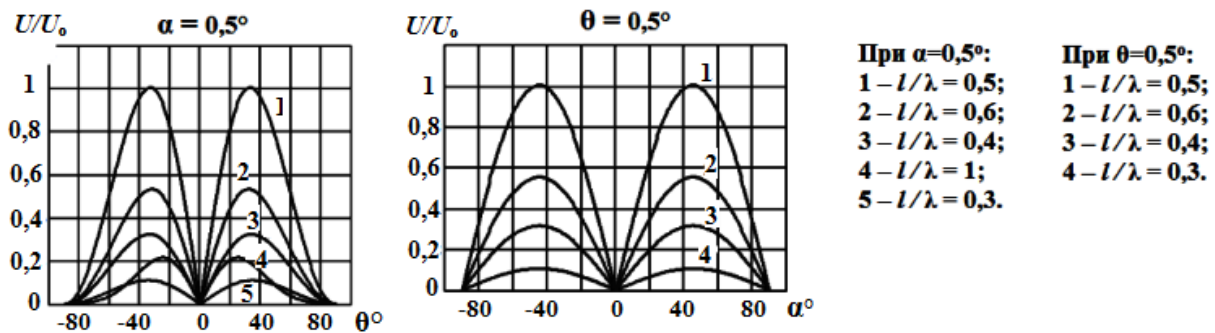


Рис. 3. Диаграммы направленности антенн различной длины в азимутальной (H-) и меридиональной (E-) плоскостях для S- и P-поляризованных волн

Как видно из приведенных зависимостей, отклик щелевой антенны на волну указанной поляризации существенно зависит от длины щели и достигает максимума при длине, равной $\lambda/2$. Но даже в этом случае, как показывают численные расчеты, значение напряжения в линии при падении волны P-поляризации, по крайней мере, на 30 дБ ниже, чем при падении волны S-поляризации.

В литературе по антеннам и антенным измерениям приводятся нормированные диаграммы направленности для приема волны основной поляризации, а для волны паразитной поляризации дается лишь среднее значение коэффициента подавления либо уровень кроссполяризации. В связи с этим, сравнение с известными результатами [3] проводилось для волны основной (S-) поляризации (рис. 4). Из рис. 4 следует, что диаграммы направленности, построенные с помощью предлагаемой модели, хорошо совпадают (как качественно, так и количественно) с диаграммами направленности, рассчитанными традиционными методами.

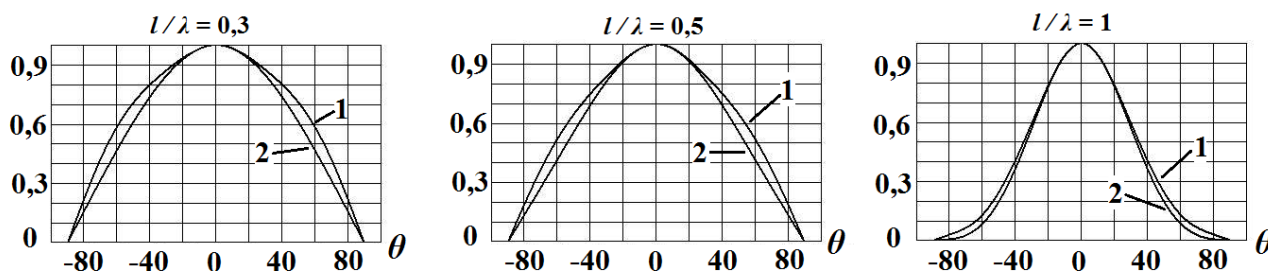


Рис. 4. Сравнение ДН при падении на ЩА S-поляризованной волны:

1 – получены с помощью предлагаемой модели; 2 – известные теоретические результаты

Правильное решение данной тестовой задачи позволяет надеяться на то, что результаты, полученные при рассмотрении падения на щелевую антенну волны P-поляризации, также верны.

Если электромагнитная волна падает под произвольным углом на ЩА, пройдя сквозь слой диэлектрика (рис. 5), то необходимо учитывать зависимость коэффициента прохождения волны от толщины диэлектрика и его относительной диэлектрической проницаемости [6].

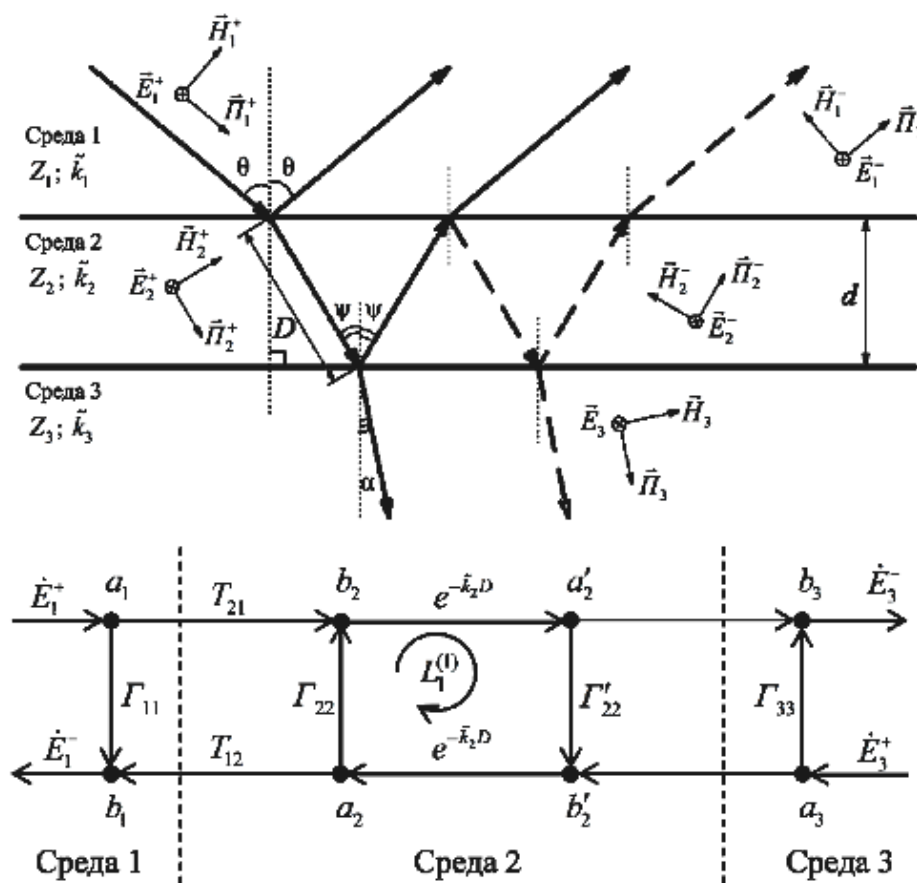


Рис. 5. Прохождение электромагнитной волной плоско-параллельной диэлектрической пластинки и граф, описывающий данный процесс

Данная задача решается методом ориентированных графов в предположении, что все среды являются однородными, изотропными и характеризуются волновыми сопротивлениями $Z_n = \sqrt{\mu_0 \tilde{\mu}_n / \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_n} = Z_0 \sqrt{\tilde{\mu}_n / \tilde{\epsilon}_n}$ и коэффициентами распространения $\tilde{k}_n = k_{n\alpha} + jk_{n\beta}$, где $k_{n\alpha}$, $k_{n\beta}$ – коэффициент затухания и фазовая постоянная волны в среде соответственно, $\tilde{\mu}_n$ и $\tilde{\epsilon}_n$ –

относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, соответственно, $n=1, 2, 3$ – номер диэлектрического слоя. Диэлектрическая пластинка имеет толщину d .

На рис. 5 показан граф, описывающий процессы прохождения и отражения волны при падении ее на диэлектрическую пластинку. Величины \tilde{A}_{ij} , T_{ij} – коэффициенты отражения и прохождения (из среды j в среду i) соответственно. Они определяются из формул Френеля и зависят от поляризации волны, угла падения и параметров сред.

Волну с произвольной поляризацией можно представить как суперпозицию двух волн с взаимно-перпендикулярными линейными поляризациями. В линейных средах эти волны рассматриваются по отдельности.

Отыскание коэффициентов Γ_{ii} и T_{ij} (они же S_{ij}) по ориентированному графу производилось по правилу некасающегося контура [7]. Ввиду того, что коэффициенты отражения и прохождения однозначно связаны друг с другом, приведем окончательные выражения для последнего:

$$\text{а) для S-поляризованной волны: } S_{31}^{\perp} = \frac{2A}{B \operatorname{sh} \tilde{k}_2 D + C \operatorname{ch} \tilde{k}_2 D},$$

где

$$A = Z_2 Z_3 \cos \theta \cos \psi,$$

$$B = Z_1 Z_3 \cos^2 \psi + Z_2^2 \cos \theta \cos \alpha, C = Z_1 Z_2 \cos \psi \cos \alpha + Z_2 Z_3 \cos \theta \cos \psi, D = d / \cos \psi;$$

$$\text{б) для P-поляризованной волны: } S_{31}^{\parallel} = \frac{2E}{F \operatorname{sh} \tilde{k}_2 D + G \operatorname{ch} \tilde{k}_2 D},$$

где $E = Z_2 Z_3 \cos \psi \cos \alpha,$

$$F = Z_1 Z_3 \cos \theta \cos \alpha + Z_2^2 \cos^2 \psi, G = Z_1 Z_2 \cos \theta \cos \psi + Z_2 Z_3 \cos \psi \cos \alpha.$$

Графики зависимостей коэффициентов прохождения в зависимости от угла падения приведены на рис. 6.

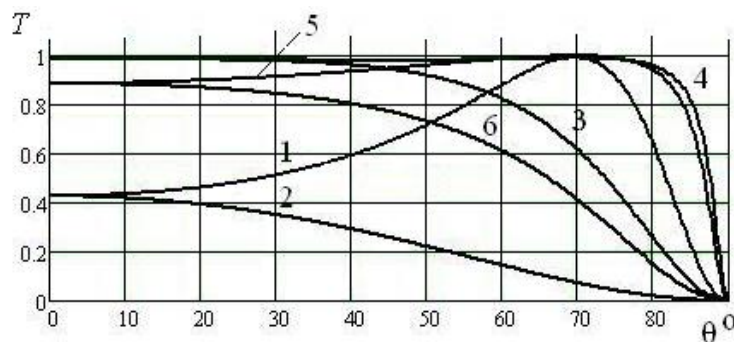


Рис. 6. Зависимость модуля коэффициента прохождения от угла падения волны:

1, 2 – толщина диэлектрика равна нечетному числу $\lambda/4$; 3, 4 – толщина диэлектрика равна целому числу $\lambda/2$; 5, 6 – толщина диэлектрика равна $0,05\lambda$; 2, 3, 6 – S-поляризация; 1, 4, 5 – P-поляризация

Как видно из этих зависимостей, выбор толщины диэлектрика может существенно повлиять на характеристики щелевой антенны.

Экспериментальная часть

Для проверки результатов, полученных с помощью предлагаемой теоретической модели, были проведены экспериментальные исследования планарных щелевых антенн в диапазоне частот от 3 до 12 ГГц. Измерения проводились по стандартной методике на установке с двумя каналами: опорным и измерительным. Опорный канал необходим для контроля за постоянством уровня мощности, подводимой к передающей антенне, роль которой выполняет открытый конец коаксиально-волноводного перехода, характеризующийся широкой диа-

граммой направленности в рабочем диапазоне частот. В измерительном канале осуществляется регистрация уровня СВЧ мощности, принятого исследуемой антенной. Обе антенны монтируются на оптической скамье и могут перемещаться и вращаться в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента передачи щелевой антенной от частоты для трех значений ширины щели.

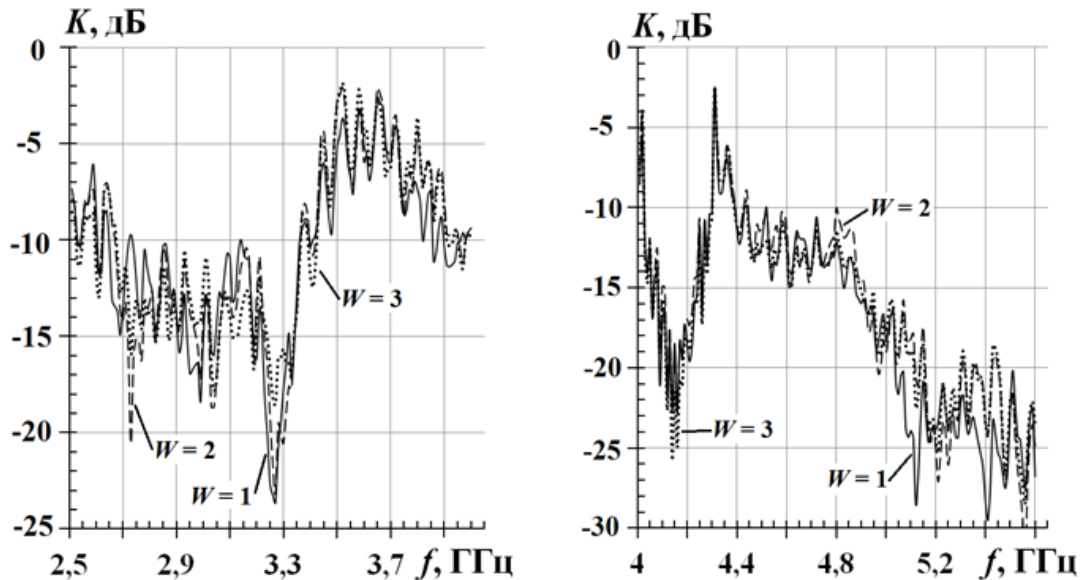


Рис. 7. Зависимости коэффициента передачи ЩА от частоты для трех значений ширины щели в диапазоне от 2,5 до 5,6 ГГц

Как видно из графиков, щелевая антенна является достаточно широкополосным устройством. Имеется максимум на частоте, соответствующей резонансу щелевого резонатора на диэлектрической подложке. Этот максимум является достаточно выраженным, его амплитуда и ширина одинаковы для всех трех значений ширины щели, несмотря на большое значение тангенса угла диэлектрических потерь стеклотекстолита и сильную связь с нагрузкой.

На рис. 8 представлены диаграммы направленности щелевой антенны (длина щели $L=30$ мм, ширина щели W равна 3 мм) на ФЛАНе с относительной диэлектрической проницаемостью 7,2 и толщиной $h=2$ мм, снятые на частотах 3195 МГц ($l/\lambda=0,5$) и 4830 МГц ($l/\lambda=0,7$) при падении волн S -поляризации (в E - и H -плоскостях) и P -поляризации (только в E -плоскости в связи с недостаточной чувствительностью измерительной аппаратуры).

В случае падения S -поляризованной волны, при $l/\lambda=0,5$ качественно диаграммы в E - и H -плоскостях совпадают, при этом ширина диаграмм в обеих плоскостях примерно одинакова и составляет $\approx 40^\circ$. При $l/\lambda=0,7$ в H -плоскости с увеличением частоты ширина диаграммы направленности уменьшается, так как уменьшается отношение длины волны к апертуре антенны. В E -плоскости характер диаграммы существенно изменился: появился значительный «провал» при угле 0° , а максимальное значение принятого сигнала достигается при углах порядка $\pm 40^\circ$.

Аналогичные ДН для основной поляризации снимались и для антенны с шириной щели равной 1 мм. Сравнение этих ДН показывает, что при увеличении ширины щели диаграммы направленности в E -плоскости в нормированном виде практически не меняются. Однако стоит отметить, что абсолютная чувствительность меняется, причем по-разному на разных частотах. Так, при $l/\lambda=0,5$ изменение ширины щели от 1 до 3 мм приводит к увеличению чувствительности на 13%. При $l/\lambda=0,7$, при тех же изменениях ширины щели чувствительность возрастает на 58%.

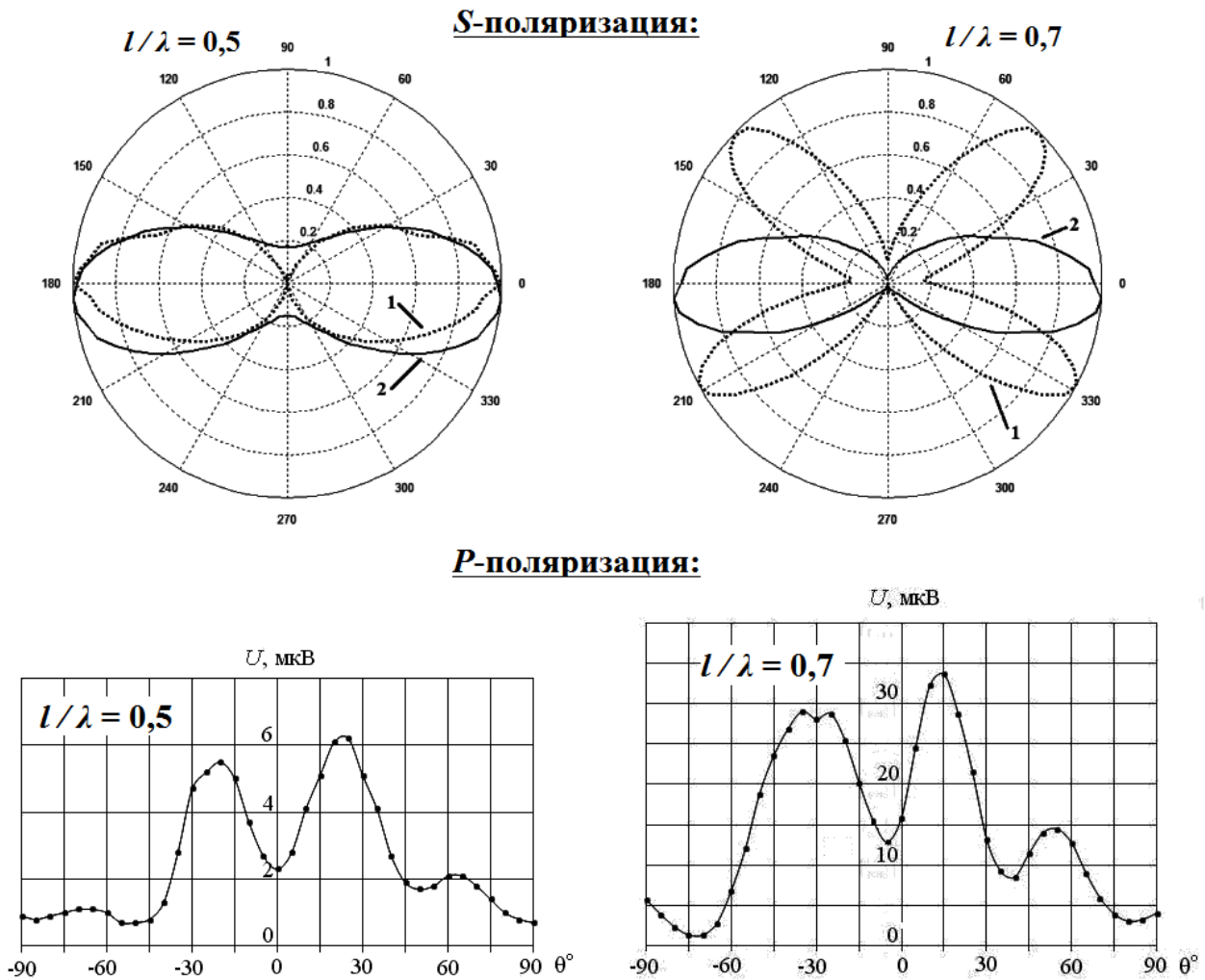


Рис. 8. Диаграммы направленности ЩА на подложке из ФЛАНа для S - (в E - (1) и H - (2) плоскостях) и P -поляризованных волн

Для волны паразитной поляризации (P -поляризации) диаграмма направленности, снятая в E -плоскости, носит качественный характер, однако позволяет провести сравнение с результатами теоретического расчета по предложенной выше модели и сделать вывод о ее корректности.

Выводы

Представленное в данной статье решение задачи о возбуждении приемной щелевой антенны отличается простотой, наглядностью, легкостью доведения до инженерных расчетов.

Результаты расчета основных характеристик щелевой антенны хорошо согласуются как с известными теоретическими результатами, так и с экспериментальными данными.

Библиографический список

- 1 **Zmuidzinas, J.** Quasi-optical slot antenna SIS mixers / H.G. LeDuc, J. Zmuidzinas // IEEE Trans. microwave Theory Tech. 1992. Vol. 40. Pp. 1797-1804.
- 2 **Zmuidzinas, J.** A dual-polarized slot antenna for millimeter waves / Goutam Chattopadhyay Jonas Zmuidzinas // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1988. Vol. 46. № 5. Pp. 736-737.
- 3 **Сазонов, Д.М.** Антенны и устройства СВЧ: учеб. пособие / Д.М. Сазонов.– М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

- 4 **Agouridis, D.C.** Excitation of transmission lines by distributed sources / D.C. Agouridis. – Oak Ridge National Lab., TN (USA): Technical report number(s) ORNL/TM-10376. – 1987. – 15p.
- 5 **Баскаков, С.И.** Радиотехнические цепи с распределенными параметрами: учеб. пособие / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.
- 6 **Семенов, Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А. Семенов – М.: Связь, 1973. – 480с.
- 7 **Силаев, М.А.** Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Советское радио, 1970.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

V. Birukov, V. Grachev

SOLVING PROBLEM OF EXCITATION SLOT ANTENNAS USING CIRCUIT THEORY

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The accounts of the receiving slot antenna as a transmission line excited by distributed sources are done. The used method of calculation is easy for understanding and using (it does not require cumbersome solutions boundary electro-dynamics problem). Dependence on the angle of incidence of a plane electromagnetic wave, its frequency and polarization are obtained.

The frequency properties and pattern slot antennas of the considered configurations are investigated experimentally. The scheme of the experimental setup is described. It presents the detailed results of the experiment.

A comparison between the measurement results, the calculation results and numerical simulation are made.

Key words: transmission coefficient, slotted antenna radiation pattern, polarization.

УДК 621.039

А.В. Варенцов¹, Д.В. Зяблицев¹, А.Н. Пронин¹, М.А. Легчанов¹, Д.Л. Шипов²

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ И МЕЖЪЯЧЕЙКОВОГО МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РАЙОНЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРОВ PWR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, направляющий канал, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, перемешивающая решетка.

Введение

Стратегической задачей для госкорпорации «Росатом» и топливной компании «ТВЭЛ» является выход на западный рынок ядерного топлива. Для этого в ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены разработки тепловыделяющихборок для реакторов типа PWR ТВС-КВАДРАТ, конкурентоспособных с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности [1].

В большинстве тепловыделяющихборок (ТВС) используются дистанционирующие и перемешивающие решетки, оказывающие существенное влияние на теплогидравлику потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора.

Важной задачей данных перемешивающих устройств является выравнивание температур (энтальпий) по сечениюборок, улучшение ситуации в наиболее напряженных ячейках ТВС, повышение запасов до кризиса теплоотдачи и др. Это достигается использованием в решетках лопаток, дефлекторов потока и других элементов, обеспечивающих перемешивание теплоносителя в поперечном сечении ТВС. Наличие подобных элементов может привести к заметному повышению гидравлического сопротивления самойборок, что будет являться нежелательным фактом. Поэтому оптимальная конструкция решетки требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Отдельного внимания, с точки зрения гидродинамики и массообмена заслуживают затесненные зоны кассеты, например, периферийные ячейки или области, прилежащие к направляющим каналам (НК).

Для обоснования теплотехнической надежности, особенности конструкций перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) ТВС-КВАДРАТ требуют детального изучения и анализа локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в активной зоне реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Исследования локальных характеристик гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде (рис. 1) методом диффузии примесей [2]. Принцип проведения экспериментальных исследований заключался в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, двигался через расходомерное устройство и успокоительный участок, затем, пройдя через модель, выбрасывался в атмосферу. Трассер подавался через впускной зонд в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка, после чего отборным зон-

дом за исследуемым поясом решетки производился отбор газовой смеси для анализа распределения концентрации трассера по длине и поперечному сечению модели.

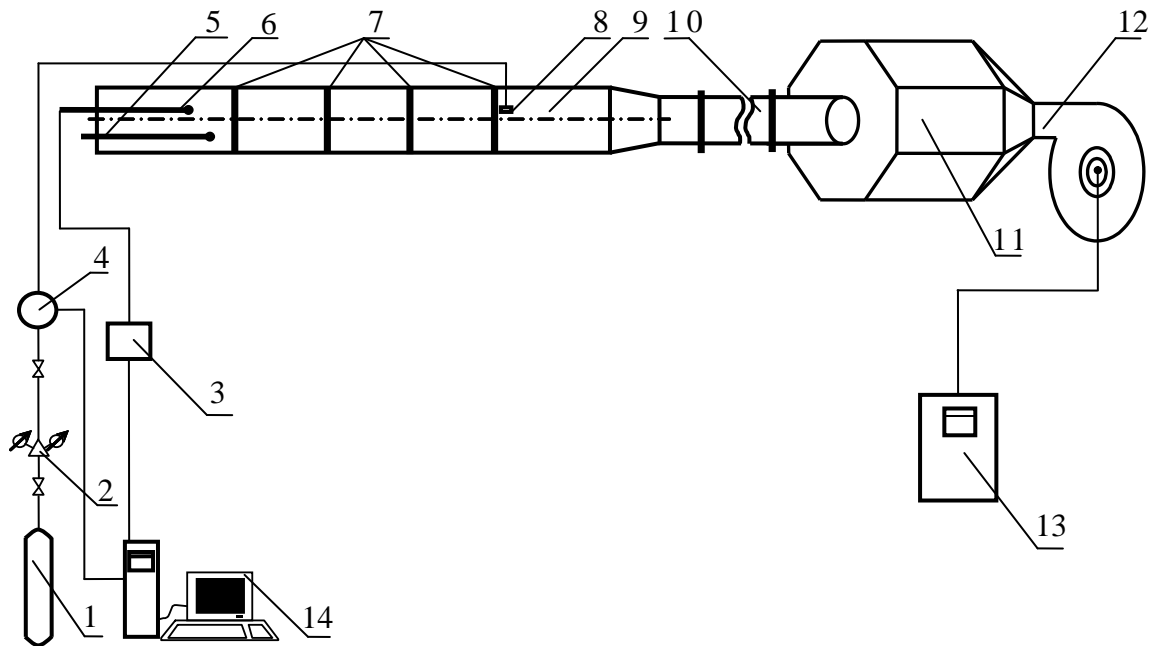


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – модульный газоанализатор; 4 – регулятор расхода газа; 5 – пятиканальный пневмометрический зонд; 6 – отборный зонд; 7 – статические отборы; 8 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 9 – экспериментальная модель; 10 – успокоительный участок; 11 – буферная емкость; 12 – вентилятор высокого давления; 13 – преобразователь частоты; 14 – ЭВМ



Рис. 2. Пояс перемешивающей дистанционирующей решетки

Экспериментальная модель (ЭМ), представляющая собой фрагмент ТВС-КВАДРАТ реактора типа PWR, выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_g = 4,2$, имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, 45 цилиндрических твэлов-имитаторов, четырех имитаторов направляющего канала, двух поясов пластинчатых дистанционирующих решеток, пояса перемешивающей дистанционирующей решетки.

Исследуемый пояс ПДР (рис. 2) представляет собой квадратную пластинчатую решетку, набранную из взаимно-перпендикулярных пластин. Верхние кромки пластин решетки снабжены дефлекторами таким образом, что на каждый твэл приходится по два дефлектора, расположенных диагонально, что улучшает перемешивание потока теплоносителя [2].

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, регулятор расхода газа, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор АДК-03Р, принцип работы которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует 1 объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси.

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0 до 5 л/мин. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

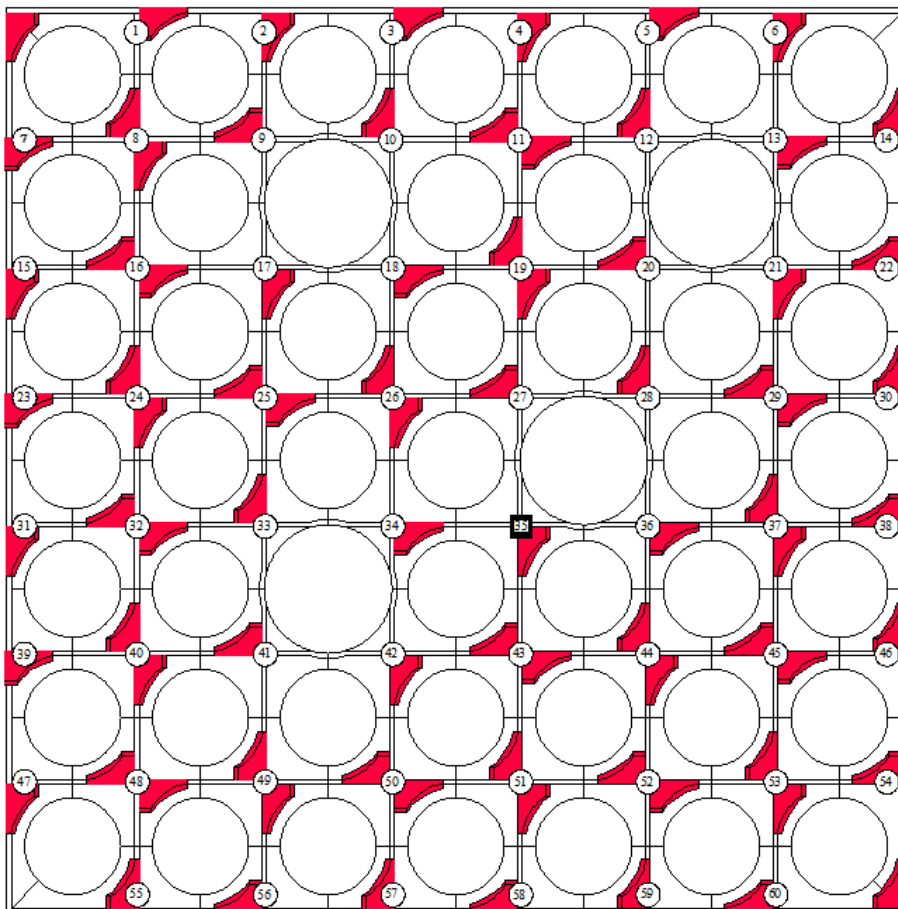


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

Методика проводимых исследований

Метод трассера основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве трассера использовался газ пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена на экспериментальном стенде заключалась в следующем:

- поперечное сечение экспериментальной модели было разбито на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 3);
- газовый трассер через впускной зонд подавался в стандартную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за поясом ПДР в характерных сечениях по длине ЭМ;
- по полученным данным строились графики и картограммы зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ

Важным этапом является подтверждение представительности проведенных экспериментальных исследований. В активной зоне реактора PWR числа Рейнольдса достигают нескольких сотен тысяч, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в активных зонах реактора PWR моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, то в области автомодельности профиль относительной скорости ($W_{лок}/W_{ср.расх}$) остается неизменным.

Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС. Экспериментальные исследования распределения концентрации трассера в характерных зонах ТВС-КВАДРАТ с направляющими каналами при постановке пояса перемешивающей дистанционирующей решетки проводились при числе $Re=101200$.

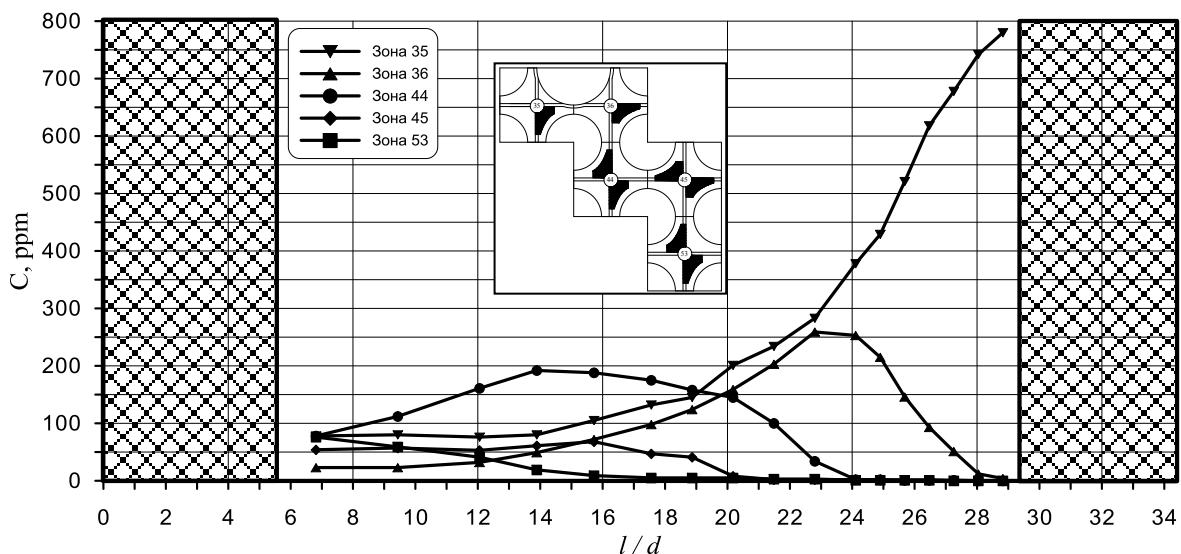


Рис. 4. Графики распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели

По полученным экспериментальным данным были построены графики распределения

концентрации трассера и картограммы по длине экспериментальной модели для характерных зон в поперечном сечении при постановке поясов перемешивающих решеток.

Рассмотрев, как изменяется концентрация трассера из зоны инъекции № 35 в соседние ячейки (рис. 4), можно отметить, что за дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

На рис. 5 представлено распространение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели.

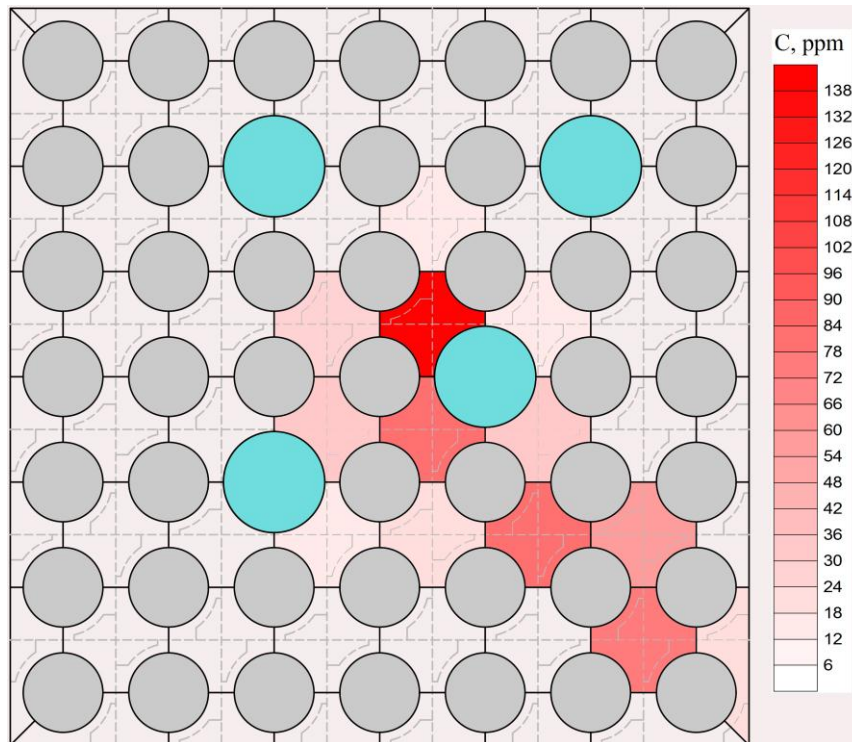


Рис. 5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели

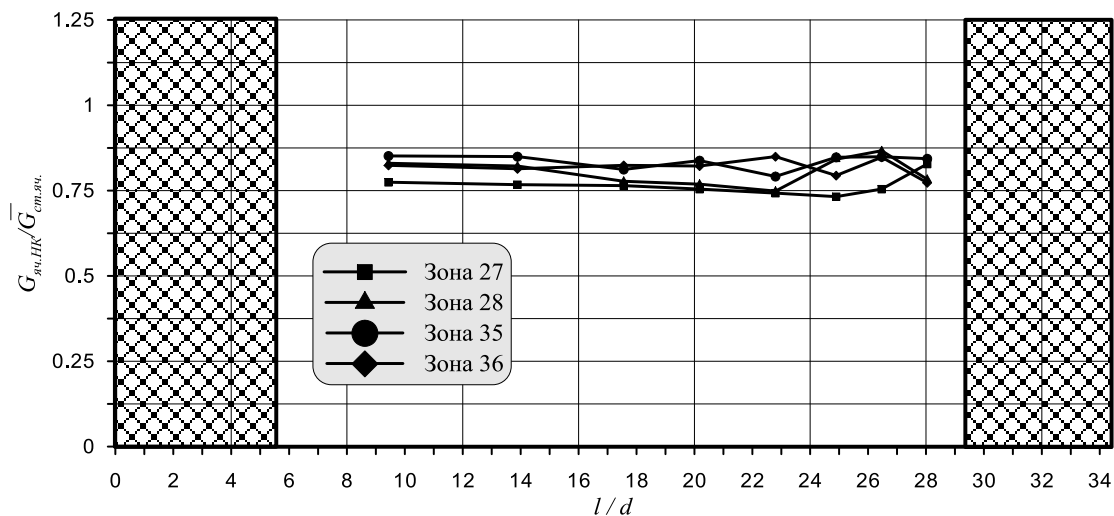


Рис. 6. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №№ 27, 28, 35, 36 прилегающие к НК к стандартным ячейкам

Экспериментальные исследования локальных полей скорости проводились в 16 ячейках прилежащих к направляющим каналам, и в двух стандартных ячейках, позволили определить распределение расхода теплоносителя в данной области (рис. 6, 7). Оно обусловлено различием в площадях проходного сечения ячеек, прилежащих к НК, по сравнению с площадью проходного сечения стандартной ячейки ТВС-КВАДРАТ и отсутствием дефлекторов в данной области.

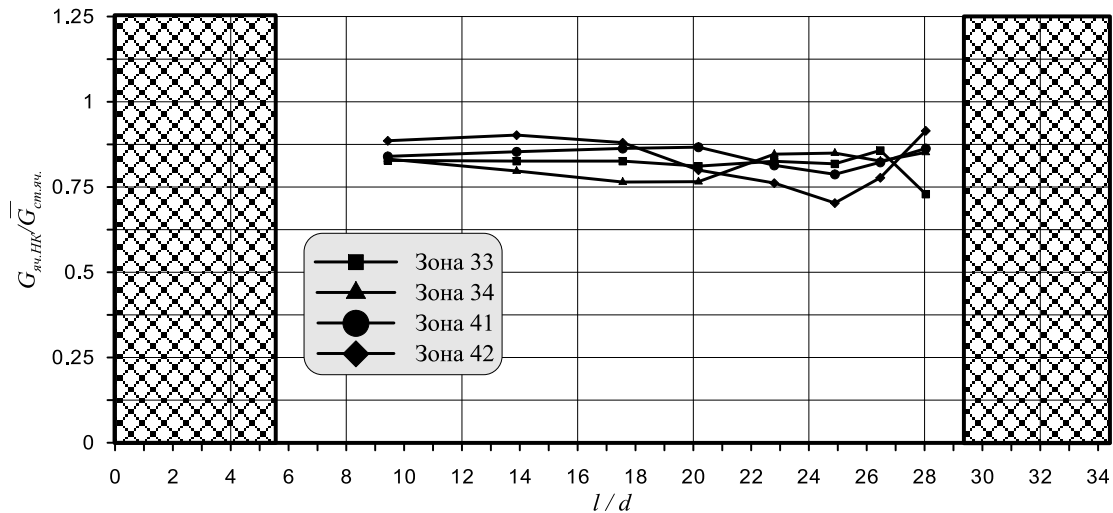


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №№ 33, 34, 41, 42 прилежащие к НК к стандартным ячейкам

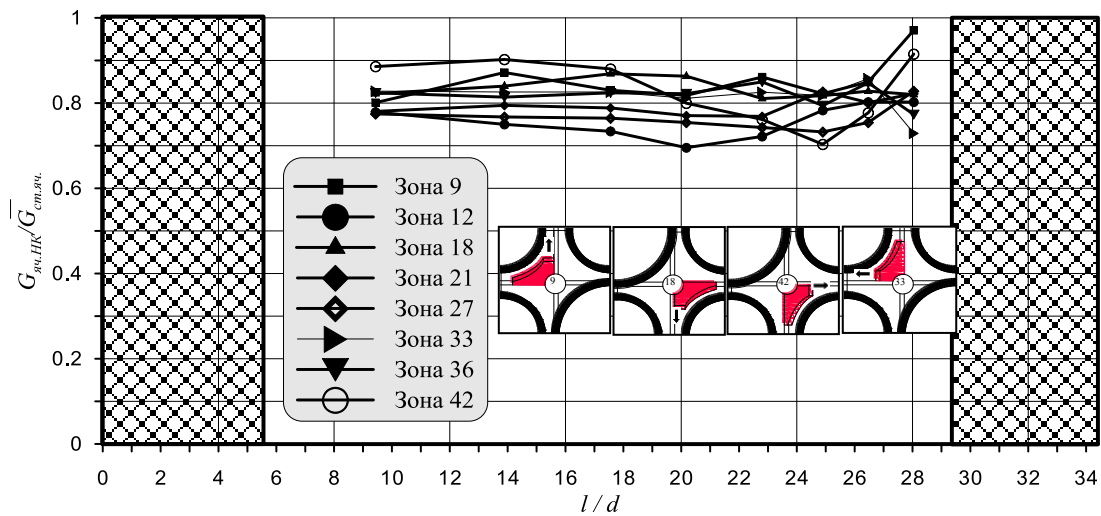


Рис. 8. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, где дефлектора направляют поток в стандартные ячейки, прилежащие к НК к стандартным ячейкам

Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК и стандартных ячейках ТВС-КВАДРАТ, приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. В случае, когда дефлектора в ячейках вокруг НК (рис. 8) направляют поток в стандартные ячейки, происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку. Для ячеек (рис. 9), где дефлектора направляют теплоноситель в область НК, происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 15% по сравнению с расходом через стандартную ячейку.

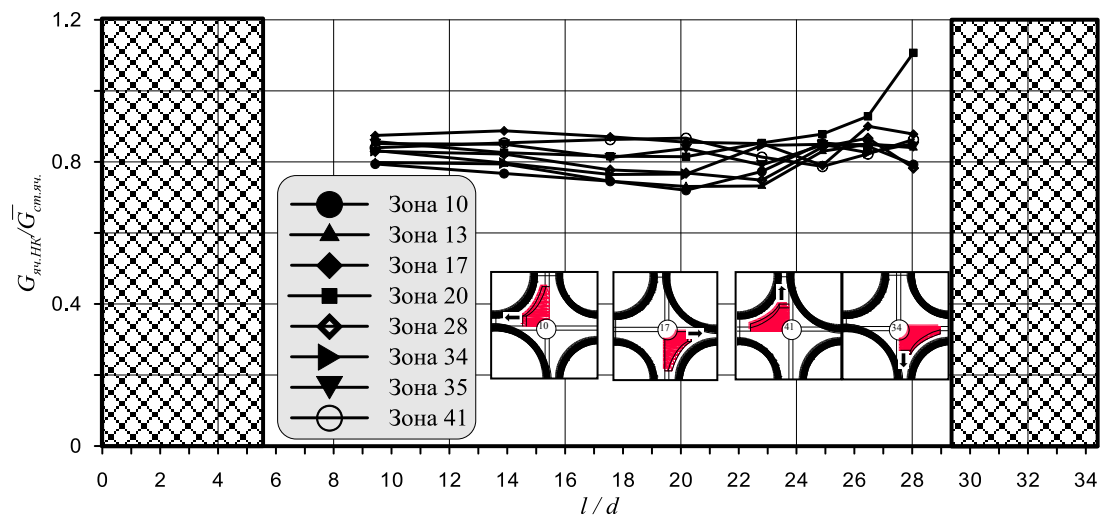


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, где дефлектора направляют поток в затесненную область, прилегающие к НК к стандартным ячейкам

Выводы

По результатам экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в ЭМ были выявлены основные общие закономерности движения потока теплоносителя за ПДР:

1. За дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

2. Экспериментально определено, что не весь поток теплоносителя движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей дистанционирующей решеткой, вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Эффективное перемешивание трассера в поперечном сечении заканчивается на расстоянии $l/d \approx 17 \div 20$ после перемешивающей дистанционирующей решетки.

4. Различия в проходных сечениях ячеек, прилегающих к направляющему каналу и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ, приводят к вытеснению части расхода в соседние ячейки на 15–20%.

Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с ТВС-КВАДРАТ для реактора PWR с целью уменьшения консерватизма в расчетах теплотехнической надежности активных зон.

Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR / С.С. Бородин [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3. С. 106–112.
2. **Бородин, С.С.** Исследования локального массообмена теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при использовании перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» / С.С. Бородин [и др.] // Теплофизика-2008: сб. тезисов. – Обнинск, 2008. С. 24.

Дата поступления
в редакцию 06.11.2012

A.V. Varentsov¹, D.V. Zyablitsev¹, A.N. Pronin¹, M.A. Legchanov¹, D.L. Shipov²

INVESTIGATION OF LOCAL HYDRODYNAMICS AND INTERCELLULAR MASS TRANSFER AROUND GUIDE CHANNELS OF PWR REACTORS FUEL ASSEMBLIES

Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alexeev¹,
Joint stock company «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass transfer of heat carrier in the experimental model of PWR nuclear reactor fuel assembly.

Design/methodology/approach: For experimental study of local hydrodynamics and intercellular mass transfer characteristics of coolant in the PWR reactor FA the gas diffusion method was used.

Findings: According to the results of experimental studies of hydrodynamics and mass transfer in FA experimental model general patterns of coolant flow were revealed. The distance at which efficient mixing of tracer ends was determined.

Research limitations/ implications: This study is part of a series of experimental studies devoted to local hydrodynamics and mass transfer processes of coolant in fuel assemblies with mixing grids for PWR nuclear reactors.

Originality/value: The special databank was created on the base of the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes for calculation of PWR nuclear reactors thermotechnical reliability. The results of the research are now used by Join Stock Company OKBM Afrikantov.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics, mass transfer, spacer grid, mixing grid.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.113

М.Г. Корчажкин¹, Н.А. Кузьмин¹, А.Д. Кустиков²

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Автомобили Баварии»²

Совершенствование нормативов технической эксплуатации автомобилей в зависимости от условий их работы является актуальной задачей. При работе автобусов на маршрутах с подъемами увеличивается число отказов двигателей. Изменяются показатели их безотказности и долговечности. Необходима оптимизация периодичности технических воздействий, проведение упреждающего технического обслуживания.

Ключевые слова: техническая эксплуатация автомобилей, норматив, отказ, двигатель, периодичность технического обслуживания, безотказность, долговечность, надежность.

Существующая в России система корректирования нормативов технической эксплуатации автомобилей (ТЭА) не учитывает многих технических аспектов. Примеров этому вполне достаточно. Возможность адекватно корректировать нормативы ТЭА, если автомобили одной модели и модификации эксплуатировались разное количество времени в различное время года на сегодня, ограничена. Например, если легковой автомобиль «Волга» совершил пробег 200 тыс. км при круглогодичной эксплуатации, а другой подобный автомобиль только летом в одних и тех же условиях эксплуатации, то реальные нормативы ТЭА для них должны быть различны. Значения корректирующих коэффициентов нормативов ТЭА для такого случая в настоящее время принимаются одинаковыми, хотя уровни ухудшения технического состояния данных автомобилей явно различны [1]. В частности износы деталей у второго автомобиля за период этого пробега будут существенно меньше. В этой связи оценивать ресурсы автомобилей, периодичности оптимальных сроков проведения регламентных работ по техническому обслуживанию (ТО) как равные при различных условиях эксплуатации не корректно.

Существует ряд научных работ, в которых предлагается или изменение, или введение новых корректирующих нормативы ТЭА коэффициентов. Например, достаточно подробно переработана система корректирования нормативов ТЭА в горных природно-климатических условиях эксплуатации д.т.н. А.А. Турсуновым на примере Таджикской республики, где действует Российское «Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта». В этой связи, для эксплуатации автомобильного транспорта при различной высоте над уровнем моря и разбега температур окружающей среды, предложены корректирующие коэффициенты норм расхода топлив, которые являются, на наш взгляд, более точными, чем отечественные аналоги. Кроме того, в России вообще не принята надбавка к расходу топлив автотранспортных средств (АТС) в спектре положительных температур [2]. Этим же автором предлагаются более точные значения коэффициентов корректирования периодичности ТО, пробега до капитального ремонта АТС, трудоемкости их обслуживания и расхода запасных частей для различных условий эксплуатации.

Известны результаты научных исследований по детализации осуществления технических воздействий на отдельные конструктивные элементы АТС при периодичностях, отли-

чающихся от нормативных с учетом корректирования. Это призвано повысить показатели безотказности и долговечности автомобилей. Для примера можно привести работы Ю.В. Баженова и К.И. Разговорова по оптимизации периодичности технических воздействий, которые существенно отличаются от нормативных, для передней подвески и рулевого управления переднеприводных автомобилей ВАЗ [3].

Анализ опыта эксплуатации городских автобусов общего пользования ПАЗ-3205 на маршрутах с подъемами в Нижнем Новгороде показывает резкое увеличение количества отказов базовых деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и системы охлаждения в жаркое время года, при температурах окружающего воздуха уже выше $+15^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Возникающие отказы – прогар головок блоков цилиндров двигателей, задиры зеркала цилиндров, закоксовывание поршневых колец, прогорание днищ поршней, образование в системе топливоподачи паровых пробок, растрескивание гильз цилиндров. Предшествует этому «закипание» жидкости в системе охлаждения двигателя. С технической точки зрения объяснение этому однозначно – превышение температурного состояния основных теплонагруженных деталей двигателя [4].

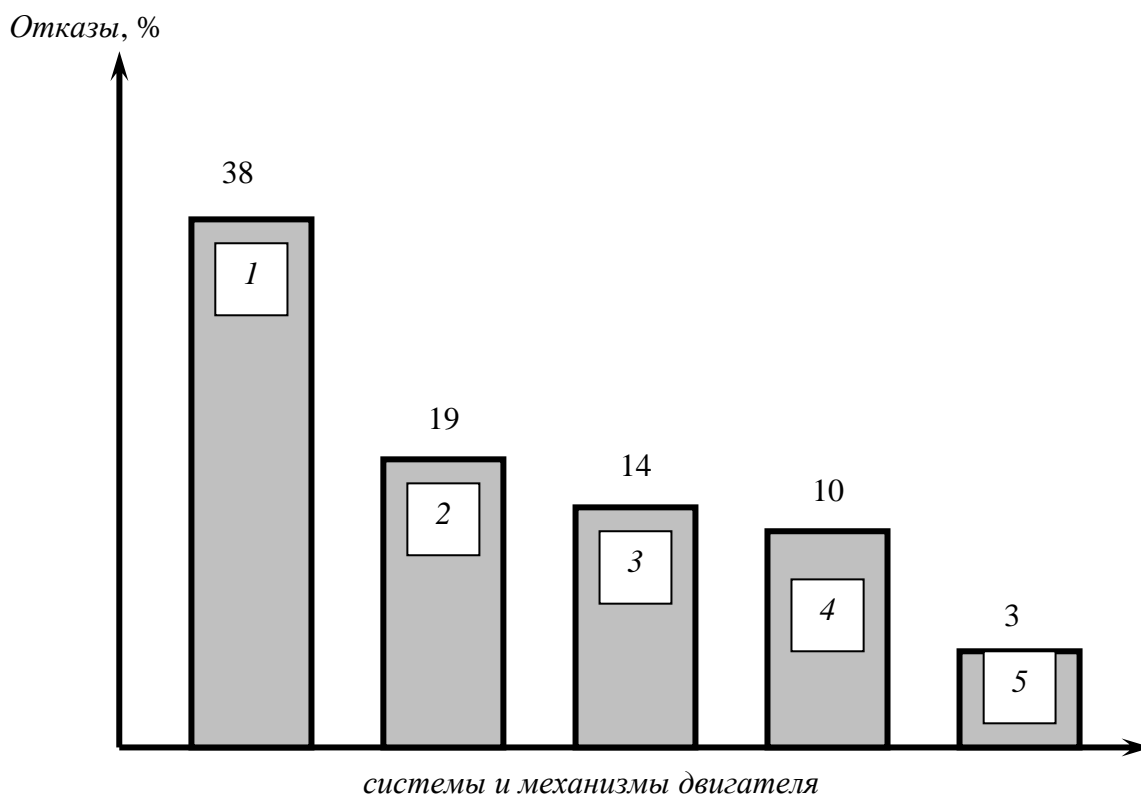


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов двигателей автобусов ПАЗ-3205, работающих на маршрутах с уклонами:

1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – система охлаждения; 3 – электрооборудование;
4 – газораспределительный механизм; 5 – система питания

Причиной такого распределения отказов, прежде всего, является наличие значительных подъемов на маршрутах движения автобусов. Так, при движении из «нижней» части города в «верхнюю» автобусы в зависимости от маршрута преодолевают подъемы высотой от 65 до 110 метров. В тоже время суммарный подъем на маршруте может составлять 200 метров и более. Эти факторы приводят к увеличению нагрузок на все агрегаты автобуса и в первую очередь на двигатель. Для последнего это чревато повышением допустимого предела теплонагруженности деталей. Ситуация усугубляется в летний период. В это время температура охлаждающей жидкости в конце подъема достигает 110°C , а температура моторного

масла – до 105°C . В таких условиях работы вполне закономерно увеличение числа отказов, причиной которым является тепловое состояние двигателя [5]. Средняя наработка на отказ двигателей снижается, что приводит к простоям автобусов, увеличиваются эксплуатационные расходы автотранспортных предприятий (АТП). В этой связи и возникла необходимость разработки организационно-технических мероприятий по повышению эксплуатационной надежности двигателей автобусов, работающих на маршрутах с уклонами.

При работе автобусов на маршрутах общего пользования на основные показатели технической эксплуатации влияет большое количество различных факторов. Из общего их числа особо необходимо выделить наличие различных изменений рельефа местности на маршруте. Данная особенность маршрутов сказывается на эксплуатационных показателях автобусов – расход топлива, расход масла на угар, интенсивность износа основных узлов и т.д. С точки зрения надежности наличие подъемов на маршруте следования автобусов приводит к достаточно ощутимому изменению показателей безотказности и долговечности их агрегатов, систем, узлов и деталей. Увеличение нагрузок на все конструкционные элементы автобусов неотвратимо влечет за собой снижение их средней наработки на отказ. Это в свою очередь непосредственно влияет на показатели ТЭА. Так, при изменении средней наработки на отказ агрегата обязательно изменится вид зависимости плотности вероятности отказа от наработки как агрегата, так и всего автомобиля. Данный факт указывает на необходимость корректирования периодичности технических воздействий при эксплуатации автомобилей на маршрутах с подъемами.

Наличие подъемов сказывается и на технико-экономических показателях АТП, обслуживающих данные маршруты. Так, в Нижнем Новгороде существуют автопредприятия, обслуживающие только равнинные маршруты без каких-либо значительных изменений рельефа местности. Сложившееся положение дел с нормативами ТЭА подвижного состава здесь устоявшееся и осуществляется в соответствии с существующей системой ТО и ремонта АТС при незначительных отклонениях от реального положения дел. В то же время часть АТП обслуживает маршруты, соединяющие районы верхней и нижней частей города. На этих маршрутах имеется значительный перепад высот. Применении одинаковых (как регламентируется действующими стандартами [1]) нормативов ТЭА для автобусов предприятий, обслуживающих маршруты с подъемами и для автобусов таких же АТП, работающих на равнинных маршрутах, не совсем правомочно, так как практика доказывает не корректность этого. Реальные расходы на эксплуатацию автобусов у данных предприятий различны. Это, безусловно, связано с различием нагрузок на основные агрегаты автобусов, например, тепловых нагрузок на детали двигателей. Условия работы автобусов на маршрутах заречной части Нижнего Новгорода при проводимых исследованиях были приняты за номинальные. Эти маршруты полностью подпадают под III категорию условий эксплуатации.

По результатам анализа маршрутной сети и геодезической карты Нижнего Новгорода, а также сбора данных по протяженности была построена эпюра характерного маршрута движения автобусов (рис 2). На ней приведен типичный маршрут, соединяющий разные части города. Полученная эпюра позволяет выделить участки маршрута движения автобуса, где наибольший перепад высот. На этих отрезках автобус преодолевает значительные подъемы, испытывая повышенные нагрузки. На эпюре таких участков два – они обозначены I и II (рис.2). Первый участок – Зеленский съезд, его протяженность 1071 м, перепад высот составляет 75 м. При движении по данному участку двигатель автобуса испытывает увеличенные нагрузки, в результате чего повышается его температурное состояние. Ситуация усугубляется в летний период, когда температура окружающего воздуха от $+15^{\circ}\text{C}$ и выше. Замеры показали, что в конце данного подъема при движении автобуса с полной нагрузкой температура охлаждающей жидкости двигателя составляет $105-110^{\circ}\text{C}$. При таких условиях работы двигателей резко увеличивается количество «тепловых» отказов.

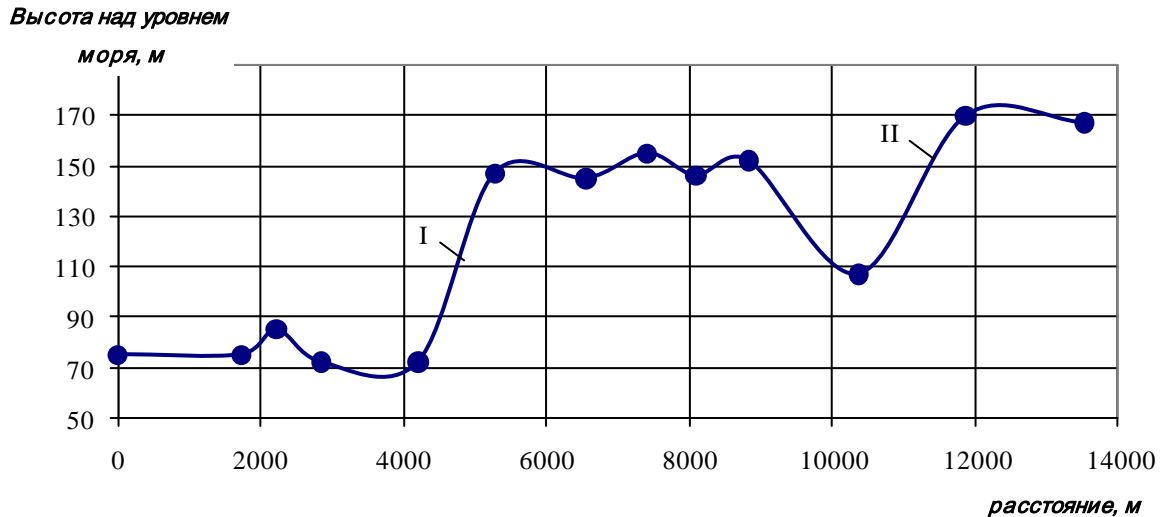


Рис. 2. Эпюра маршрута движения городского автобуса в Нижнем Новгороде

Аналогичная картина складывается и на втором участке маршрута – по подъему к Казанскому шоссе вверх на ул. Бринского (рис. 2). Протяженность этого участка 1552 м, а высота подъема – 63 м. Несмотря на большую протяженность и меньшую высоту подъема, чем у участка I, этот отрезок маршрута также вызывает повышенное температурное состояние ДВС. Проблема усугубляется еще и тем, что в середине данного подъема находится остановочный пункт, в то время как первый участок автобусы преодолевает без остановок. Подобных подъемов на маршрутах городских автобусов в городе пять, при преодолении которых также отмечено повышенное тепловое состояние автобусных двигателей, превышающее допустимые пределы.

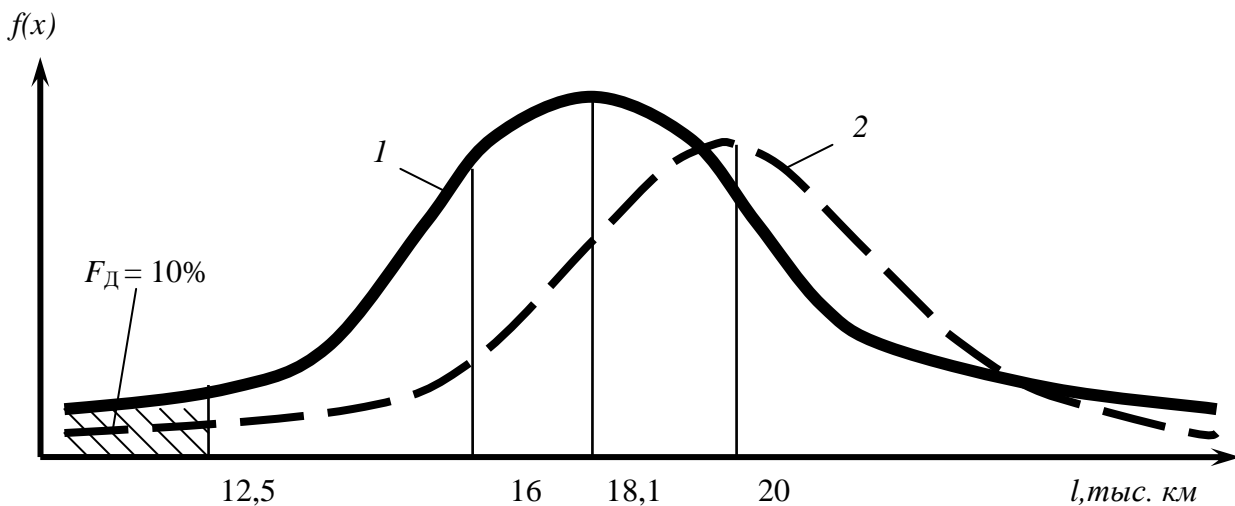


Рис. 3. Функция плотности распределения отказов двигателей автобусов ПАЗ-3205:

1 – распределение отказов при нормативной периодичности ТО-2; 2 – распределение отказов после внедрения предупреждающего ТО; $L_{\text{ТО-2}} = 16000$ км – нормативная периодичность ТО-2 автобусов, эксплуатирующихся в Нижнем Новгороде; $L_{\text{отк}} = 18100$ км – средняя наработка на отказ двигателей; $L_{\text{ТО(П)}} = 12500$ км – оптимальная периодичность предупреждающего ТО; $L'_{\text{отк}} = 20000$ км – средняя наработка на отказ двигателей при внедрении предупреждающего ТО

Для анализа влияния процессов повышения температурного состояния деталей на эксплуатационную надежность двигателей, была собрана информация об отказах двигателей автобусов, работающих на маршрутах со значительными уклонами. Информация собиралась

из технической документации по эксплуатации автобусов в пассажирских автотранспортных предприятиях Нижнего Новгорода в течение двух лет. Наблюдение проводилось за автобусами марок ПАЗ-3205 и ГАЗ-3221(ГАЗель).

Информация об отказах по двигателям была сгруппирована по результатам эксплуатации 20 новых автобусов ПАЗ. В сложившейся ситуации на рынке пассажирских перевозок автобусы ПАЗ-3205 широко используются в качестве маршрутных на линиях Нижнего Новгорода. Доля перевозок, выполняемых этими автобусами, значительна, поэтому исследование двигателей автобусов ПАЗ-3205 представляется актуальным. Выборка отказов двигателей сформирована как по результатам их подконтрольной эксплуатации на предприятиях и маршрутах Нижнего Новгорода, так и по данным, предоставленным ОАО ЗМЗ - предприятия, производящего двигатели для указанных автобусов. Собранная информация была должным образом обработана. В результате получена функция плотности распределения отказов наиболее теплонагруженных деталей двигателей, которая представлена на рис. 3.

Автобусы ГАЗ-3221(ГАЗель) получили широкое применение во многих городах России в качестве маршрутных такси. Установленный на этих автобусах двигатель ЗМЗ-4025.10 работает в режиме увеличенных нагрузок, что особо усугубляется условиями движения на маршруте с подъемами.

Изначально наблюдению подверглись 20 автобусов ГАЗ-3221(ГАЗель). Однако в течение полугода один автобус попал в ДТП и был списан. Информация об отказах собиралась в течение двух лет. Таким образом, выборка по отказам автобусов ГАЗель была сформирована по 19 новым автобусам. Все они работали на одних и тех же маршрутах, при одинаковом среднесуточном пробеге. Функция плотности распределения отказов имеет вид, представленный на рис. 4.

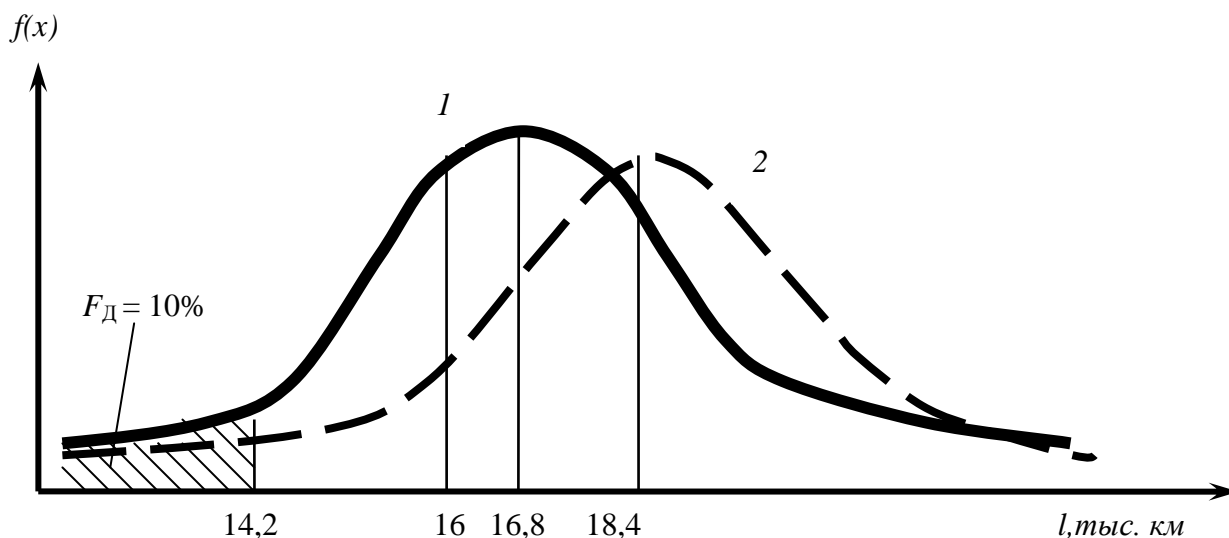


Рис. 4. Функция плотности распределения отказов двигателей автобусов ГАЗ-3221:

1 – распределение отказов при нормативной периодичности ТО-2; 2 – распределение отказов после внедрения предупреждающего ТО; $L_{\text{ТО-2}} = 16000$ км – нормативная периодичность ТО-2 автобусов, эксплуатирующихся в Нижнем Новгороде; $L_{\text{отк}} = 16800$ км – средняя наработка на отказ двигателей; $L_{\text{ТО(П)}} = 14200$ км – оптимальная периодичность предупреждающего ТО; $L'_{\text{отк}} = 18400$ км – средняя наработка на отказ двигателей при внедрении предупреждающего ТО

Анализ графиков на рис. 3 и рис. 4 показывает, что наибольшее количество отказов двигателей, связанных с тепловым состоянием, происходит немногим позже проведения нормативного ТО-2. Это приводит к увеличению простоев автобусов из-за данного типа отказов. На основании полученного предложено и введено предупреждающее (упреждающее) ТО ($L_{\text{ТО(П)}}$), которое будет включать в себя только операции, от выполнения которых зависит температурное состояние двигателя. Это, прежде всего, операции подтяжки крепления го-

ловки блока цилиндров, проверка и регулировка натяжения ремня привода вентилятора, проверка исправности работы термостата, промывка и продувка воздухом радиатора, замена моторного масла.

Для введения предупреждающего ТО необходимо определить научно-обоснованную оптимальную периодичность его проведения. По полученным результатам исследований данные значения для автобусов ПАЗ-3205 и ГАЗ-3221 (ГАЗель), эксплуатируемых на маршрутах с наличием крутых подъемов, определялось известным и надежным методом – по допустимому уровню безотказности. Данные числовые значения $L_{ТО(П)}$ для исследуемых автобусов и представлены на рис. 3 и рис. 4. При этом допустимый уровень отказов (риск) принят согласно условиям примененного метода $F_d = 10\%$. Следует отметить также, что было выдержано и главное условие научной обоснованности определения оптимальных периодичностей ТО для данных автобусов и сбора адекватной статистической информации – регламентные технические вмешательства в период подконтрольной эксплуатации не производились, а отказы устранялись по мере их возникновения и сходов автобусов с линии.

После внедрения предложенного предупреждающего ТО для подвижного состава пассажирского автотранспортного предприятия №7 Нижнего Новгорода (НПАП-7) средняя наработка на отказ двигателей по всем маркам автобусов увеличилась. Тепловое состояние двигателей при работе на подъемах стало более стабильным. Распределение отказов двигателей автобусов по системе также изменилось, что на примере автобусов ПАЗ-3205 показано на рис. 5.

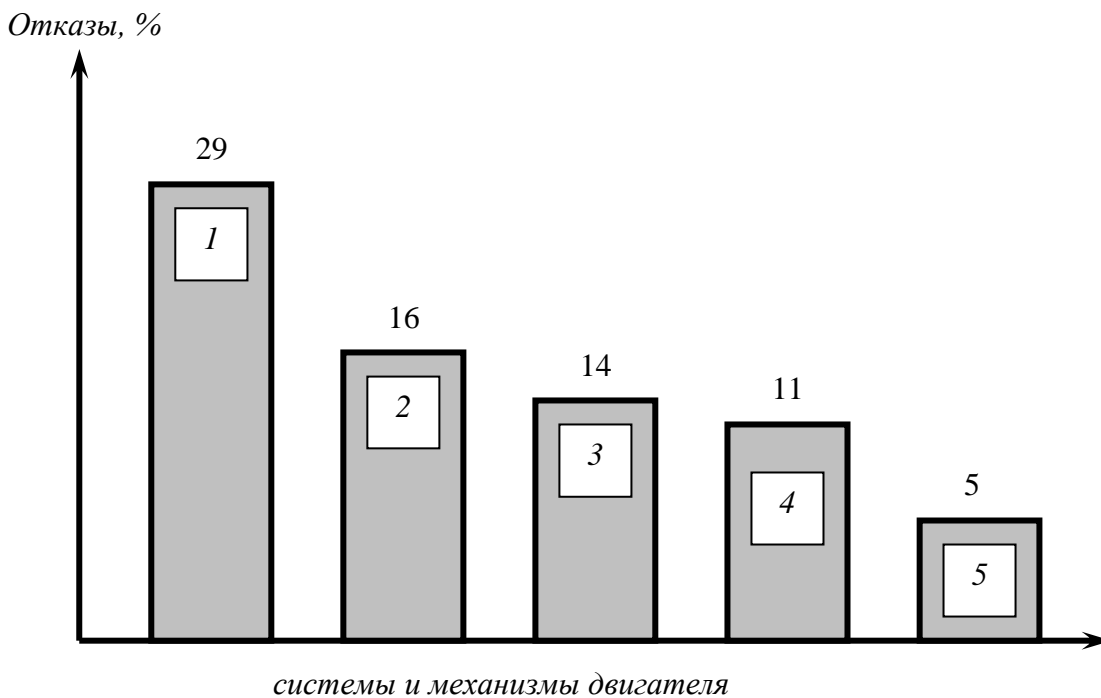


Рис. 5. Диаграмма распределения отказов двигателей автобусов ПАЗ-3205, работающих на маршрутах с уклонами при проведении предупреждающего ТО:
 1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – система охлаждения; 3 – электрооборудование;
 4 – газораспределительный механизм; 5 – система питания

Оптимальное значение предупреждающего (упреждающего) ТО ($L_{ТО(П)}$) систем двигателей городских автобусов исследуемых и подобных им марок, эксплуатируемых на маршрутах с подъемами, рекомендуется проводить с рассчитанными периодичностями. Для других марок автобусов и подобных условий эксплуатации требуется проведение дополнительных испытаний и расчетов по предложенному алгоритму.

Совмещать операции ТО(П) и ТО-2 рекомендуется при отличии их периодичностей

не более, чем на 300 км пробега. При большом расхождении этих периодичностей проводить ТО(П) можно силами водителей в межсменное время с увеличением соответствующего денежного вознаграждения. Введение дополнительного упреждающего вмешательства ТО(П) в двигатель является необходимой мерой снижения количества отказов двигателей и автобусов в целом.

Библиографический список

1. **Кузьмин, Н.А.** Техническая эксплуатация автомобилей: нормирование и управление: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин. – М.: ФОРУМ, 2011. – 224 с.
2. **Турсунов, А.А.** Экспериментальная оценка приспособленности АТС к горным условиям эксплуатации // Актуальные проблемы современной науки. – М., 2002. №2. С. 322-324.
3. **Баженов, Ю.В.** Анализ эксплуатационной надежности шаровых шарниров рулевых тяг и рычагов подвески легковых автомобилей с приводом на передние колеса / Ю.В. Баженов, К.И. Разговоров // Автомобильный транспорт в XXI веке: сб. научных статей конференции. – Нижний Новгород, 2003. – С. 51-54.
4. **Кузьмин, Н.А.** Техническая эксплуатация автомобилей: закономерности изменения работоспособности: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин. – М.: ФОРУМ, 2011. – 208 с.
5. **Зеленцов, В.В.** Эксплуатационные свойства и тепловые режимы поршневых автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие / В.В. Зеленцов, В.В. Крупа. – Н.Новгород: НГТУ, 2002. – 72 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

M.G. Korchazhkin¹, N.A. Kuzmin¹, A.D. Kustikov²

IMPROVEMENT OF NORMATIVES OF TECHNICAL OPERATION OF CITY BUSES

Nizhny Novgorod Statet Technical niversity n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC Auto Bavaria²

Improvement of normatives of technical operation of cars depending on conditions of their work is an actual task. At operation of buses on routes with liftings the number of failures of engines increases. Non-failure operation and durability indicators are change. Optimization of periodicity of technical influences, carrying out anticipatory technical maintenance is necessary.

Key words: technical operation of cars, normative, failure, engine, periodicity of technical influences, non-failure operation, durability, reliability.

УДК 629.113

Л.В. Барахтанов¹, В.В. Беляков¹, Д.А. Галкин²,
А.С. Зайцев³, Д.В. Зезюлин¹, В.С. Макаров¹

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВОРОТА МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва²,
ООО «Военно-инженерный центр»³

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований силового (бортового) способа поворота многоосной колесной машины на различных опорных поверхностях. Проанализировано влияние возможных вариантов конструкционной конфигурации ходовой части многоосной колесной машины на величину момента сопротивления повороту. В соответствии с проведенными экспериментальными исследованиями сделан ряд выводов о выборе рациональных параметров пневмоколесных движителей с точки зрения повышения эффективности использования исследуемых машин. Приводятся зависимости потребной мощности двигателя исследуемой машины от относительного радиуса поворота. Представленный экспериментальный материал будет использоваться для оценки адекватности математической модели криволинейного движения многоосной колесной машины по деформируемому опорному основанию.

Ключевые слова: силовой способ поворота, специальные многоосные транспортные средства, бездорожье, результаты экспериментальных исследований

Наблюдаемый в последнее время процесс усиленного развития специальных колесных машин вызван возросшими требованиями к подвижности сухопутных войск и значительным прогрессом в области их конструирования [1-3]. Наибольшее внимание уделяется вопросам повышения проходимости и маневренности [5-7]. В рамках данной статьи приводятся результаты экспериментальных исследований силового способа поворота многоосной колесной машины ГПИ-3901.

Данная машина была создана для исследований ОНИЛВМ НГТУ в рамках хозяйственных договоров с «ВНИИТРАСМАШ» (Санкт-Петербург) в период с 1982 г. по 1989 г. До 1983 г. работы велись под общим руководством научного руководителя лаборатории вездеходных машин С.В. Рукавишникова, а затем под руководством Л.В. Барахтанова. Экспериментальные исследования опорной проходимости машины ГПИ-3901 были проведены при участии сотрудников ОНИЛВМ Белякова В.В., Козлова В.С., Курнева В.И., Масленникова В.А. [8-10, 12].

Макет имеет регулируемую ходовую часть, позволяющую в широких пределах изменять как колесную формулу машины (4x4, 6x6, 8x8), так и отношение базы к колее (LB_M^{-1}). Возможные значения этого отношения приведены в табл. 1. На рис. 1 представлены некоторые варианты изменения ходовой части макета ГПИ 3901.

Таблица 1

Возможные значения колесной формулы и коэффициента базы ГПИ-3901

Колея B_M , мм	Колесная формула									
	8x8		6x6						4x4	
	Отношение LB_M^{-1} при базе L , мм									
	4350	3800	4350	3965	3471	3000	2900	2543	4350	3800
2550	1,70	1,49	1,70	1,55	1,36	1,18	1,13	0,99	1,70	1,49
2710	1,60	1,40	1,60	1,46	1,28	1,11	1,07	0,94	1,60	1,40
2940	1,47	1,28	1,47	1,34	1,18	1,02	0,98	0,86	1,47	1,28

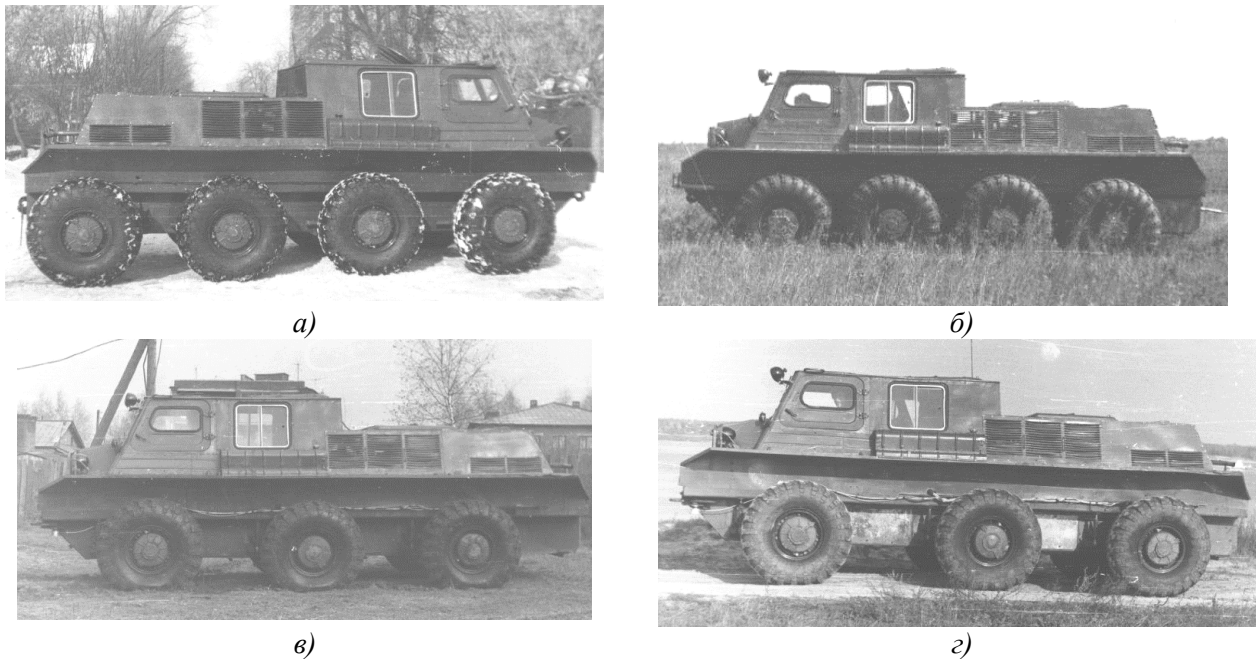


Рис. 1. Некоторые из возможных вариантов ходовой части макета ГПИ-3901:
 а – 8x8, $LB_M^{-1}=1,71$; б – 8x8, $LB_M^{-1}=1,49$; в – 6x6, $LB_M^{-1}=1,31$; г – 6x6, $LB_M^{-1}=1,49$

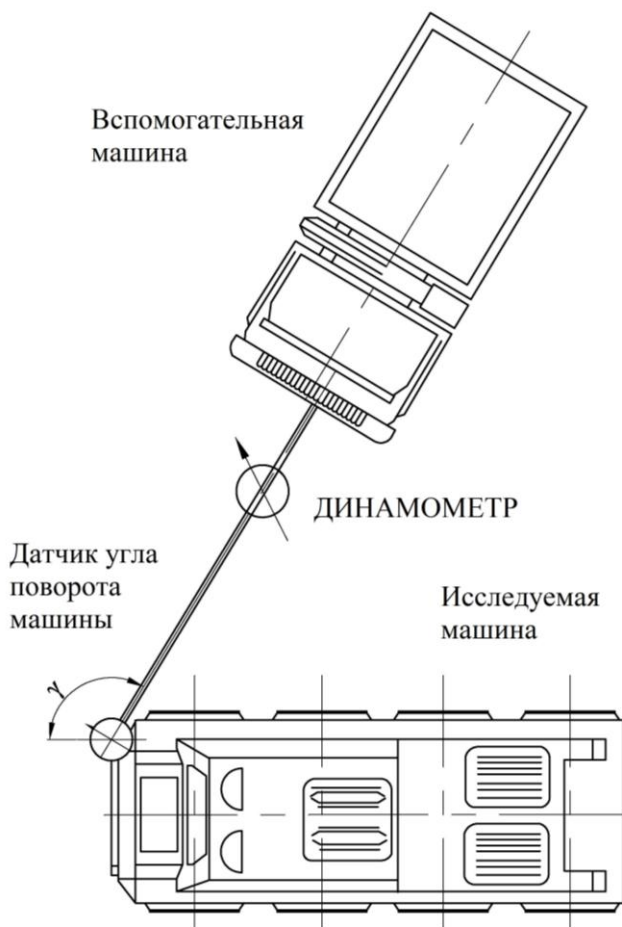


Рис. 2. Определение силы сопротивления боковому сдвигу и угол поворота исследуемой машины

Колеса (или гусеницу) забегающего борта отключают от двигателя. После каждого разворота

Наиболее важным параметром, характеризующим взаимодействие двигателя машины с грунтом при повороте, является боковой сдвиг. Величина усилия бокового сдвига макета ГПИ-3901 и сравниваемой (сравнимой) гусеничной машины ГАЗ-71 производилась на асфальте, песке, дерне и снежной целине (табл. 2).

Рассмотрим основы методики исследовательских испытаний по определению усилия бокового сдвига. В исходном положении исследуемая машина и буксировщик расположены так, что трос с динамометром расположен под углом 60° к продольной оси исследуемой машины и параллелен продольной оси буксировщика (рис. 2). Запись усилий для динамометра производится при плавном (без рывков) развороте исследуемой машины (буксируемой вбок другой машиной) до положения, когда трос с динамометром станет под углом 90° к продольной оси исследуемой машины.

Во время разворота колеса отстающего борта исследуемой машины (борта, в сторону которого происходит поворот) полностью затормаживаются.

исследуемая машина и тягач переезжают на новый (без колеи) участок и становятся в исходном положении. При замерах усилия бокового сдвига исследуемой машины делается по 25-30 замеров. Расчет сдвигающего усилия производится по методу средних величин.

Анализ экспериментальных данных позволяет отметить следующее. На прочных и твердых грунтах момент сопротивления повороту колесной и гусеничной машины определяется силами трения опорной поверхности движителя о грунт, соотношением L/B, числом и расположением опорных катков или колес, а также величинами нагрузок на них. На деформируемых грунтах на величину момента сопротивления повороту колесной машины помимо указанных факторов большое влияние оказывает также боковое нагребание грунта движителем.

Таблица 2

Величины коэффициентов бокового сдвига (μ) при движении макета ГПИ-3901 и машины ГАЗ-71 в различных условиях

Колесная формула макета	L/B	Давление воздуха в шинах, МПа	Условия движения			
			Асфальт	Дерн	Песок	Снег
8x8	1,7	0,25	0,222	0,65	0,13	0,35
	1,5	0,25	0,135	0,42	0,41	0,25
		0,05	---	0,57	0,31	0,22
6x6	1,7	0,25	---	0,55	0,481	---
		0,05	---	0,66	0,41	---
	1,5	0,25	---	0,416	0,43	---
		0,05	---	0,462	0,35	---
	1,36	0,25	---	0,13	0,38	---
		0,05	---	0,15	0,29	---
Гусеничная машина	1,71	---	---	0,87	0,60	0,37



а)



б)

Рис. 3. Фрагменты испытаний ГПИ-3901 в условиях полигона:
а – исследования бокового сдвига; б – исследование маневровых свойств

Поворотливость колесной машины на деформируемых грунтах может быть улучшена за счет уменьшения коэффициента базы L/B. Исследования макета ГПИ-3901 на асфальте и песке показали, что независимо от колесной формулы уменьшение коэффициента базы с 1,7 до 1,5 ведет к снижению величины коэффициента сопротивления боковому сдвигу на 10-15%.

При сохранении постоянными массы машины и соотношения L/B изменение колесной формулы влияет на величину момента сопротивления повороту. Исследование макета с колесными формулами 6x6 и 8x8 показали, что при увеличении числа колес величина коэффициента сопротивления боковому сдвигу увеличивается \approx на 10-15%.

Снижение давления воздуха в шинах по разному влияет на момент сопротивления повороту. На деформируемых грунтах это ведет к уменьшению деформации грунта под колесами и нагребания его боковой частью колес. На твердых грунтах из-за возрастания сил сцепления колеса с полотном пути момент сопротивления повороту может несколько увеличиться. Исследования макета показали, что при снижении давления воздуха в шинах с 0,25 до 0,05 МПа величина коэффициента бокового сдвига на песке уменьшилась \approx на 16% (рис. 4), в то время как на асфальте она осталась практически постоянной.

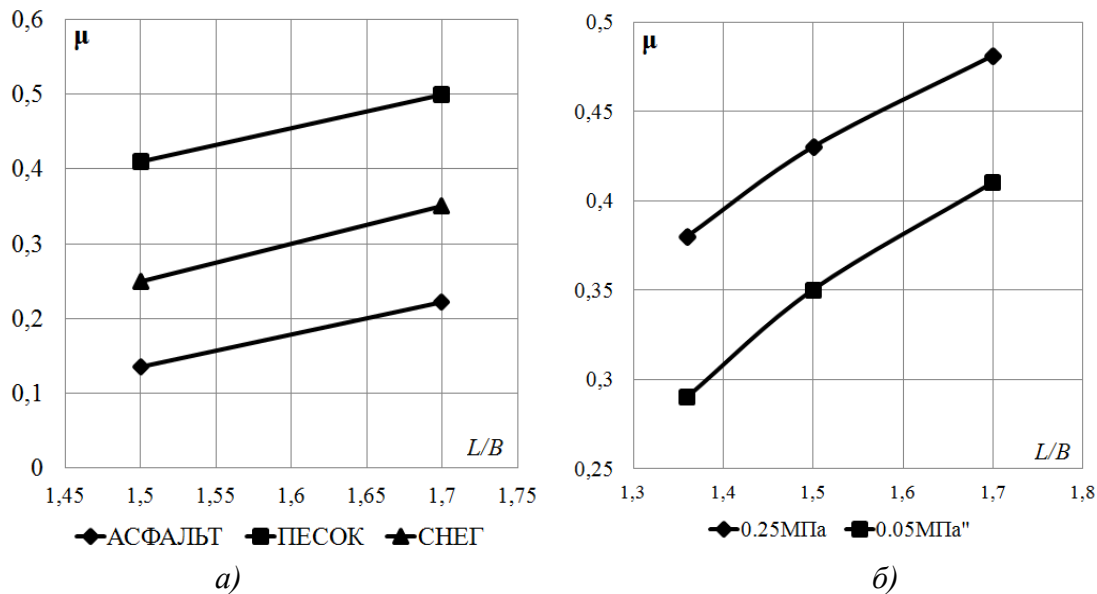


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления боковому сдвигу машины от коэффициента базы:
 а – ГПИ-3901 8x8, $p_w=0,25$ МПа; б – ГПИ-3901 8x8, опорное основание – песок

Важнейшей задачей при разработке многоосных колесных машин высокой проходимости является снижение энергетических затрат, необходимых для движения по деформируемой опорной поверхности. Далее приводятся результаты экспериментальных исследований по определению потребной мощности двигателей ходового макета ГПИ-3901 в зависимости от радиуса поворота.

Во время исследований двигатели макета работали в режиме раздельного привода бортов и макет двигателя с небольшой скоростью по мерному участку с различными фиксированными радиусами поворота. При этом замерялись мощности на колесах отстающего и забегающего бортов машины, частоты вращения колес, а также скорость движения самого макета.

По результатам исследований составлены графики зависимости затрат мощности от радиуса поворота макета, примеры которых приведены на рис. 5-7. В результате анализа приведенных данных необходимо отметить, что на прочных и твердых грунтах высокие значения силы тяги по сцеплению и сравнительно низкие значения силы сопротивления движению колесной и гусеничной машины обеспечивают возможность бортового поворота их с любыми радиусами, включая и $R=0,5B$. Поворотливость колесной и гусеничной машин в этих условиях примерно одинакова.

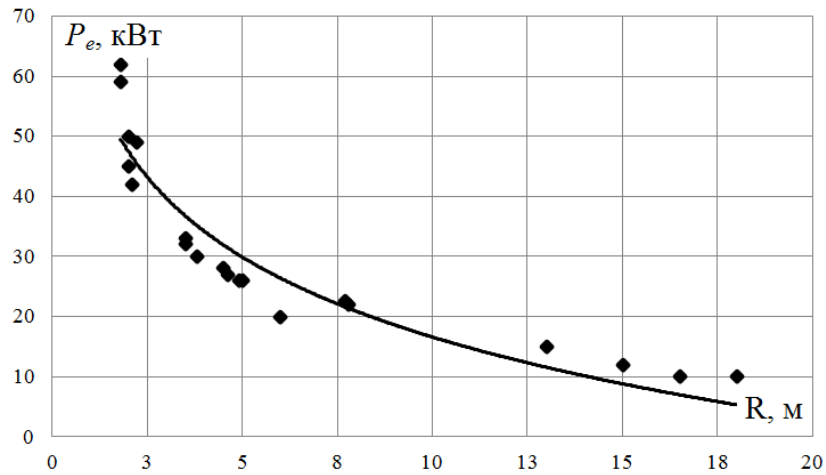


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности двигателя ходового макета (8x8; $L/B=1,5$; $p_w=0,25$ МПа) от относительного радиуса поворота при движении на дерне

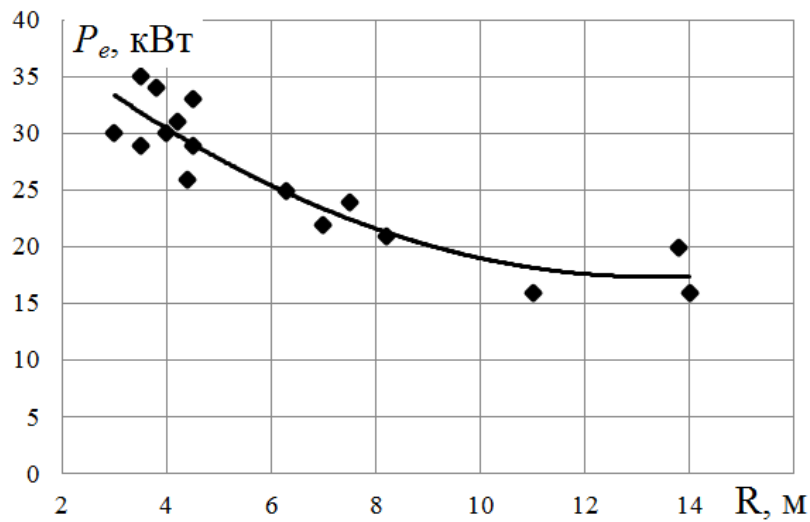


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности двигателя ходового макета (6x6; $L/B=1,5$; $p_w=0,25$ МПа) от относительного радиуса поворота при движении на дерне

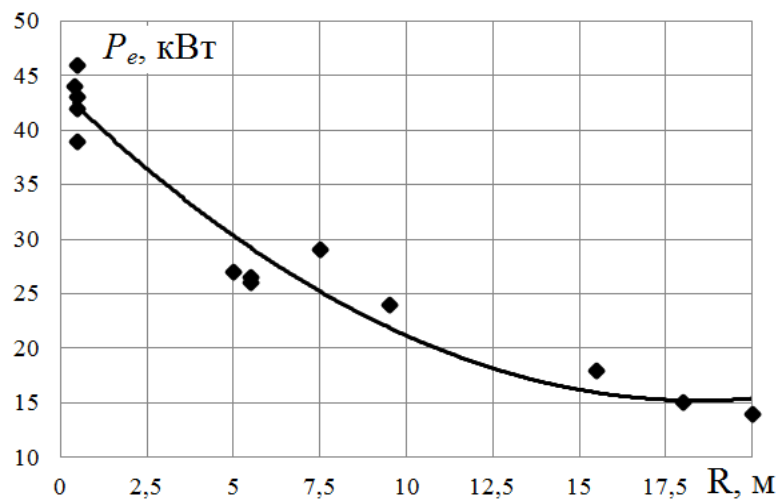


Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности двигателя ходового макета (8x8; $L/B=1,5$; $p_w=0,25$ МПа) от относительного радиуса поворота при движении по снегу

На деформируемых грунтах поворотливость гусеничной машины лучше поворотливости колесной. Причина этого в том, что запас силы тяги и поворачивающий момент колесной машины меньше, чем гусеничной. На деформируемых грунтах силовой поворот колесной машины сопровождается сильным буксованием колес забегающего с юзом колес отстающего борта. Буксование вызывает закапывание колес в грунт и увеличение момента сопротивления поворота за счет бокового нагребания грунта движителем. Величина буксования и юза тем больше, чем меньше коэффициент сцепления колес с грунтом и радиус поворота машины.

Снижение давления воздуха в шинах макета ведет к улучшению его поворотливости, что связано с повышением эластичности шин, их бокового увода и улучшения сцепления с грунтом. При этом уменьшается буксование и закапывание колес в грунт, угол и интенсивность поворота машины возрастают.

С увеличением скорости движения поворотливость колесной машины улучшается, так как при этом момент сопротивления преодолевается не только за счет сил, создаваемых движителем, но и силы инерции самой машины.

Исследования показали, что при переходе макета (8×8 $L/B=1,57$) от прямолинейного движения на второй передаче к повороту с $R=B$ даже на снежной целине сразу достигался угол поворота на $90-180^\circ$, чего при статическом повороте никогда не получалось. На песке величина этого угла достигала $60-90^\circ$. Поворачиваемости колесной и гусеничной машины при этом сравниваются.

Затраты мощности на поворот резко возрастают с уменьшением радиуса поворота машины (рис. 5–7). Например, для поворота макета (8×8 $L/B=1,5$ и $p_w=0,25$ МПа) на дерне с радиусом поворота $R=0,5B$ необходима мощность 2×70 кВт. При $R=4B$, $8B$ и $20B$ значение этой мощности уменьшается соответственно в 2,6, 4 и 8 раз.

Таким образом, с использованием представленного экспериментального материала будет производиться оценка адекватности разрабатываемой в настоящее время математической модели криволинейного движения многоосной колесной машины по деформируемому опорному основанию, которая станет теоретической основой для выбора рациональных параметров шасси исследуемых транспортных средств, обеспечивающих максимальные показатели их энергетической эффективности [4, 11].

Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. №3. С. 162–170.
2. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 156–166.
3. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №1 С. 143–151.
4. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности работы транспортной системы // В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Ю.И. Молев // Приволжский научный журнал. 2010. № 4. С 214–219.
5. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Беляков, В.С. Макаров / Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №7. С. 24–26.
6. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3; URL: www.science-education.ru/103-6376 (дата обращения: 05.06.2012).
7. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.С. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. №1. С. 82–87.
8. Вездеходные транспортно-технологические машины / под редакцией В. В. Белякова, А. П. Куляшова. – Н. Новгород.: ТАЛАН, 2004. – 960 с.

9. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2010. Вып. 12 - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/164456.html>, свободный.
10. Гончаров К., Макаров В., Беляков В. Проходимость многоосных колесных машин по снегу. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 220 с.
11. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5; URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 17.09.2012).
12. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. –161 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

**L.V. Barakhtanov¹, V.V. Belyakov¹, D.A. Galkin²,
A.S. Zaytsev³, D.V. Zezyulin¹, V.S. Makarov¹**

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ROTATION OF MULTI-AXIS WHEELED VEHICLES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Ltd. «Military Industrial Company», Moscow²,
Ltd. «The military engineering centre»³

Subject/topic/purpose: Experimental investigations of the power (skid-steering) method of rotation of multi-axis wheeled vehicles.

Methodology of work: Assessing the impact of different variants of structural configuration of the chassis on the values of the required engine power and torque resistance of multi-axis wheeled vehicles.

Results/application: The results are important for the activity of research laboratories and automotive companies involved in the design of multi-axis wheeled vehicles. The experimental material will be used to assess the adequacy of mathematical model of curvilinear motion of the multi-wheeled vehicle on deformable grounds.

Findings: The number of recommendations about the choice of rational parameters of wheels in terms of efficient use of multi-axis wheeled vehicles was proposed.

Key words: skid-steering, special multi-axis wheeled vehicles, terrain, results of measurements.

УДК 629:113

С.М. Огороднов, С.Г. Синичкин

**РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ С ШАГОВЫМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены конструктивные типы шаговых электрических двигателей, приведена характеристика, устанавливающая требования к параметрам выбираемого двигателя в соответствии с действующей внешней нагрузкой. Определены составляющие внешней нагрузки с учетом инерционных сил, действующие при повороте управляемых колес двухосного автомобиля. Получены выражения величины вращающего момента шагового двигателя, используемого в качестве усилителя рулевого управления с винтовыми и реечными рулевыми механизмами.

Ключевые слова: : расчет, рулевое управление, усилитель, шаговый электродвигатель, внешняя нагрузка, суммарный момент, винтовой механизм, реечный механизм, момент электродвигателя

Шаговый электрический двигатель (ШЭД) является синхронным импульсным электродвигателем, в котором импульсы тока, подаваемые в обмотки возбуждения статора, преобразуются в дискретные угловые перемещения ротора. Вращающий момент создается магнитными потоками статора и ротора, соответствующим образом относительно ориентированными. Полюса имеют как статор, так и ротор. Вращающий момент пропорционален величине магнитного поля и зависит от параметров обмоток и тока. Если хотя бы по одной из обмоток течет ток, ротор принимает определенное положение и находится в этом положении, пока внешний момент не превысит некоторого значения, называемого моментом удержания. После этого ротор повернется до одного из следующих положений равновесия.

Для питания ШЭД недостаточно источника постоянного тока. Коммутации обмоток выполняются специальным управляющим устройством (коммутатором). Импульсы тока формируются коммутатором и поочередно поступают в обмотки статора, при этом ориентация магнитного потока в пространстве между полюсами статора дискретно меняется и вызывает поворот ротора на определенный угол (шаг) ротора. ШЭД обеспечивает полный момент в режиме остановки (при питании обмоток), прецизионное позиционирование и повторяемость. Точность позиционирования может составлять 3...5% от величины шага, а ошибка не копится от шага к шагу. ШЭД обеспечивают возможность быстрого старта и остановки, реверсирования, при отсутствии коллекторного узла обладают высокой долговечностью, определяемой практически долговечностью подшипников. Однозначная зависимость положения ротора от входных импульсов обеспечивают его позиционирование без использования в системе управления элементов обратных связей, возможность вращения ротора с очень низкими скоростями, пропорциональными частоте управляющих импульсов и при значительной нагрузке, действующей непосредственно на вал двигателя, без применения специальных редукторов.

ШЭД обладают уникальными свойствами, что делает их в отдельных случаях исключительно удобными для применения в приводах машин и механизмов, работающих в режиме непрерывного движения при управляющем воздействии, заданном последовательностью электрических импульсов, или в режиме «старт-стоп».

Привод с ШЭД наилучшим способом подходит для автоматизации работы узлов, механизмов и систем где не требуются большая мощность, высокие динамические показатели и одновременно обеспечиваются требования к точности позиционирования и угловой скорости вращения вала. По сравнению с коллекторными двигателями, ШЭД в среднем в 1,5-2 раза

дешевле, обеспечивают более высокий момент на низких оборотах при одинаковой массе, проще в управлении. Известны три основных типа ШЭД: с переменным магнитным сопротивлением, с постоянными магнитами и гибридный.

ШЭД с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы, рис. 1, *а*. При подаче тока в одну из катушек, зубцы ротора займут положение напротив полюсов, в обмотке которых течет ток, а магнитный поток замкнут. Для создания непрерывного движения необходимо последовательно подавать ток в обмотки соседних полюсов. Реальный двигатель имеет большое количество зубцов ротора и зубчатую поверхность каждого полюса статора, что обеспечивает уменьшение угла поворота одного шага. Использование ШЭД с переменным магнитным сопротивлением в промышленности ограничено.

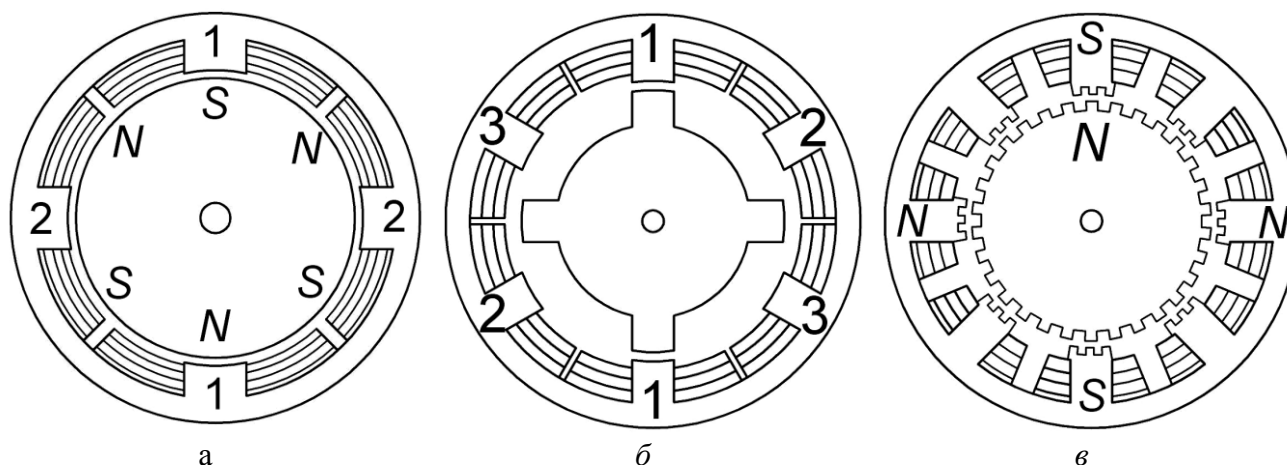


Рис. 1. Основные типы ШЭД:

а – с переменным магнитным сопротивлением; *б* – с постоянными магнитами;
в – гибридный

ШЭД с постоянными магнитами имеют статор с обмотками и ротор с постоянными магнитами, рис. 2, *б*. Полюса ротора расположены параллельно оси двигателя, имеют прямоугольную форму и чередуются. Вследствие намагниченности ротора обеспечивается большой магнитный поток и при других равных условиях больший, чем в двигателях с переменным магнитным сопротивлением, момент. При подаче тока в одну из катушек, ротор занимает положение, при котором разноименные полюса ротора и статора находятся напротив. Для непрерывного движения необходимо попеременно подавать ток в смежные обмотки. Влияние обратной ЭДС ротора ограничивает скорость его вращения.

Гибридные ШЭД сочетают лучшие свойства двух рассмотренных типов ШЭД. Являясь наиболее дорогими, обеспечивают меньший шаг, большие моменты и скорость. Ротор гибридного двигателя, рис. 3, *в*, имеет зубцы, расположенные в осевом направлении и разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Зубцы одной половины ротора являются северными, другой – южными полюсами. Верхняя часть ротора повернута относительно нижней части на половину шага зубца. Число пар полюсов ротора равно числу зубцов на одной из частей. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, что обеспечивает количество эквивалентных полюсов большее, чем количество полюсов, на которых расположены обмотки. Кроме того зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора и увеличение статического и динамического моментов двигателя. Зависимость количества полюсов ротора, эквивалентных полюсов статора и фаз определяет угол шага двигателя

$$s = \frac{360}{n_{ph} p_h} = \frac{360}{n}, \quad (1)$$

где s – шаг двигателя, n_{ph} – количество эквивалентных полюсов одной фазы (количество полюсов ротора), p_h – число фаз, n – количество полюсов всех фаз.

Например, для гибридного двигателя с ротором, имеющим 100 полюсов (50 пар полюсов) и две фазы, полное количество полюсов $n = 200$, а шаг двигателя равен 1,8 градуса.

Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. Способы управления такими двигателями обеспечивают работу в полушаговом режиме, при котором угол поворота ротора составляет 1/2 полного шага, а некоторые системы управления обеспечивают микрошаговый режим работы с величиной шага от 1/3 полного шага до 1/32 и даже меньше. В пределе шаговый двигатель может работать как синхронный электродвигатель в режиме непрерывного вращения. Для этого токи его фаз должны быть синусоидальными и сдвинутыми на 90 градусов.

Характеристика ШЭД отражает изменение момента ротора от скорости его вращения, рис.2. Кривая 1 (кривая старта) показывает, при каком максимальном моменте сопротивления для данной угловой скорости ротор двигателя может повернуться. Кривая 1 пересекает ось скоростей в точке ω_{cmax} , называемой максимальной частотой старта (частота приемистости). Эта точка соответствует максимальной скорости старта для двигателя в отсутствие внешней нагрузки.

На практике может быть обеспечена скорость, соответствующая 200-500 полных шагов в секунду. Сопротивление внешней нагрузки и особенно его инерционная составляющая в значительной степени влияет на вид кривой 1 характеристики момента двигателя. Чем больше момент инерции нагрузки, тем меньше область I (область старта) и максимальная скорость старта при заданном моменте $T_{уд}$ удержания ротора.

Кривая 2 (кривая разгона) показывает, при каком максимальном моменте сопротивления от внешней нагрузки и заданной скорости вращения ротора, двигатель способен поддерживать вращение без пропусков шагов. Кривая 2 пересекает ось скоростей в точке ω_{max} , соответствующей максимальной скорости двигателя в отсутствие внешней нагрузки. Область II, находящаяся между кривыми 1 и 2, называется областью разгона и отражает взаимосвязь, требуемого по условиям работы привода момента двигателя и реализуемой максимальной скоростью. Следует отметить, что кроме параметров двигателя и составляющих внешней нагрузки на характер рассмотренных кривых влияют и конструктивные особенности системы управления и алгоритма управления работой двигателя.

Шаговые двигатели могут быть использованы как усилители рулевого управления

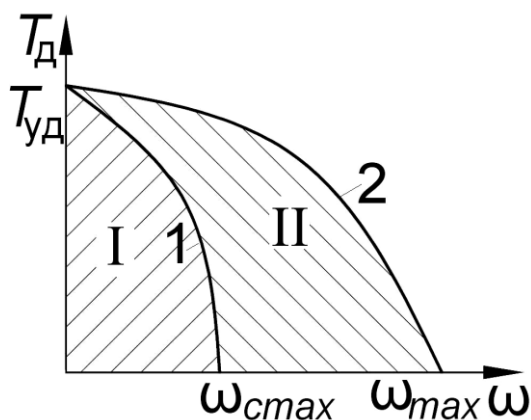


Рис. 2. Характеристика ШЭД

без дополнительных механических редукторов. Ротор ШЭД монтируется непосредственно на валу рулевого механизма или рулевого колеса, а статор крепится к корпусу редуктора рулевого механизма или к кузову (раме) автомобиля. Предложенная кинематическая схема позволяет упростить конструкцию рулевого управления и снизить его стоимость, но особенности работы шаговых двигателей предъявляют жесткие требования к согласованию параметров выбираемого двигателя с заданной нагрузкой. В разомкнутых системах дискретного привода пропуск двигателем одного управляющего импульса приводит к ошибке преобразования электрического сигнала управления в угол поворота ротора и снижает точность процесса управления работой привода.

Кроме потерь энергии на трение, реальные конструкции приводов обладают инерцией. Момент инерции привода влияет на характер изменения скорости вращения ротора и величины моментов двигателя в режимах разгона и торможения, ограничивая максимальное

угловое ускорение и угловую скорость ротора. При выборе ШЭД необходимо, кроме выбора величин электрических параметров системы управления и обмоток, для построения характеристики моментов ротора при старте и разгоне определить вид и величины действующих факторов внешней нагрузки при различных режимах работы привода. Технические характеристики ШЭД согласуются с требованиями нормативных документов в отношении рулевого управления автотранспортных средств (АТС).

В некоторых случаях, из соображений безопасности движения АТС, водитель вынужден реализовать управляющие воздействия на рулевое колесо с максимально возможной скоростью. Характер управляющего воздействия водителя на рулевое колесо в основном определяется следующими параметрами: углом поворота, ускорением, скоростью поворота и усилием поворота рулевого колеса. Динамический режим работы рулевого управления определяет характер и параметры движения АТС не только в процессе подачи управляющего воздействия, но и по истечении некоторого времени с момента его завершения. Виды траекторий движения при выполнении маневров и требования к автомобилям в части устойчивости и управляемости установлены ГОСТ Р 52302-2004, распространяющимся на АТС категорий *M*, *N* и *O*. Оценка устойчивости и управляемости выполняется при испытаниях «рывок руля, поворот, переставка, прямая, пробег». Требования к проведению указанных испытаний устанавливают допустимые характеристики и параметры движения АТС и некоторые требования к параметрам рулевого управления.

Усилие на рулевом колесе не должно превышать значений, указанных в [1, п. 4.1]. Анализируя приведенные значения усилий можно установить, что усилие на рулевом колесе, создаваемое за счет работы усилителя, в зависимости от категории АТС, может меняться в диапазоне 100-140 Н для неподвижного автомобиля и 100-250 Н для движущегося автомобиля.

Минимальное значение угловой скорости поворота рулевого колеса устанавливается в соответствии с [1, п. 5.6] требований к испытанию «рывок руля». При этих испытаниях рулевое колесо должно быть повернуто с угловой скоростью не менее $400^0/\text{с}$ ($7\text{рад}/\text{с}$) в заданное положение.

Расчет суммарного момента сопротивления повороту управляемых колес автомобиля необходим для определения усилий, приведенных к валу рулевого колеса. Для двухосного автомобиля с передними управляемыми колесами, суммарный момент сопротивления повороту колес неподвижного автомобиля определяется действием моментов сопротивления повороту колес, трением в приводе рулевого управления и инерцией колес и частей привода.

$$T_{\kappa} = T_{\Pi} + T_{\tau} + T_j, \quad (2)$$

где T_{κ} – суммарный момент сопротивления повороту управляемых колес, T_{Π} – момент сопротивления повороту управляемых колес, T_{τ} – момент трения в приводе рулевого управления, T_j – инерционный момент колес и частей привода.

Для практических расчетов, с учетом малых значений величин, углами развала и продольного наклона оси поворота колеса можно пренебречь. Момент сопротивления повороту колес T_{Π} обусловлен деформацией шины и её скольжением в пятне контакта с опорной поверхностью, перекачиванием шины с сопротивлением по опорной поверхности, поперечным наклоном оси поворота управляемого колеса. Момент сопротивления повороту колес может быть определен в соответствии с выражением

$$T_{\Pi} = T_f + T_{\phi} + T_s, \quad (3)$$

где T_{Π} – суммарный момент сопротивления повороту колеса, T_f – момент сопротивления перекачиванию колеса при повороте, T_{ϕ} – момент сопротивления, обусловленный упругой деформацией и трением шин об опорную поверхность, T_s – момент сопротивления, обусловленный поперечным наклоном оси поворота колеса (стабилизирующий момент).

Поворот колес сопровождается качением каждого из управляемых колес по определенной траектории. С учетом принятых допущений, момент сопротивления качению каждого колеса равен, рис. 3.

$$T_f^k = F_l f (l \cos \alpha - r_{cm} \sin \alpha), \quad (4)$$

где T_f^k – момент сопротивления перекачиванию колеса при повороте, F_l – сила веса, приходящаяся на управляемое колесо, f – коэффициент сопротивления качению, l – длина цапфы, $r_{ст}$ – статический радиус колеса, η_1 – КПД поворотного узла, α – угол поперечного наклона оси поворота.

Суммарное значение момента сопротивления качению, приведенное к левому колесу равно:

$$T_f = T_f^l + T_f^n = \frac{F_l f (\cos \alpha - r_{cm} \sin \alpha)}{\eta_1} \left(1 + \frac{1}{u_2 \eta_2} \right), \quad (5)$$

где T_f – суммарный момент сопротивления качению управляемых колес, T_f^l, T_f^n – моменты сопротивления качению левого и правого колеса, u_2 – передаточное число привода от правого к левому колесу, η_2 – КПД рулевого привода от правого к левому колесу.

Для расчета момента T_ϕ используют эмпирические выражения [3,4,5,6]. В работе [3] отмечено, что хорошо согласуются с результатами эксперимента расчет момента сопротивления от упругой деформации и трения шины по формуле

$$T_\phi^k = (0,375 F_l \varphi \sqrt{S_{ш}}) / \eta_1, \quad (6)$$

где T_ϕ^k – момент сопротивления от упругой деформации и трения шины колеса, φ – коэффициент сцепления шины с опорной поверхностью, $S_{ш}$ – площадь пятна (отпечатка) контакта шины с опорной поверхностью,

Суммарное значение момента сопротивления от упругой деформации и трения шин, приведенное к левому колесу может быть записано в виде:

$$T_\phi = T_\phi^l + T_\phi^n = \frac{0,375 F_l \varphi \sqrt{S_{ш}}}{\eta_1} \left(1 + \frac{1}{u_2 \eta_2} \right), \quad (7)$$

где T_ϕ – суммарный момент сопротивления от упругой деформации и трения шин управляемых колес, T_ϕ^l, T_ϕ^n – моменты сопротивления от упругой деформации и трения шин левого и правого колес.

Стабилизирующий момент, создаваемый за счет поперечного наклона оси поворота колеса, рассчитывается с учетом сил, действующих на поворотные узлы левого и правого колес. Стабилизирующие моменты каждого из колес определяются из следующих соображений. Считаем, что при малых значениях, углы поворота правого и левого колеса равны. При повороте колеса относительно оси, центр колеса – точка O , пересечения вертикальной плоскости симметрии колеса и оси цапфы, смещается по дуге окружности, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси поворота и наклоненной относительно опорной поверхности на угол α , рис. 4. Одновременно точка O смещается относительно опорной поверхности вертикально. Это приводит к изменению высоты расположения центра масс АТС и появлению стабилизирующего момента, возвращающего колесо в положение прямолинейного движения. Для определения стабилизирующего момента сила F_l переносится вдоль направления действия до пересечения оси цапфы с плоскостью симметрии колеса – точка O . Разложим силу F_l на два направления – параллельно оси поворота управляемого

колеса F_{11} и перпендикулярно оси F_{12} . Составляющая F_{12} для прямолинейного положения колес направлена вдоль оси цапфы, рис. 5.

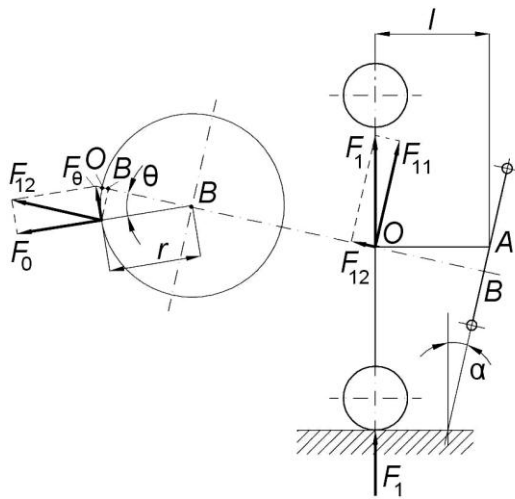


Рис. 3. Определение сил и моментов, действующих на колесо при повороте

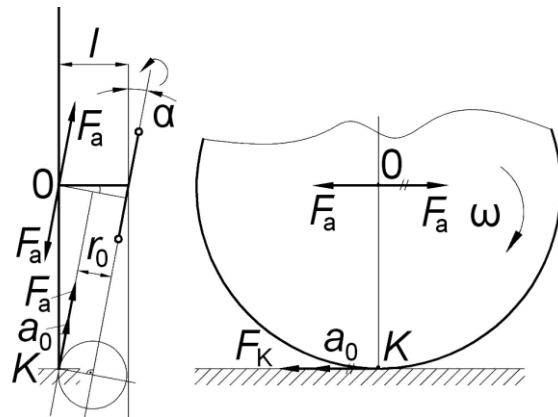


Рис. 4. Определение линейных и угловых ускорений т. К

При повороте колеса на угол θ составляющая F_{12} реакции сохраняет положение в пространстве, а угол между направлением силы и осью цапфы равен θ .

Для указанного положения колеса разложим силу F_{12} на два направления – вдоль оси цапфы F_0 и перпендикулярно оси F_θ . Сила F_θ создает стабилизирующий момент, равный

$$T = F_\theta r = \frac{(F_1 l \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta)}{\eta_1}, \quad (8)$$

где T_s^k – стабилизирующий момент колеса, r – проекция длины цапфы на плоскость перемещения центра колеса, l – длина цапфы, θ – угол поворота колеса.

Суммарное значение стабилизирующего момента, приведенное к левому колесу, может быть записано в виде:

$$T = T_s^n + T_s^n = \frac{F_1 l \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta}{\eta_1} \left(1 + \frac{1}{u_2 \eta_2}\right), \quad (9)$$

где T_s – суммарное значение стабилизирующего момента, T_s^n, T_s^n – стабилизирующие моменты левого и правого колес.

Для рулевых управлений с винтовыми рулевыми механизмами рулевой привод конструктивно достаточно сложен. Моменты инерции и массы колес и частей рулевого привода влияют на величину суммарного момента сопротивления повороту колес T_n . Сравнивая массы тяг и колес, вместе с деталями поворотных устройств, в целях упрощения расчетов, допустимо считать влияние ускоренно движущихся масс тяг и их моментов инерции на величину инерционных моментов существенно меньшим, чем влияние ускоренно движущихся масс и моментов инерции колес вместе с деталями поворотного устройства. С учетом выказанного предположения определим инерционные составляющие момента сопротивления повороту колес. Считая, что угловое ускорение точки O относительно оси поворота равно ε_o , а момент инерции массы колеса, относительно указанной оси равен J_o , момент сопротивления повороту колеса, обусловленный указанными факторами, определяется из выражения

$$T_o^k = J_o \varepsilon_o = \frac{J_o \varepsilon}{u_3 u_4}, \quad (10)$$

где T_o^k – инерционный момент сопротивления повороту вследствие ускоренного вращения цапфы относительно оси поворота, J_o – момент инерции колеса относительно оси поворота, ε_o – угловое ускорение точки O колеса относительно оси поворота, ε – угловое ускорение вала рулевого колеса, u_3 – передаточное число привода рулевого управления от сошки рулевого механизма к поворотному рычагу, u_4 – передаточное число рулевого механизма. Суммарное значение инерционного момента сопротивления повороту колес равно

$$T_o = \frac{J_o \varepsilon}{u_3 u_4} \left(1 + \frac{1}{u_2 \eta_2}\right), \quad (11)$$

где T_o – инерционный момент сопротивления повороту вследствие ускоренного вращения колес относительно оси поворота, T_o^n, T_o^l – инерционные моменты сопротивления повороту правого и левого колеса относительно оси поворота.

Одновременно колесо ускоренно вращается вокруг цапфы за счет силы, возникающей в контакте с опорной поверхностью при повороте. Представив колесо в виде плоского диска, рис. 4, определим линейное ускорение точки K контакта колеса с опорной поверхностью, одновременно вращающейся в плоскости колеса и перемещающейся по дуге окружности в плоскости перпендикулярной оси поворота.

$$a_o = \varepsilon_o r_o, \quad (12)$$

где a_o – линейное ускорение точки K , r_o – радиус окружности вращения точки K в плоскости перпендикулярной оси поворота, $r_o = l \cos \alpha - r_{ct} \sin \alpha$.

Угловое ускорение колеса определяется из условия равенства линейных ускорений при перемещениях точки K в плоскости диска и плоскости, перпендикулярной оси поворота, и равно

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_o r_o}{r_{cm}} = \frac{\varepsilon r_o}{r_{cm} u_3 u_4}, \quad (13)$$

где ε_k – угловое ускорение колеса при вращательном движении.

Сила, действующая на колесо со стороны опорной поверхности, направлена по касательной к диску и равна

$$F_a = \frac{T_b}{r_{cm}} = \frac{J_k \varepsilon_k}{r_{cm}} = \frac{J_k \varepsilon r_o}{r_{cm} u_3 u_4}, \quad (14)$$

где F_a – сила, действующая на колесо со стороны опорной поверхности при вращении с ускорением, T_b – момент сопротивления повороту при ускоренном вращении колеса, J_k – момент инерции колеса относительно оси цапфы.

Момент сопротивления повороту колесу от силы F_a равен, рис. 6,

$$T_a^k = F_a l \cos \alpha = \frac{J_k \varepsilon r_o l \cos \alpha}{\eta_1 u_3 u_4 r_{cm}}. \quad (15)$$

Суммарное значение момента сопротивления повороту колеса от силы F_a , приведенного к левому колесу равно

$$T_a = T_a^n + T_a^l = \frac{J_\kappa \varepsilon r_o l \cos \alpha}{\eta_1 u_3 u_4 r_\partial} \left(1 + \frac{l}{u_2 \eta_2} \right), \quad (16)$$

где T_a – момент сопротивления повороту колеса при ускоренном вращении относительно оси цапфы, T_a^n , T_a^l – моменты сопротивления повороту правого и левого колес при ускоренном вращении относительно оси цапфы.

Требуемый момент T_d шагового двигателя при вращении ротора (вала рулевого колеса) с угловым ускорением ε определяется из закона сохранения энергии. Для системы «привод с ШЭД–нагрузка» закон сохранения энергии при повороте ротора на 0,5 шага записывается в виде

$$T_o \varphi = T_o^{np} + T_o^{np} \varphi + T_m^{np} \varphi + T_m \varphi - T_y \varphi, \quad (17)$$

где T_d – момент ротора ШЭД, T_o^{np} , T_n^{np} , T_r^{np} – приведенные к валу ротора моменты: инерционный, полезной нагрузки и трения, T_m – момент сопротивления повороту ротора постоянных магнитов двигателя, T_y – момент управляющего воздействия водителя, J_{np} – приведенный момент инерции, φ – угол поворота ротора, ω – угловая скорость ротора. Момент сопротивления повороту ротора постоянных магнитов обычно не превышает 5% момента двигателя и не учитывается в последующих расчетах.

Кинетическая энергия системы определяется в соответствии с выражением

$$E = \frac{J_o \omega_o^2}{2} + \frac{J_\kappa \omega_\kappa^2}{2} + \frac{J_\partial \omega^2}{2} = \frac{J_{np} \omega^2}{2}, \quad (18)$$

где E – кинетическая энергия системы, ω_o – угловая скорость поворота колеса вокруг поворотной оси, ω_κ – угловая скорость поворота колеса вокруг оси цапфы $\omega_\kappa = \omega r_o / u_3 u_4 r_{ст}$, ω – угловая скорость вала рулевого колеса, J_d – суммарный момент инерции ротора двигателя, рулевого колеса, вала и деталей рулевого механизма, J_{np} – приведенный к валу рулевого колеса момент инерции системы.

С учетом выражения (18) приведенное значение момента инерции системы с винтовым рулевым механизмом равно

$$J_{np} = J_o + \frac{1}{(u_3 u_4)^2} (J_o + J_\kappa \frac{r_o^2}{r_\partial^2}). \quad (19)$$

Производная кинетической энергии системы по времени равна сумме мощностей внешних сил

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^n P_i = J_{np} \omega \varepsilon, \quad (20)$$

где P_i – мощности внешних сил.

Уравнение баланса мощности с учетом сделанных допущений записывается в виде

$$T_o \omega = J_{np} \omega \varepsilon + (T_m^{np} + T_n^{np} - T_y) \omega. \quad (21)$$

Величина вращающего момента двигателя определяется из выражения

$$T_{\partial} = J_{np}\varepsilon + T_m^{np} + T_n^{np} - T_y = J_{np}\varepsilon - T_y + (T_f + T_{\varphi} + T_s + T_k)/u_3u_4\eta_3, \quad (22)$$

где η_3 – КПД рулевого механизма.

Для рулевого управления с реечным рулевым механизмом расчеты моментов сопротивления повороту управляемых колес T_f , T_{φ} , T_s , T_a выполняются в соответствии с выражениями (5), (7), (9), (16). Требуемый момент T_d шагового двигателя при вращении вала рулевого колеса с угловым ускорением ε и приведенное значение момента инерции системы определяется с учетом конструктивных особенностей механизма и привода рулевого управления.

Кинетическая энергия системы с реечным рулевым механизмом определяется выражением

$$E = \frac{J_o\omega_o^2}{2} + \frac{J_k\omega_k^2}{2} + \frac{J_{\partial}\omega^2}{2} + \frac{m_pV^2}{2} = \frac{J_{np}\omega^2}{2}, \quad (23)$$

где J_d – суммарный момент инерции ротора двигателя, рулевого колеса, вала и шестерни рулевого механизма, m_p – масса рейки, V – линейная скорость рейки $V = \omega R_d$, R_d – радиус делительной окружности шестерни.

Приведенное значение момента инерции системы равно

$$J_{np} = J_{\partial} + \frac{I}{(u_3u_4)^2} (J_o + J_k \frac{r_o^2}{r_{\partial}^2}) + m_p R_{\partial}^2, \quad (24)$$

а величина вращающего момента двигателя определяется в соответствии с выражением (22).

Соотношение между угловой скоростью ротора и частотой отработки шагов двигателя устанавливается зависимостью

$$\omega = nv/2 = v/\varphi, \quad (25)$$

где ω – угловая скорость вала ротора, v – частота отработки шагов двигателя, n – количество шагов за один полный оборот ротора, φ – угол поворота ротора за один шаг.

Максимальная скорость, которая может быть достигнута к концу первого шага двигателя, равна

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2\varphi(T_{\partial} + T_y - T_n^{np} - T_m^{np})}{J_{np}}}, \quad (26)$$

ω_i – угловая скорость первого шага вала ротора двигателя.

В практических расчетах усилителей рулевого управления с ШЭД полезно учитывать электрические переходные процессы, зависящие от напряжения питания, индуктивности обмоток и способа управления двигателем. Для повышения динамичности работы необходимо подбирать ШЭД с минимальной индуктивностью. Стартовая частота ШЭД изменяется в пределах 800-1000Гц, что обеспечивает угловую скорость ротора до 15 рад/с (2-2,5 об/с) в полушаговом режиме. Исходя из этого для ШЭД, работающего в полушаговом режиме, величина ускорения не должна превышать 4 рад/с².

Библиографический список

1. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. ГОСТ Р 52302-2004. – М.: Изд-во стандартов, 2005.-17с.
2. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. пособие / В.Н. Кравец. – Н.Новгород: НГТУ, 2007. – 368 с.
3. **Чайковский, И.П.** Рулевые управления автомобилей / И.П. Чайковский. – М.: Машиностроение, 1987.– 176 с.

4. **Бухарин, Н.А.** Автомобили / Н.А. Бухарин. – М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
5. **Гинцбург, Л.Л.** Гидравлические усилители рулевого управления автомобилей / Л.Л. Гинцбург. – М.: Машиностроение, 1972. – 120 с.
6. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобилей / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 413 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

S. Ogorodnov, S. Sinichkin

DESIGN OF VEHICLE'S STEERING BOOSTER WITH STEPPER ELECTRIC MOTOR

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

Purpose: The developing of the theory of vehicle's steering booster with stepper electric motor (SEM) design.

Design/methodology/approach: The calculation theory of the steering booster with stepper electric motor (SEM) design is based on the energy conservation law and the equations of the automobiles and vehicles theory.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of technical characteristics of stepper electric motor (SEM) at the stage of design.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of vehicle's steering booster design and improvement of vehicles active safety.

Originality/value: The paper shows the equations of total antitorque moment for steerable wheels reduced to the steering-wheel shaft of two-axle vehicle. Equations include such factors as friction in steering gear, mechanism inertia, magnetic characteristics of SEM, control action force. As a result the equations of SEM torque and the maximum angular velocity for the end of the first step are indicated in accordance with the constructions there stepper motor is used as steering booster for screw or rack-and-pinion steering gears.

Key words: design, steering gear, booster, stepper electric motor, external load, total torque, screw steering gear, rack-and-pinion steering gear, electric motor torque.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 355

В.А. Васильев, И.Д. Романов, Е.А. Романова, А.Д. Романов

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК С ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ В РОССИИ И СССР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе описана история создания в СССР и России подводных лодок с воздухонезависимыми энергоустановками в период с 1900 по 2000 год. Рассмотрены схемы воздухонезависимых энергоустановок.

Ключевые слова: подводные лодки, анаэробные, воздухонезависимые энергоустановки.

Введение

Классическая дизель-электрическая энергетическая установка (ДЭЭУ) подводной лодки (ПЛ) - фактически мера вынужденная, так как вынуждают ПЛ с определенной периодичностью подниматься на поверхность, для пополнения запасов воздуха и зарядки аккумуляторных батарей. Идеальным для подводной лодки является единый двигатель для надводного и подводного хода. У лодки с ДЭЭУ в подводном положении дизель фактически становится балластом, если только лодка не использует режим работы дизеля под водой (РДП), двигаясь на перископной глубине. В надводном положении обычной ПЛ, если на ней не реализован режим электродвижения, становятся "ненужными" электромоторы и аккумуляторные батареи. Таким образом подводная лодка постоянно "возит" в себе довольно массивное, объемное и дорогостоящее оборудование, которое используется только часть времени. Учитывая приблизительно одинаковый уровень оружия и радиоэлектронного вооружения большинства ПЛ западноевропейских стран, основных поставщиков ПЛ на мировом рынке, конкурентоспособность перспективных ПЛ будет во многом определяться типом двигателя, примененного в анаэробной энергоустановке. Даже применение новейшего с точки зрения энергопотребления, оборудования и радиоэлектроники не позволяет достичь непрерывного пребывания под водой более нескольких суток. Размещение на ПЛ атмосферонезависимой энергетической установки позволяет существенно повысить время пребывания под водой и дальность подводного хода, а следовательно основное их тактическое качество – скрытность.

Работы по атмосферонезависимым энергоустановкам в России и СССР в период 1900–1930 гг.

В поисках единого двигателя были опробованы самые разнообразные устройства. Первым из них был... человек, который потреблял сравнительно мало воздуха, но в качестве двигателя оказался слишком маломощен. Идея чисто электрической подводной лодки также зашла в тупик, поскольку даже с использованием самых совершенных аккумуляторов лодка способна проплыть не более нескольких сотен миль. Постепенно конструкторы подлодок пришли к выводу, что единый двигатель следует создавать на базе мотора не подводного хода, а наоборот - надводного. Для двигателей внутреннего сгорания наметились два пути: один впоследствии привел к РДП, а другой был связан с разработкой автономной силовой установки, не нуждающейся в атмосферном воздухе.

Первыми, кто попытался заставить двигатель внутреннего сгорания работать под водой, стали французские инженеры Бертен и Петитхомм.

Более удачную попытку создать подводную лодку с единым двигателем предпринял наш соотечественник инженер С.К. Джевецкий. В качестве единого предполагались два четырехтактных бензиновых двигателя фирмы "Панар-Левассор" мощностью по 130 л.с. В надводном положении бензиномоторы работали по обычной схеме, в подводном положении для обеспечения их работы в машинное отделение подавался воздух, хранившийся в 45 «воздухохранителях» при давлении 200 атмосфер. Общий запас составлял около 11 м³, выхлопные газы откачивались через надстройку, расположенную под килем, выходя мелкими струйками из многочисленных отверстий отводной трубы, выхлопные газы должны были растворяться в воде. Строительство подводной лодки, получившей наименование "Почтовый", началось в 1906 г., 30 сентября 1908 г. она вошла в состав флота.

Работы в период 1930–1941 гг.

Первая мировая война прервала работы по созданию единых двигателей для подводных лодок, но уже с 1920-х годов в Советском Союзе и Германии вновь начались исследования в этой области. При этом от идеи просто разместить на подводной лодке большой запас воздуха сразу отказались, было принято решение хранить только кислород, причем в жидком состоянии, когда он занимает примерно в пять раз меньший объем, чем в баллонах под давлением 150 кгс/см². Однако жидкий кислород непрерывно испаряется, а способы, замедляющие этот процесс, в тот период времени не были разработаны.

В предвоенные годы также родилась идея десантировать (сбрасывать) сверхмалые ПЛ с самолета, ее технической проработкой занимался Ленинградский филиал экспериментального института самолетостроения (ЛФЭИС) в 1935–1936 гг. Идея транспортировки малой ПЛ по воздуху принадлежала начальнику и главному конструктору ЛФЭИС И.Г. Гроховскому. Непосредственное руководство работами по созданию сверхмалой ПЛ, пригодной для сброса с самолета, было поручено инженерам М.Н. Кривову и В.К. Станкевичу. Поиск решения поставленной задачи начался с энергетической установки, более эффективной по сравнению с традиционными дизель-электрическими по удельной мощности. Остановились на энергоустановке, работающей в подводном положении по принципу теплового аккумулятора. Принимая во внимание, что рабочее тело (теплоноситель) такого аккумулятора должен быть легким, нетоксичным, обладать большой удельной теплоемкостью, хорошей теплопроводимостью, малым коэффициентом объемного расширения (при нагреве) и большой скрытой теплотой плавления в диапазоне температур от 200 до 700 градусов Цельсия, остановились на алюминии, находящемся в расплавленном состоянии. Энергоустановка должна была состоять из теплового аккумулятора с алюминиевым теплоносителем массой 1500 кг (около 550 л), нагреваемого теплом отработанных газов двигателя надводного хода (35 л.с.). Расчеты показали, что с такой установкой может быть создана ПЛ с корпусом из алюминиево-магниевого сплава, длиной 6 - 7 м, диаметром корпуса 1 - 1,2 м, управляемая одним человеком, с одной малой торпедой, подвешенной под корпусом (с помощью авиационного бомбодержателя).

Работы по данной энергоустановке были продолжены, но уже применительно не к ПЛ, десантируемой с самолета, а к обычной ПЛ. Прорабатывалась возможность и целесообразность оснащения подобной установкой ПЛ типа "М" ("Малютка"). Для этого в октябре 1936 г. в НИВК было создано специальное конструкторское бюро, куда из ЛФЭИС перешли на постоянную работу М.Н. Кривов (начальник) и В.К. Станкевич (главный инженер). Испытания были продолжены на заводе № 196 ("Судомех"). В проекте для надводного и подводного хода предполагалось применить паровую турбину. В надводном положении паропроизводящей установкой являлся прямоточный котел системы профессора Л.К. Рамзина.

До войны возникло несколько направлений создания единого двигателя подводного и надводного ходов. Например, конструктор В. Л. Бжезинский предложил создать сверхмалую подводную лодку в виде погружающегося торпедного катера с установленным на нем «еди-

ным двигателем». В 1939 г. по его проекту началось строительство погружающегося торпедного катера М-400. Подводная лодка-катер имела водоизмещение надводное 35,3 т и подводное 74,0 т, два бортовых торпедных аппарата 450-мм калибра, пулемет, проектную скорость надводного хода - 33 уз и подводного - 11 уз. Работы до войны закончены не были. Корпус лодки-катера был поврежден при арт-обстреле Ленинграда, и в 1943 г. при 65%-ной готовности конструкции строительство его было прекращено.

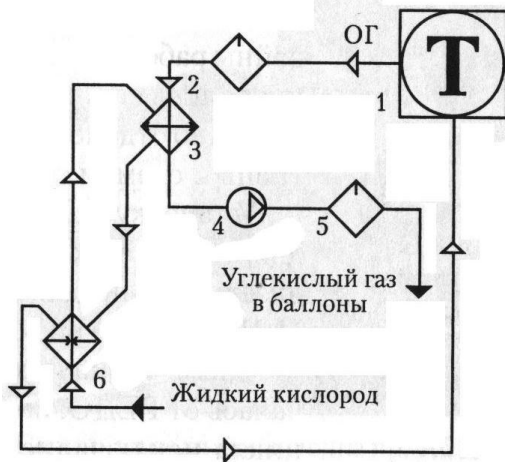
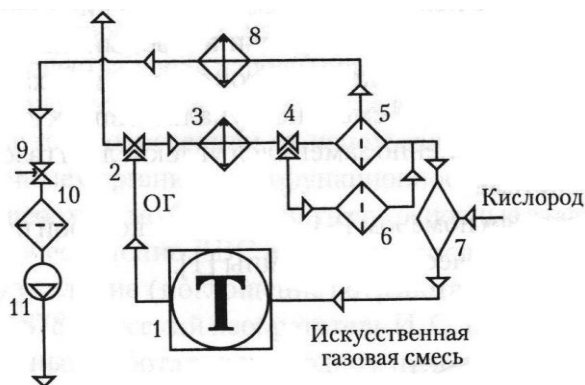


Рис. 1. Принципиальная схема энергоустановки с РЕДО:

1 – тепловой двигатель, 2 – сепаратор, 3 – конденсатор углекислого газа, 4 – компрессор, 5 – конечный сепаратор, 6 – испаритель кислорода

совершенно не выделяются вредные для человека газы. Проект был адаптирован к лодке типа «Н» и получил индекс «МТ». Но из-за чрезвычайно высокой в то время стоимости алюминия от детальной разработки проекта пришлось отказаться.

В 1936 г. по предложению инженера С. А. Базилевского для подводной лодки была создана установка «Редо» (регенеративный единый двигатель особого назначения). В установке «Редо» реализовывалась идея использования для работы двигателя под водой кислорода, причем кислород хранился на ПЛ в жидком (криогенном) состоянии. При работе дизеля в подводном положении выхлопные газы очищались от примесей и влаги, охлаждались и пополненные кислородом направлялись во всасывающий коллектор дизеля. Избыток выхлопных газов, на 75% состоявший из углекислоты, отсасывался компрессором и сжимался. Углекислый газ при этом превращался в жидкую углекислоту, которая сливалась сначала в специальные баллоны, а затем периодически - за борт. В 1938 г. установка была перенесена на строящуюся малую подводную лодку XII серии М-92, которая до войны прошла швартовые испытания и сделала несколько выходов в море.



Углекислый газ в струю винта

Рис. 2. Принципиальная схема энергоустановки с ЕД-ВВД:

1 – тепловой двигатель, 2 – двухходовая заплюпка, 3 – главный холодильник, 4 – заплюпка байпаса, 5 – главный фильтр, 6 – фильтр байпаса, 7 – смеситель, 8 – холодильник газоотбора, 9 – регулятор газоотбора, 10 – фильтр газоотбора, 11 – компрессор

экспериментальной малой быстроходной ПЛ с "единым двигателем", работающим по замкнутому циклу. Этот тип энергоустановки получил наименование ЕД-ХПИ (единый двига-

тели. В 1938–1939 гг. ОКБ НКВД, размещавшееся позже на территории завода № 196, разработало технический проект 95 -

термодвигателя. В 1938–1939 гг. ОКБ НКВД, размещавшееся позже на территории завода № 196, разработало технический проект 95 -

термодвигателя. В 1938–1939 гг. ОКБ НКВД, размещавшееся позже на территории завода № 196, разработало технический проект 95 -

термодвигателя. В 1938–1939 гг. ОКБ НКВД, размещавшееся позже на территории завода № 196, разработало технический проект 95 -

тель с химвсасителем известковым). Дизель работал в подводном положении на газовой смеси, состоящей из инертного азота и искусственно добавляемого кислорода. Выхлопные газы из дизеля поступали в газоохладитель, где они охлаждались и освобождались от водяных паров и частично от механических примесей. Далее они направлялись в специальные химические фильтры, где отделялся углекислый газ и окись углерода. Затем производилось дальнейшее освобождение выхлопных газов от избыточной влаги, они обогащались газифицированным кислородом, и в дизельный отсек поступала газовая смесь, близкая по своему составу к обычному воздуху.

По пр. 95 заводом № 196 была построена и 1 июля 1941 г. спущена на воду ПЛ "М-401" (зав. № С-135). Испытания ПЛ проводились во время войны на Каспийском море. Она сделала 74 выхода, 68 погружений, прошла 2800 миль, из них под единым двигателем 360 миль. Скорость подводного хода ПЛ "М-401" достигала 12,5 узлов. После войны "С-92", которой возвратили обозначение "М-92", была вновь переоборудована под энергоустановку ЕД-ВВД. Главным конструктором энергоустановки был В.С. Дмитриевский (погиб 23 ноября 1942 г. во время пожара на ПЛ), главным конструктором ПЛ - А.С. Кассациер. Командиром ПЛ "М-401" был М.К. Шейхатович, командиром БЧ-5 - Ю.Н. Кузьминский.

Работы в период 1945–1970 гг.

Основываясь на положительных результатах испытаний ПЛ "М-401", в июле 1946 г. вышло постановление Правительства СССР "О мерах по дальнейшему развитию работ в области создания ПЛ с единым двигателем". В соответствии с ним в ЦКБ-18 начались работы по созданию опытной ПЛ пр. 615 с энергоустановкой ЕД-ХПИ. Главным конструктором корабля был назначен А.С.Кассациер, его заместителями стали А.К.Назаров и С.Е. Липелис.

17 марта 1950 г. ПЛ пр. 615 была заложена на заводе № 196, спущена на воду 31 августа того же года, получив литерно-цифровое обозначение "М-254". Комплекс работ по достройке на плаву и испытаниям (швартовым, заводским, ходовым и государственным) был завершен в мае 1953 г. (приемный акт подписан 30 мая и утвержден 31 мая 1953 г.).

ПЛ пр. 615 и А615 значительно превосходили дизельные ПЛ пр. 96 (серия XV) по скорости и продолжительности непрерывного подводного плавания, а также предельной глубине погружения.

Государственные испытания показали, что тактико-тактические элементы ПЛ "М-254" пр. 615 в основном соответствовали спецификационным, несмотря на некоторые отступления и перенесение ряда испытаний, (в частности, по определению полной подводной автономности) на период эксплуатации ПЛ в составе флота.

Из общих недостатков в акте Государственной комиссии были отмечены:

- повышенная естественная испаряемость жидкого кислорода (дальность плавания подводным ходом обеспечивалась только в течение первых пять суток хранения жидкого кислорода);
- большая затесненность в отсеках, ухудшающая обитаемость личного состава; недостаточный моторесурс дизельных двигателей "М 50".

Для увеличения срока хранения кислорода в жидком состоянии вместо двух кислородных цистерн была установлена одна (уменьшалась поверхность хранилища) и, следова-



Рис. 3. ПЛ пр.А-615 QUEBEC (внешний вид к 1960 г., фото Н. Масловатого)

тельно, испаряемость кислорода, которая при сохранении той же емкости имела эллиптическую форму (для лучшего использования отведенной выгородки в 4-м отсеке) с улучшенной термоизоляцией. Для повышения живучести кислородную цистерну разместили в прочной выгородке, что при утечке кислорода из цистерны предотвращало его распространение по ПЛ и обеспечивало возможность его стравливания за борт на глубинах до 120 м (предельная глубина погружения).

Дизели марки "М 50" заменили на дизели №М 50П" с увеличенным до 600 часов ресурсом за счет снижения мощности до 700 л.с., что привело к некоторому уменьшению максимальной надводной и подводной скоростей хода. На валопроводах бортовых дизелей установили новые редукторы с муфтами, обеспечивающими свободное вращение гребных винтов при движении ПЛ под средним дизелем "32 Д". Были увеличены запасы химвсасывателя (на 0,5 т) и дизельного топлива (на 3,8 т).

В 1968 г. были прекращены планово-предупредительные ремонты этих ПЛ силами заводов. ПЛ стали выводить в резерв и в первой половине 70-х годов практически все ПЛ пр. А615 были выведены из состава ВМФ. Одним из существенных недостатков ПЛ с энергоустановками ЕД-ХПИ была ограниченная продолжительность хранения жидкого кислорода на борту ПЛ, даже при нахождении ПЛ в базе (из-за далеко не идеальной термоизоляции кислородных цистерн). Для устранения этого недостатка в 1954 - 1955 гг. был разработан технический проект "637" опытной ПЛ, в энергоустановке которой поглощение выхлопного углекислого газа и обогащение его кислородом осуществлялось с помощью твердого гранулированного вещества - надперекиси натрия.

Работы по ПЛ с парогазотурбинной установкой

После окончания Второй мировой войны (в соответствии с договором по разделу Германского флота) Великобритания, СССР и США получили по 10 ПЛ. В распоряжении Великобритании, в чью оккупационную зону входила северо-западная часть Германии, оказалась значительная часть архивов фирм "Блом унд Фосс" и "Германияверфт", которые вели строительство ПЛ с ПГТУ. Кроме того, британские оккупационные власти получили документы германского штаба ВМФ и организовали работу бывших сотрудников отдела подводных лодок Управления кораблестроения, которые подбирали и упорядочивали проектные материалы по Германским ПЛ. С частью документации англичане познакомили союзников. Специалисты Советского Союза также проявили заинтересованность в использовании достижений Германского подводного кораблестроения. Уже в 1946 г. ЦКБ - 18, проектировавшее отечественные ПЛ, по разрозненным материалам из конструкторского бюро "Глюкауф" выполнило проработки ПЛ серии XXVI (пр. 616). Работы имели цель проанализировать принятые технические решения и определить реальный уровень тактико-технических элементов Германской ПЛ. Учитывая это, в 1947 г. Советское Правительство приняло решение о создании на территории Германии в г. Бланкенбурге специального конструкторского Бюро по воссозданию энергетической установки системы Вальтера. Его возглавил начальник ЦКБ - 18 А. А. Антипин.

Параллельно в Ленинграде ЦКБ-18 приступило к начальным проработкам отечественной ПЛ пр. 617 с парогазовой турбинной установкой, собранной из германских механизмов, найденных сотрудниками Бюро Антипина. Проработки выполнялись при научном сопровождении бывшего главного конструктора первых советских ПЛ Б.М.Малинина, работавшего в ЦНИИ-45 судостроительной промышленности.

С переходом работ по пр. 617 на стадию эскизного проектирования решили создать специальную проектную организацию. В марте 1948 г. по распоряжению Совета Министров СССР для разработки скоростных ПЛ и энергетических установок новых типов было организовано Специальное конструкторское бюро № 143 (СКБ-143). Ему и поручили работы по проекту 617. Начальником СКБ-143 и главным конструктором проекта 617 стал А.А. Антипин. Основу коллектива составили специалисты, работавшие с А.А. Антипиным в Германии, сотрудники ЦКБ-18 и ЦНИИ-45. В первую очередь при проектировании скоростной ПЛ пе-

ренивались наработки по обеспечению высоких пропульсивных качеств, по этой причине в отличие от других советских ПЛ первого послевоенного периода артиллерийское вооружение на ПЛ пр. 617 не устанавливалось. Кроме того, из германского опыта на ПЛ пр. 617 были заимствованы: устройство РДП (шнорхель) с заваливающейся мачтой, система продувания ЦГБ после всплытия в позиционное положение выхлопными газами дизелей, развитая система гидравлики, заменившая значительную часть пневмоприводов и тросовых подъемников выдвижных устройств, и установка дизель-компрессоров для пополнения запасов воздуха высокого давления.

В килевой части междубортного пространства на специальных рамах подвешивались 32 полихлорвиниловых мешка для хранения запаса перекиси водорода.

ПГТУ обеспечивала движение ПЛ на скорости от 10 уз до полной. Пуск установки мог производиться на глубинах погружения до 80 м, длительная работа (при полной нагрузке) - до 120 м и кратковременная (до 5 минут) - до 160 м. Мощность на валу зависела от глубины погружения - с увеличением глубины возрастали затраты на работу компрессора, удалявшего за борт углекислый газ. Кроме того, часть мощности ПГТУ отбиралась на вращение главного ГЭД в генераторном режиме. В зависимости от режима движения бортовой запас перекиси водорода обеспечивал ход под ПГТУ от 6 до 23 часов.



Рис. 4. ПЛ пр.617 WHALE на испытаниях

Подводная лодка "С-99" проекта 617 была единственной отечественной субмариной с парогазотурбинной установкой, работавшей в подводном положении. Установка работала на перекиси водорода, и принцип ее действия был таков: перекись водорода подается в камеру разложения насосом, под давлением 40 кг/см². В камере, в результате окисления, образуется парокислород. Он поступает в камеру сгорания, куда впрыскиваются также топливо и вода, в результате получается парогазовая смесь, которая и поступает на турбину. А углекислый газ и пар выбрасываются. Летом 1952 г. ПЛ "С-99" под командованием Н.Г.Симонова вышла на заводские испытания. "С-99" была предъявлена комиссии Государственной приемки кораблей только в апреле 1955 г, т.е. почти через 3 года после начала заводских испытаний.

В состав флота ПЛ "С-99" вошла в мае 1956 г. В приемном акте отмечалось, что по скоростным качествам и дальности плавания полным ходом ПЛ пр. 617 не имеет себе равных в отечественном подводном флоте. Но комиссия отметила и ряд недостатков. В частности, движение под ПГТУ на всех режимах сопровождалось высокой шумностью, которая демаскировала ПЛ и препятствовала использованию собственных гидроакустических станций. То есть на повышенных скоростях происходило "ослепление" ПЛ и потеря контроля за тактической обстановкой, которые усугублялись потерей скрытности действий ПЛ. Так появилось одно из серьезных противоречий концепции скоростных ПЛ (характерное в том числе и для атомных ПЛ первых поколений): высокая скорость была необходима для занятия позиции и выхода в атаку, но ее достижение сопровождалось потерей таких преимуществ ПЛ, как скрытность и упреждающее гидроакустическое обнаружение противника.

Вместе с тем ПГТУ имели и серьезные недостатки:

- ограниченное время использования за поход (1 - 3% ходового времени);
- зависимость характеристик работы ЭУ от глубины погружения ПЛ;
- высокая потенциально взрыво- пожароопасность использования на ПЛ такого активного окислителя как перекись водорода;
- высокая стоимость производства концентрированной перекиси водорода.

Перечисленные недостатки усугублялись "детскими болезнями" становления новой техники - низкой надежностью и неотработанностью оборудования. И все же возможность

успешного преодоления этой проблемы доказала доводка и последующая эксплуатация германских опытных ПЛ типов Wa 201 и WK 202.

Тем не менее, учитывая конкретные исторические условия и фактор времени, можно утверждать, что на период 40-х годов использование ПГТУ было практически единственным реальным техническим решением создания ПЛ, способных развивать скорость более 20 уз и эффективно действовать против целей с сильной противолодочной обороной. Появление ПГТУ создало условия для превращения "ныряющих" ПЛ в подлинно подводный корабль.

Поэтому смена парогазовых турбинных установок атомной энергетикой является естественной сменой поколений военной техники. ПГТУ не были тупиком, а стали лишь этапом развития, который был быстро пройден.

Параллельно с разработкой проекта 617 велись работы по более совершенным проектам лодок с ПГТУ: 617М, 635, 643, 647. Из них только проект 643 был доведён до конца, и даже получил хорошую реакцию от ВМФ, однако в производство проект не был отдан, в связи с началом активного строительства атомных ПЛ первого поколения проекта 627.

Проект	Описание
635	проект был признан нереализуемым, работы были прекращены
643	проект был одобрен ВМФ
647	проект не был завершён

После окончания войны в состав отечественного флота вошло несколько трофейных немецких океанских подводных лодок VII и XXI серий. Лодки XXI серии получили выдвижные устройства, обеспечивавшие работу дизелей под водой на перископной глубине. Дальность плавания в таком положении увеличивалась до нескольких тысяч миль. После войны в ленинградском ЦКБ-18 был разработан проект 614, предусматривавший достройку захваченных на германских верфях лодок XXI серии. Дальнейшего развития проект не получил, но позволил глубоко изучить наиболее интересные конструктивные решения.

Работы в период 1970–1990 гг.

В 1978 году специальным постановлением правительства функции головного разработчика энергоустановок были возложены на Союзное конструкторское бюро котлостроения (ныне ОАО СКБК). На первом этапе - с 1978 по 1986 год - СКБК совместно с соисполнителями разработаны ЭУ с ЭХГ для трех типов морских объектов: малой подводной лодки (МПЛ) "Пиранья", глубоководного подводного аппарата (ПА) "Поиск-6" и подводного средства движения (ПСД) "Сирена-К".



Рис. 5. Подводная лодка проекта 613Э с электрохимическими генераторами

К концу 80-х годов работы по энергоустановкам для ПА "Поиск-6" и ПСД "Сирена-К" были приостановлены после утверждения технических проектов и успешных испытаний макетных и опытных образцов основного оборудования ЭУ. В 1991 году в полном объеме были завершены работы по ЭУ с ЭХГ для МПЛ "Пиранья" (шифр ЭУ "Кристалл-20"). Впервые в отечественной практике по заказу Министерства обороны была разработана, изготовлена, отработана в стендовых условиях и сдана межведомственной комиссии полноразмерная энергетическая установка с ЭХГ мощностью 130 кВт, представляющая собой первое поколение российских корабельных ЭУ с ЭХГ.

Впоследствии в связи с успехами в создании атомных подводных лодок руководство советского ВМФ и отечественной судостроительной отрасли практически утратило интерес к неядерным «единым» двигателям для ПЛ. Лишь в первой половине семидесятых годов ми-

нувшего столетия работы в указанном направлении возобновились. На этот раз была предпринята попытка оснащения подлодки проекта 613 энерго установкой с электрохимическим генератором мощностью 280 кВт. В 1988 г. подлодка «Катран» проекта 613Э успешно прошла расширенные государственные испытания и подтвердила принципиальную возможность создания и эффективного использования новой энергетики. В 1989 г. закончились межведомственные испытания подводной лодки проекта 613Э с опытной энергетической установкой с электрохимическим генератором (разработчики - НПО "Квант" минэлектротехпрома и НПО "Криогенмаш" минхиммаша). Переоборудование вместе с ремонтом корабля продолжалось более 10 лет.

В течение шести месяцев специальная комиссия провела расширенные межведомственные испытания энергетической установки с электрохимическим генератором (ЭХГ). Впервые в практике отечественного кораблестроения был испытан в корабельных условиях и показал соответствующие проекту характеристики генератор "ЭХГ-280". Был сделан вывод о том, что ЭХГ как неатомный экологически чистый малошумный источник электроэнергии с прямым преобразованием химической энергии в электрическую является перспективным для применения в подводном судостроении. Он обладает рядом преимуществ перед традиционными источниками электроэнергии, в частности, позволяет в 5...10 раз увеличить дальность непрерывного подводного плавания экономическим ходом.

Однако развал Советского Союза и последовавшие после этого события на несколько десятилетий отбросили создание отечественной ПЛ с электрохимическим генератором.

Работы в период 1990 г. по настоящее время

Работы по новому поколению ПЛ с анаэробными энергоустановками в СССР были начаты ЦКБ МТ "Рубин" (главный конструктор Ю.Н. Кормилицын) начаты в 1987 г. и по первоначальным планам планировалось строительство большой серии ПЛ на заводах "Ленинградское Адмиралтейское объединение" (г. Ленинград), "Севмаш" (г. Северодвинск), "Красное Сормово" (г. Нижний Новгород) и "им. Ленинского Комсомола" (г. Комсомольск-на-Амуре). Технический проект ПЛ пр.677 «Лада» утвержден в 1993 г., но переработан. Вторым технический проект утвержден в 1997 г. При создании ПЛ отработано 180 ОКР.

26 декабря 1997 года, первая российская неатомная подлодка 4-го поколения, названная «Санкт-Петербург», была заложена на закрытом стапеле ОАО «Адмиралтейские верфи» в Санкт-Петербурге. При ее закладке подразумевалось, что в процессе постройки она будет снабжена отечественной анаэробной установкой с ЭХГ, как и в немецком проекте 212.

Лодку удалось достроить лишь в 2007 году, и тогда же она вышла на заводские ходовые испытания. Практически в то же время на «Адмиралтейских верфях» началось строительство второй («Кронштадт») и третьей («Севастополь») НАПЛ проекта 677 «Лада» для ВМФ РФ.

С 1998 года к работам по созданию ЭУ с ЭХГ по техническому заданию ЦКБ МТ "Рубин" подключена РКК "Энергия" им. С.П.Королева (г.Королев), имеющая большой опыт создания установок с криогенными системами хранения реагентов для космических аппаратов.

В основу нового ЭХГ положены энергоблоки на основе топливных элементов щелоч-



Рис. 6. ПЛ Б-585 "Санкт-Петербург" пр.677 на Неве в Санкт-Петербурге в День ВМФ, 25-26 июля 2010 г.



Рис. 7. Компонировочная схема ПЛ "Амур-1650" пр.677Э

ного типа, разработанные УЭХК (г.Новоуральск) для многоразовой транспортной космической системы "Энергия-Буран" и отличающиеся высокой экономичностью и хорошими массогабаритными характеристиками. РКК "Энергия" совместно с ЦКБ МТ "Рубин" разработала автономную энергоустановку с криогенным хранением реагентов "РЭУ-99", которая встраивается в отсек длиной 9,8м и обеспечивает длительность плавания около 20 суток. Установка имеет номинальную мощность 300 кВт, коэффициент полезного действия не менее 70%, удельный расход кислорода при номинальной мощности ЭУ - 0,336 кг/кВт*час, удельный расход водорода при номинальной мощности ЭУ - 0,042 кг/кВт*час. Ввод установки с холодного состояния до полной номинальной мощности составляет не более четырех часов. Время заправки ЭУ с ЭХГ криогенными реагентами - 18,5 часов.

В состав энергоустановки входят: блоки хранения криогенного водорода и кислорода (БХВ и БХК), энергоблоки электрохимического генератора с блоками управления, локальная система управления, система пожаровзрывопреждения, блоки криогенной и газовой арматуры, система терморегулирования, трубопроводы, и согласующий преобразователь (СП). СП обеспечивает возможность параллельной работы ЭХГ, как источника нерегулируемой мощности, и АБ. В зависимости от режима ЭЭС СП работает в режиме вольтдобавочного устройства или в режиме широтно-импульсного модулятора для понижения напряжения ЭХГ. СП состоит из шести отдельных блоков для каждого энергоблока ЭХГ и обеспечивает также их электрическую защиту и параллельную работу энергоблоков между собой.

Выводы

Субмарины с гибридными ЭУ уже в настоящее время по своим характеристикам не только приблизились к атомоходам, но по некоторым показателям даже превосходят их. Так, в ходе двух учений в Атлантике, прошедших в 2003 г., шведская подводная лодка Halland с анаэробными двигателями Стирлинга «победила» в дуэльной ситуации испанскую субмарину с обычной дизель-электрической установкой, а затем и французскую атомную лодку. Она же в Средиземном море одержала верх в «схватке» с американской атомной подводной лодкой Huston. При этом необходимо отметить, что малошумный и высокоэффективный Halland стоит в 4,5 раза дешевле своих атомных соперников.

Рынком сбыта ПЛ с анаэробными энергоустановками является международный рынок вооружений, где в настоящее время существует устойчивый спрос на ПЛ со стороны стран Латинской Америки, Юго-Восточной Азии и Ближнего и Среднего Востока. В целом, ориентировочная рыночная ниша (до 2050 года) составляет от 200 до 400 ПЛ, при средней стоимости ПЛ около 300-400 млн. долларов США. Данный прогноз основывается на том, что в период 1970-1985 гг. Германией и СССР интенсивно строились и экспортировались в страны НАТО, Варшавского Договора, Индию, Китай и другие страны «третьего мира» в значительном количестве немецкие ПЛ типа 209 и советские класса «Фокстрот» и «Ромео» (проект 641 и 633/033). В настоящее время эти ПЛ входят в состав 30 флотов зарубежных стран. Учитывая, что срок службы оценивается в 30 лет, можно ожидать, что большинство вышеперечисленных стран будут приобретать новые ПЛ вместо устаревших подводных лодок, исчерпавших свой ресурс. В настоящее время анаэробные энергоустановки уже востребованы рынком, так в ходе объявляемых тендеров на поставку ПЛ иностранные заказчики чаще требуют подтверждения возможности оснащения в ходе строительства или модернизации атмосферонезависимыми энергоустановками.

Если в 2004 году в структуре продаж военной техники ФГУП «Рособоронэкспорта» до 60% занимало авиационное вооружение, то в 2005 году этот баланс изменился в сторону продукции для военно-морских сил. От реализации данной продукции в государственную казну поступило 3 млрд долл. США из 5 млрд, полученных за продажу всей военной техники за рубеж. Причем более половины этой суммы пришлось на поставку и ремонт неатомных подводных лодок (НАПЛ). Никогда раньше подводный флот не занимал столь значительной доли в структуре российского военного экспорта. По оценкам ведущих специалистов этот сегмент рынка военной продукции имеет тенденции к значительному расширению. Так по

прогнозу влиятельного журнала Forecast International до 2014 гг. со стапелей судостроительных верфей должны сойти около 100 субмарин на общую сумму 80 млрд долл. США. По словам заместителя генерального директора ФГУП «Рособоронэкспорт» В.Пахомова конкуренция между основными производителями неатомных лодок резко обострилась и российским производителям придется буквально бороться за потенциальных заказчиков. Необходимо отметить, что в последнее время по ряду технологий подводного кораблестроения российские компании стали отставать от зарубежных конкурентов, прежде всего от немецких, шведских и французских производителей НАПЛ. К числу критичных технологий в первую очередь относятся создание анаэробных (воздухонезависимых) энергетических установок. Данное отставание уже в ближайшее время может привести к массовому свертыванию производства отечественных субмарин, поставляемых на экспорт, потери научной и технологической базы сотен российских предприятий военно-промышленного комплекса (ВПК).

Библиографический список

1. **Дядик, А.Н.** Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А.Н. Дядик, В.В. Замуков, В.А. Дядик. – СПб: Судостроение. 2006. – 424 с.
2. **Бабанин, В.А.** Подводные лодки с единым двигателем / В.А. Бабанин. – СПб.: Гангут, 1998. – 145 с.
3. **Платонов, В.А.** Подводные лодки / В.А. Платонов. – СПб.: ООО «Издательство «Полигон»», 2002. – 256 с.
4. **Игнатъев, Э.П.** Первая подводная лодка с единым двигателем // Судостроение. 1992. №5. С 46-49.
5. <http://www.ckb-rubin.ru>

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

V.A. Vasiliev, I.D. Novels, E.A. Romanov, A.D. Romanov

HISTORY OF DEVELOPMENT OF SUBMARINES WITH AIRINDEPENDENT POWER INSTALLATIONS IN RUSSIA AND THE USSR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

In this work the creation history in the USSR and Russia of submarines with airindependent power installations during the period with 1900 for 2000 is described. Schemes airindependent power installations are considered.

The first in Russia in 1907 attempt of creation of PL with the uniform engine was undertaken by S.K.Dzhevetsky, according to his project PL "Post" was constructed. In surface situation benzinomotor worked according to the usual scheme, in underwater situation for ensuring their work in an engine room the air stored at pressure of 200 atmospheres moved.

Theoretical and skilled works on creation of the small PL intended for transportation by air were carried out to the period before the Second World War. Also theoretically also the PL following power installations with the uniform engine were experimentally studied: REDO, IVR installation, EDVVD, EDHPI. On the basis of power installation EDHPI an A615 project PL series was designed and constructed. In 1954-1955gg. the engineering design of skilled PL (project 637) with the uniform engine working on the scheme of PIECE of HPI, but with use of new type of an oxidizer - надперекиси sodium was executed.

In SKB-143 there was developed PL "S-99" of the project 617 unique domestic PL with the parogazoturbiny installation working in underwater situation. In parallel with development of the project 617 works on more perfect projects of boats were conducted with PGTU: 617M, 635, 643, 647.

Also the project of equipment of PL project 613 power installation with the electrochemical generator in capacity of 280 kW was developed. In 1989 tests of the submarine of the project 613E the creations which have confirmed basic possibility and efficiency of application of a new power source of the Square successfully ended. In 1993 was developed the engineering design of PL project 677 "Lada". The first Russian not nuclear submarine of the 4th generation, called "St. Petersburg", was put on JSC Admiralty Shipyards building berth in St. Petersburg. At its book-mark it was meant that in the course of construction it will be supplied with domestic anaerobny installation with EHG, as well as in the German project 212.

Key words: submarines, anaerobny, airindependent power installations.

УДК 629.563.4:629.5.01

Е.П. Роннов, В.В. Анисимова

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНОГО ТИПА И ИХ УЧЕТ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ОБСТАНОВОЧНЫХ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Волжская государственная академия водного транспорта

Выделены варианты архитектурно-конструктивного типа речных обстановочных судов, рассмотрена возможность определения главных элементов судна в зависимости от архитектурно-конструктивных решений.

Ключевые слова: речные обстановочные суда, архитектурно-конструктивный тип, оптимизация главных элементов

Архитектурно-конструктивный тип (АКТ) обстановочных судов внутреннего плавания имеет особенности, определяемые выполнением их основной функции - обслуживанием средств навигационного оборудования и характеризуется, прежде всего, расположением надстройки и рабочих площадок по длине судна. Также на АКТ влияет размещение специальных устройств, например, грузовых кранов, характерных для обстановочных судов. Обстановочный теплоход может эксплуатироваться в сцепе с баржей, перевозящей навигационное оборудование, и работать либо в роли толкача либо буксира. Соответственно судно оборудуется носовыми упорами или кормовым буксирным устройством, что также отражается на его АКТ.

Суда рассматриваемого типа, как правило, отличаются малой осадкой вследствие ограничения по глубине судового хода, небольшой расчетной высотой борта, длиной корпуса до 35 м. Отмечено, что суда, которые относятся к первой группе по Санитарным Правилам и Нормам, а также к классу «О», согласно Правилам Российского Речного Регистра, имеют развитую надстройку и обладают более широким набором помещений, что отличает их от судов, отнесенных к другим группам и классу «Р», имеющим небольшую надстройку. Под развитой надстройкой будем понимать надстройку с размещением в ней жилых и общественных кают для экипажа и перевозимых бригад рабочих. Соответственно, под термином - небольшая надстройка, понимается надстройка с размещением в ней рулевой рубки, некоторых санитарно-бытовых и хозяйственных помещений, тогда как жилые и общественные каюты для экипажа и перевозимых бригад рабочих располагаются в отсеке корпуса судна.

Форма корпуса судов вследствие их малой осадки характеризуется:

- туннельным или полутуннельным образованием кормы;
- ложкообразной носовой оконечностью;
- вертикальными бортами.

Из всех существующих типов речных обстановочных судов по признаку расположения и размера надстройки можно выделить шесть архитектурно-конструктивных решений (табл. 1).

Особенности АКТ обстановочных судов необходимо учитывать при решении задачи их оптимизации. АКТ влияет на главные размерения судна и прежде всего на его длину L . Длина судна, главным образом, зависит от длины рабочей площадки, определяемой на этапе проектирования типоразмерами и количеством размещаемых на ней средств навигационного оборудования (СНО), а также от размеров отсеков, составляющих корпус. Таким образом, возможно представление длины судна как суммы отсеков корпуса зависящих и независящих от АКТ:

$$L = \sum_{i=1}^3 L_i + L_4(a) + L_5(a), \quad (1)$$

где L_1 – длина ахтерпика, м; L_2 – длина машинного и топливного отсеков, м; L_3 – длина форпика, м; $L_4(a)$ – длина жилого отсека, м; $L_5(a) = \begin{cases} L_5(a) & \text{и} \text{д} \text{е} \quad a = 1, 2 \\ L_6(a) & \text{и} \text{д} \text{е} \quad a = 3, 4, 5, 6 \end{cases}$; $L_6(a)$ – длина трюма, м; $L_6(a)$ – длина рабочей площадки, м.

Длина ахтерпика, машинного отделения, форпика не зависят от АКТ, тогда как L_4, L_5, L_6 связаны с ним.

Таблица 1

Варианты АКТ

Вариант АКТ	Индекс варианта АКТ, а
кормовое расположение рабочей площадки и развитая надстройка	1
кормовое расположение рабочей площадки и небольшая надстройка	2
носовое расположение рабочей площадки и развитая надстройка	3
носовое расположение рабочей площадки и небольшая надстройка	4
носовое и кормовое расположение рабочих площадок и развитая надстройка	5
носовое и кормовое расположение рабочих площадок и небольшая надстройка	6

На рис. 1 представлена наиболее распространенная схема размещения отсеков в корпусе речных обстановочных судов.

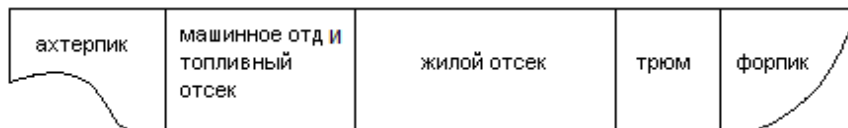


Рис. 1. Схема размещения отсеков в корпусе обстановочных судов внутреннего плавания

На основе проанализированного статистического материала, приведенного в табл. 2 были выявлены зависимости длин ахтерпика, жилого отсека, машинного отделения от длины судна L , мощности двигателя Ne и числа спальных мест в корпусе $n_{сп.м.}$ соответственно (рис. 2-5). Аппроксимация данных графиков позволила получить аналитические выражения (2-5), которые могут быть использованы для определения размеров соответствующих отсеков корпуса.

Таблица 2

Статистические данные для нахождения зависимостей длин отсеков корпуса судна

№ проек- тов	$L, м$	$Ne, кВт$	$L_1, м$	$L_2, м$	$L_4, м$	$n_{сп.м.}$
457	19,9	66	2,37	5,43	5,99	6
81240А	27,55	140	4,02	7,23	9,14	4
3050	21,8	85	3,17	7,07	6,52	5
391А	24,2	110	5,06	7,03	6,42	6
3052	33,6	411,8	5,74	11,39	9,97	6
P121	32,55	330	8,11	10,55	9,84	8
SV2407	23,63	522	2,03	11,9	8,05	5
3050.1	24,95	205,9	3,29	8,96	8,66	4

Длина ахтерпика L_1 может быть найдена в зависимости от длины судна по выражению (2):

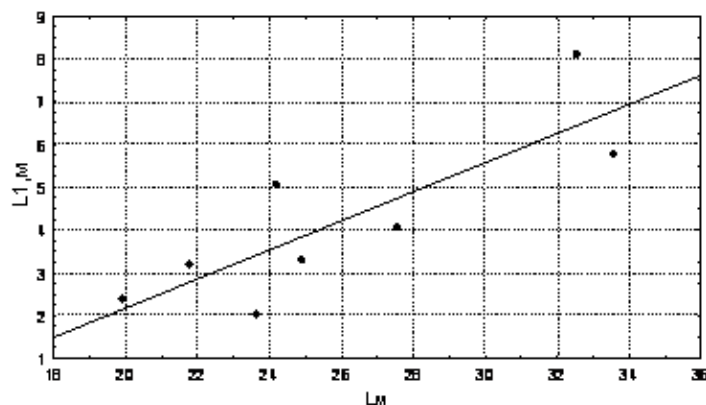


Рис. 2. Графическая зависимость длины ахтерпика

$$L_1 = -4,6231 + 0,34 \times L \quad (2)$$

Длина машинного и топливного отсеков L_2 находится в зависимости от мощности судна по выражению (3).

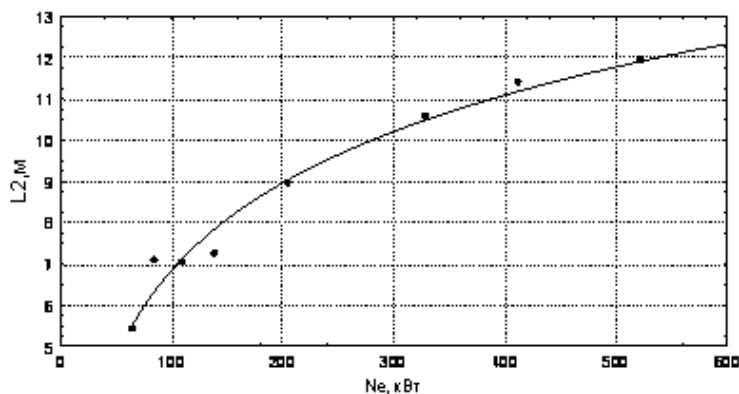


Рис. 3. Графическая зависимость длины машинного отделения и топливного отсека от мощности энергетической установки

$$L_2 = -7,2606 + 7,0518 \times \lg N_e \quad (3)$$

Составляющие L_4, L_5, L_6 следует определять с учетом архитектурно-конструктивных особенностей. Длину жилого отсека целесообразно связывать с числом спальных мест в корпусе, причем если предполагается двухъярусное расположение кроватей, в счет включается только одно спальное место.

При развитой надстройке длину жилого отсека L_4 можно определить по выражению (4):

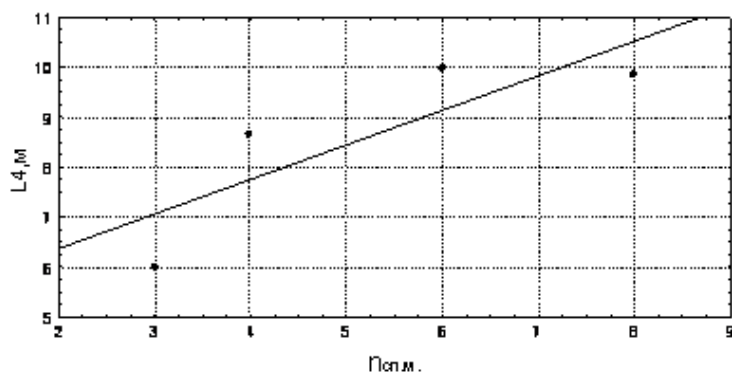


Рис. 4. Графическая зависимость длины жилого отсека судна с развитой надстройкой от числа спальных мест в корпусе

$$L_4 = 4,9825 + 0,6924 \times n_{сп.м.} \quad (4)$$

Для судна с неразвитой надстройкой длина жилого отсека находится по выражению (5):

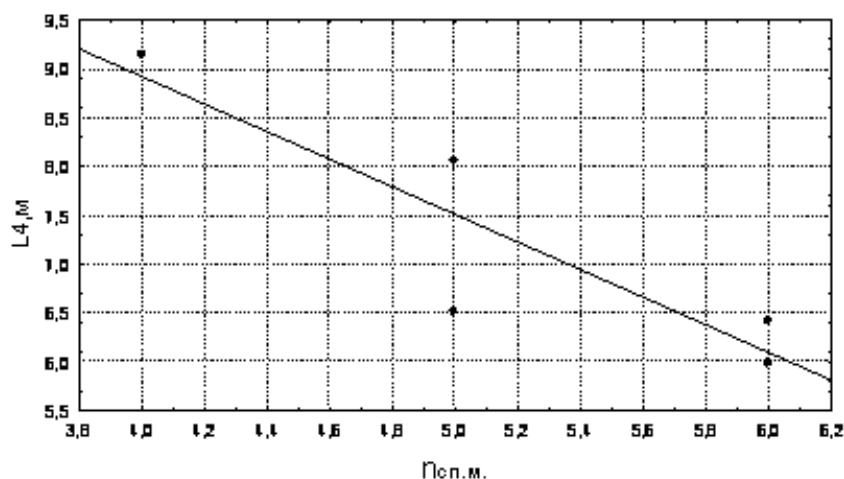


Рис. 5. Графическая зависимость длины жилого отсека судна с неразвитой надстройкой от числа спальных мест в корпусе

$$L_4 = 14,5671 - 1,4121 \times n_{\text{сп.м.}} \quad (5)$$

Для судна с кормовым расположением рабочей площадки в составляющие длины судна входит длина трюма L_5 , с носовым расположением и расположением в носу и корме – длина рабочей площадки L_6 . Длину трюма предполагается задавать проектантом вместе с исходными данными при решении задачи оптимизации.

Длина рабочей площадки определяется из расчета размещения буев по длине судна.

$$L_6 = n_{aL} \times (h_a + \Delta l), \quad (6)$$

где n_{aL} – число буев размещаемых по длине судна; h_a – высота бую, м; Δl – расстояние между буями по длине судна с учетом потопчины, м.

Площадь рабочей площадки может быть найдена по выражению:

$$L_6 B_{pi} \geq n \cdot (h_a + \Delta l) \cdot (d_a + \Delta b) \quad (7)$$

где B_{pi} – ширина рабочей площадки, м; n – число перевозимых буев; d_a – максимальный диаметр бую, м; Δb – расстояние между буями по ширине судна с учетом потопчины, м.

Длина форпика L_3 принимается равной половине ширины судна:

$$L_3 = B/2 \quad (8)$$

Ширина судна, так же как и высота борта могут быть найдены в зависимости от длины судна по статистическим зависимостям [1]. Необходимо также принимать во внимание и условия эксплуатации обстановочного судна, а именно характер обслуживаемого участка водного пути. Район плавания выступает ограничением при определении главных размеров судна.

Произведенный анализ позволил несколько упорядочить представление об обстановочных судах внутреннего плавания, выделить варианты их АКТ, дал возможность нахождения длин отсеков составляющих корпус судна, а также определения длины корпуса как суммы отсеков в зависимости от вариантов АКТ и перевозимых СНО.

1. **Анисимова, В.В.** Анализ главных размерений обстановочных судов внутреннего плавания // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы II межвузовской научно-практической конференции. 12-13 мая 2011 года / отв. ред. О.А. Казмина. – СПб.:СПГУВК, 2011. С. 66-70.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

E.P. Ronnov, V.V. Anisimova

**FEATURES ARCHITECTURALLY-CONSTRUCTIVE TYPE AND THEIR ACCOUNT
BY OPTIMIZATION OF INLAND-WATERWAY VESSELS FOR PLACING AND
MAINTENANCE OF FACILITIES OF NAVIGATION EQUIPMENT**

Volga state academy of water transport

Features of architectural and constructive type of inland-waterway vessels for placing and maintenance of facilities of navigation equipment are considered. The made analysis allowed to order idea of inland-waterway vessels for placing and maintenance of facilities of navigation equipment and to allocate six versions of architectural and constructive decisions. Possibility of representation of length of a vessel as the sums of compartments of the case is considered at the solution of a problem of optimization. For determination of length of a vessel finding of some lengths of compartments of the case on statistical dependences, and sizes of a working platform depending on transported means of navigation equipment is supposed. Width of a vessel, also as height of a board can be found depending on length of a vessel on statistical dependences. Besides, at definition of the main elements of a vessel the accounting of navigation area is necessary.

Key words: inland-waterway vessels for placing and maintenance of facilities of navigation equipment, architecturally-constructive type, optimization of main elements.

УДК 621.43

И.Л. Захаров, В.Л. Химич, А.Н. Тарасов, Л.А. Захаров

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПОРШНЕВОГО МНОГОТОПЛИВНОГО ДВС С ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты термодинамических испытаний «методом научного исследования» рядного четырехцилиндрового двигателя ЗМЗ-4021.10 рабочим объемом 2,445 л, работающий на низкооктановом бензине А-76 с переменной степенью сжатия, на топливе различного химического состава и с применением рабочего тела трех, двух и одноатомным химическим составом. Подвод теплоты от теплоисточника к массе рабочего тела осуществлялся по циклу Отто и Карно. С применением этих данных по геометрической модели и геометрическим характеристикам численными расчетами определены принципиально неустранимые тепловые потери по второму закону термодинамики и пути их уменьшения. Рассматриваются физическая, термодинамическая и математическая модели совершенствования термодинамического рабочего цикла. Выявлено благоприятное влияние на улучшение термодинамических показателей энергетических, экономических и экологических поршневого ДВС при работе на номинальных нагрузках.

Ключевые слова: рабочие термодинамические циклы двигателей внутреннего сгорания, степень сжатия, род рабочего тела, среднее давление цикла, форсировка ДВС с благоприятной экономичностью.

Поршневые ДВС по требованиям европейских стандартов оцениваются эксплуатационными, эффективными, индикаторными и термодинамическими показателями. Главная задача при создании многотопливных ПДВС с переменной степенью сжатия на ранней стадии проектирования – **анализ исследования и расчет термодинамических показателей.**

Термодинамические показатели поршневого ДВС характеризуют термодинамический рабочий цикл и **определяются** «методом научного исследования» **изменения** параметров состояния рабочего тела в цилиндре поршневого ДВС за время рабочего цикла. К ним относятся среднее термодинамическое давление P_t , термодинамическая мощность N_t , крутящий момент M_t , термодинамический КПД η_t , удельный термодинамический расход топлива g_t , часовой термодинамический расход топлива G_t , степень форсировки (благоприятное соотношение, обеспечивающее условия получения низкого расхода топлива $\frac{P_Z - \text{максимальное давление цикла}}{P_t - \text{среднее давление цикла}} \geq 7,0$).

Объект исследования – рядный четырехцилиндровый поршневой двигатель: рабочим объемом $V_h=2,445$ л, с порядком работы цилиндров 1-2-4-3, диаметром цилиндра $D=0,092$ м, ходом поршня $S=0,092$ м, степенью сжатия $\varepsilon=6,7:1$, эффективной номинальной мощностью $N_e=66,2$ кВт, эффективным удельным расходом топлива $g_e=0,300$ кг/(кВт·ч), номинальной частотой вращения коленчатого вала двигателя $n=4500$ мин⁻¹, низшей теплотой сгорания применяемого топлива $Q_n=44013798 \frac{\text{Дж}}{\text{кг топлива}}$, теоретически необходимым коли-

чества воздуха для полного сгорания одного килограмма топлива $l_0=14,828 \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}$.

Допущения при исследовании термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия, работающий по циклу Отто, на топливе с различным химическим составом, **принимаются:**

1) рабочее тело в цилиндре термодинамического поршневого ДВС воздух – считать идеальным газом, нормальные термодинамические условия которого – удельное давление $p=101332$ Па, удельный объем $v=0,773395$ м³/кг, плотность $\rho=1,293$ кг/м³, абсолютная температура $T=273,16$ К;

2) количество массы рабочего тела помещенного в полный объем цилиндра (диаметр цилиндра $D=0,092$ м, ход поршня $S=0,092$ м, степень сжатия $\varepsilon=7:1$)

$$m_a = V_a \cdot \rho = const \quad \text{или} \quad m_a = \left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \rho \right) = const ;$$

3) теоретически необходимое количество воздуха для обеспечения полного сгорания одного килограмма топлива и его низшая теплота сгорания Q_H , зависящие от элементарного массового состава топлива;

4) количество массы топлив с различным элементарным массовым химическим составом, которое может полностью «сгореть» в массе воздуха [m_a по пункту 2)] в цилиндре термодинамического поршневого ДВС,

$$m_T = \frac{m_a}{l_0}, \quad \text{кг} ;$$

5) количество теплоты Q_1 , которое сообщается рабочему телу в цилиндре поршневого термодинамического ДВС:

$$Q_1 = m_T \cdot Q_H = const ;$$

б) величины термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия ($\varepsilon=14:1$, $\varepsilon=21:1$, $\varepsilon=28:1$) определяющие параметры, полученные для степени сжатия $\varepsilon=7:1$ ($m_a=const$, $m_T \neq const$, $Q_1=const$) сохраняются постоянными и неизменными.

Математические формулы для определения термодинамических показателей поршневого термодинамического ДВС с переменной степенью сжатия на номинальном режиме работы $n=4500$ мин⁻¹.

Термодинамическая мощность поршневого двигателя:

$$N_t = M_a \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \quad \text{или}$$

$$N_t = \left[\frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho \right] \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \quad \text{Вт}$$

является функцией диаметра цилиндра D , хода поршня S , степени сжатия ε , коэффициента наполнения η_H , плотность рабочего тела ρ , коэффициент избытка воздуха α , теоретически необходимое количество воздуха l_0 , низшей теплоты сгорания топлива Q_H , термодинамический КПД η_t , числа цилиндров i , тактности m и частоты следования циклов $n \cdot \frac{1}{60}$.

Крутящий термодинамический момент поршневого двигателя:

$$M_t = 9,55 \cdot \frac{N_t}{n}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Часовой расход топлива поршневого термодинамического ДВС за час работы на номинальном режиме:

$$G_t = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot 60, \quad \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Термодинамический КПД поршневого ДВС

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Удельный термодинамический расход топлива поршневого ДВС

$$g_t = \frac{G_T}{N_t}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

Среднее термодинамическое давление рабочего тела в цилиндре термодинамического поршневого ДВС

$$p_t = \frac{L_t}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{L_t}{V_s}, \text{ МПа.}$$

Степень форсировки термодинамического поршневого ДВС

$$\Phi_t = \frac{p_z}{p_t} \geq 7.$$

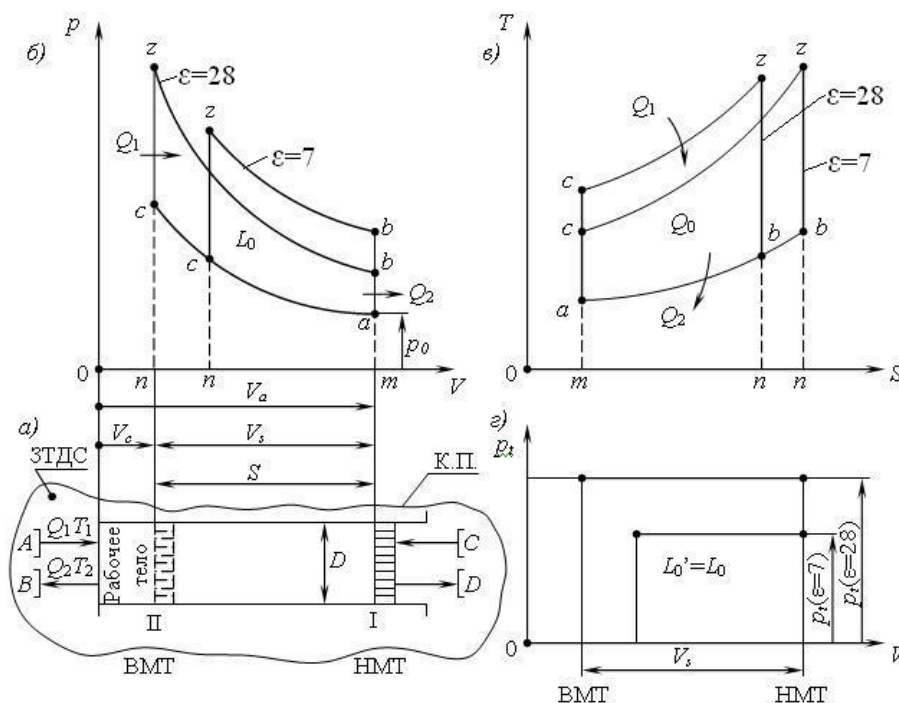


Рис. 1. Теоретический поршневой двигатель, работающий по циклу Отто, в V, p и S, T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28:

a – закрытая термодинамическая система (теоретический поршневой ДВС); b – p, V – работа, совершенная произвольным количеством рабочего тела ЗТДС; c – T, S – теплота, подведенная к рабочему телу, в ЗТДС; $z - p_t$ – среднее термодинамическое давление рабочего тела в ЗТДС

Исследование и расчет термодинамических показателей термодинамического поршневого ДВС с переменной степенью сжатия, работающий на топливах различного химического состава [1, 2, 3]:

- разрабатываем и строим геометрическую, физическую, термодинамическую и математическую модели, рис. 1, a ;
- определяем параметры состояния рабочего тела для ключевых точек процессов цикла Карно и Отто;
- определяем термодинамические характеристики рабочих процессов цикла Карно и Отто;
- определяем изменение термодинамического КПД поршневого термодинамического

ДВС, работающего по циклу Карно и Отто в зависимости от степени сжатия ε и показателя адиабаты k ;

- строим, по результатам расчета параметров состояния рабочего тела, теоретический цикл двигателя Карно и Отто (рис.1) в V,p и S,T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28;
- строим, по результатам расчета термодинамического КПД поршневого ДВС Карно и Отто, в координатах **3D поверхности** изменения термодинамического КПД η_t от степени сжатия « ε » и показателя адиабаты « k » в программном пакете MatLab, рис. 2;
- рассчитываем по математическим формулам термодинамические показатели поршневого теоретического ДВС Карно и Отто.

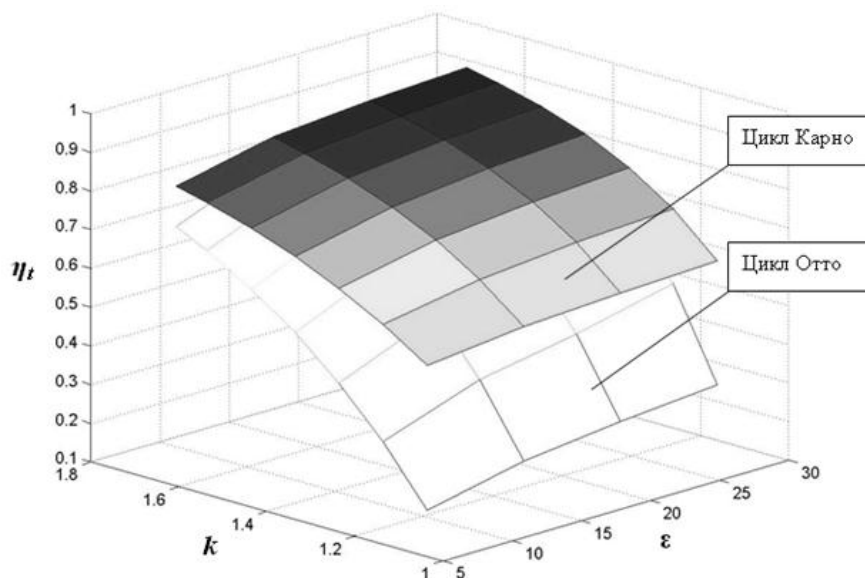


Рис. 2. Графики изменения термического КПД от степени сжатия ε и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Отто и Карно

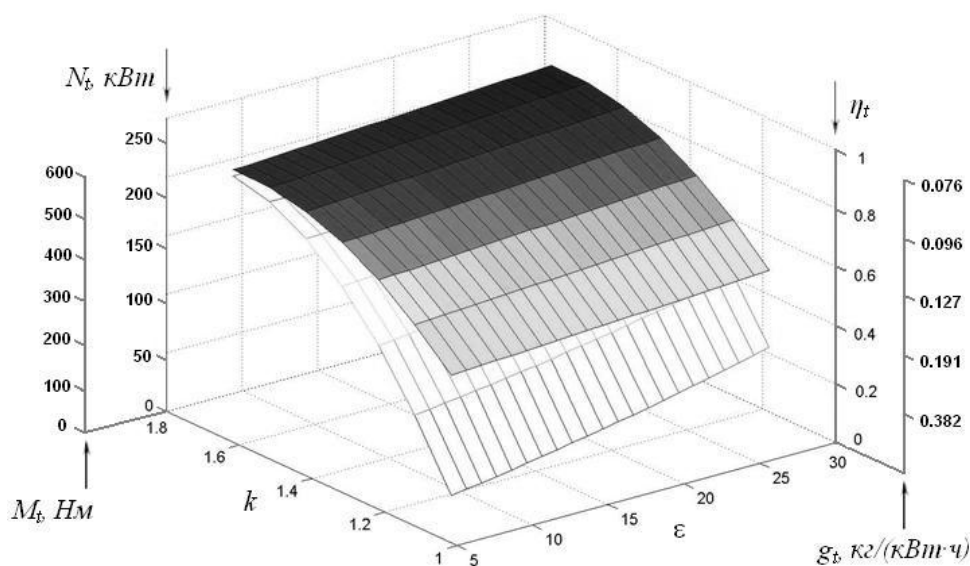


Рис. 3. График изменения термодинамических показателей, полученных по математическим моделям поршневого ДВС Карно и Отто:
 $\eta_t = f(\varepsilon; k)$; $N_t = f(\varepsilon; k)$; $M_t = f(\varepsilon; k)$; $p_t = f(\varepsilon; k)$; $g_t = f(\varepsilon; k)$

Далее строим, по результатам расчета термодинамические показатели в координатах **3D поверхности** изменения термодинамических показателей N_b , p_b , G_b , g_b , η_b , Φ_t от степени сжатия ε и показателя адиабаты k в программном пакете MatLab, рис. 3;

– анализ теоретических циклов двигателей Карно и Отто, рис. 1, показывает изменения параметров состояния рабочего тела, полезной работы циклов, среднего давления циклов.

Таблица 1

**Основные термодинамические показатели поршневого ДВС Отто,
работающего на топливе разного химического состава**

Параметры		$\varepsilon = 7:1$	$\varepsilon = 14:1$	$\varepsilon = 21:1$	$\varepsilon = 28:1$
Пылевидное угле- родное топливо $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	43,644798			129 %
	g_t	0,196	0,177	0,168	0,163
Тяжелое топливо $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	36,370665			107,5 %
	g_t	0,163	0,147	0,140	0,135
Дизельное топли- во $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	34,848172			103,0 %
	g_t	0,157	0,141	0,134	0,130
Бензин $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	33,833177			↕ 100 %
	g_t	0,152	0,137	0,130	0,126
Метан $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	29,570197			87,4 %
	g_t	0,133	0,120	0,114	0,110
Водород $k=1,4$	η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
	N_t	222	247	260	269
	G_t	14,548266			43,0 %
	g_t	0,065	0,059	0,056	0,054

Затем анализ изменений термодинамических КПД от степени сжатия ε и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Карно и Отто показывает степень приближения КПД цикла Отто к циклу Карно, рис. 2;

– анализ изменения термодинамических показателей поршневых ДВС Карно и Отто показывает основные направления совершенствования поршневого ДВС Отто;

– анализ термодинамических зависимостей, позволил вывести математические уравнения и построить математические-геометрические поверхности для поршневых ДВС Карно и

Отто, по которым можно определять основные термодинамические показатели на ранней стадии проектирования ДВС рис. 3; с использованием САПР ДВС:

для цикла Отто:

$$\eta_t = -1,866374 \cdot k^2 - 0,013819 \cdot k \cdot \varepsilon + 0,000127 \cdot \varepsilon^2 + 6,566462 \cdot k + 0,020783 \cdot \varepsilon - 4,924325;$$

для цикла Карно:

$$\eta_t = -1,147984 \cdot k^2 + 3,808762 \cdot k + 0,002955 \cdot \varepsilon - 2,325508.$$

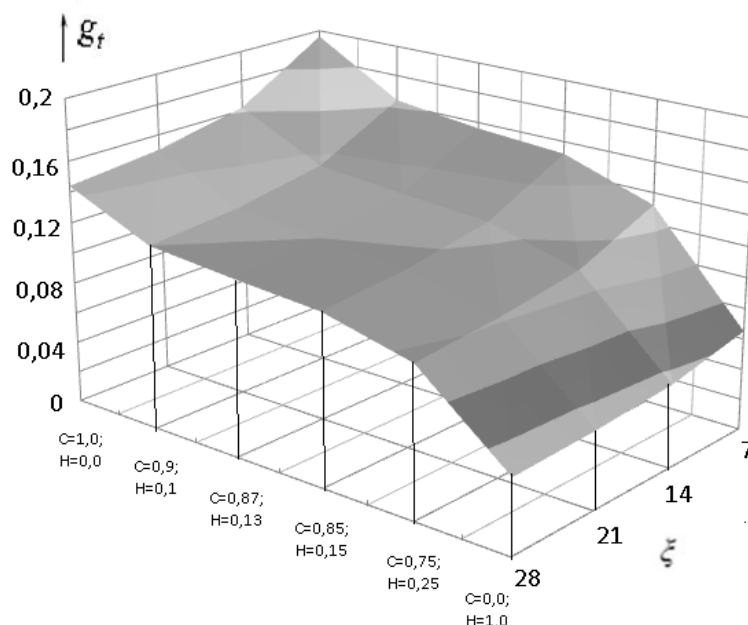


Рис. 4. График изменения термодинамической топливной экономичности поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом $g_t = f(\varepsilon, C \text{ и } H)$

Практическая ценность метода заключается в выборе **низшей теплоты сгорания** топлив с разным химическим составом, позволяющая системно и целенаправленно повышать основные термодинамические показатели поршневого ДВС на ранней стадии проектирования, рис. 4 и табл. 1.

Анализ рис.4 и табл. 1 показывает, что при постоянной массе рабочего тела в цилиндре термодинамического поршневого ДВС Отто, работающего на топливе с различным химическим составом получаем:

1) одинаковые термодинамические показатели (мощности, крутящего момента, КПД, среднее давление);

2) различные термодинамические показатели (часовой и удельный расход топлива);

3) наибольшую топливную экономичность можно получить, при работе термодинамического поршневого ДВС Отто на метане и водороде, а наименьшую – на пылевидном углеродном топливе, рис. 4 и табл. 1.

4) термодинамические показатели являются максимальными - предельными значениями, с которыми сравниваются оптимальные индикаторные, эффективные и эксплуатационные показатели действительного поршневого двигателя.

Реализация метода

Материалы методики используются:

- при создании новых и модернизации серийных поршневых ДВС на моторных предприятиях;

- на кафедре «Энергетические установки и тепловые двигатели» НГТУ им. Р.Е. Алексева при выполнении курсовых, дипломных и магистерских работ по специальности ДВС.

Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Метод оценки термодинамических показателей поршневого двигателя работающего по циклу Отто на ранней стадии проектирования / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Журнал ААИ. 2011. №2(67)С. 42-47.
2. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41-43.
3. **Захаров, Л.А.** Методика исследования и расчет термодинамических циклов поршневого ДВС с переменной степенью сжатия / Л.А. Захаров [и др.] // Сборник научных трудов международной студенческой научно-технической конференции по технической термодинамике для ДВС, посвященной 50-летию ЗФ НГТУ им. Р.Е. Алексева - НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2010.
4. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Новгород, 2010. – 33 с.
5. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Карно, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. Н.Новгород, 2010. – 14 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

I.L. Zakharov, V.L. Khimich, A.N. Tarasov, L.A. Zakharov

IMPROVING PERFORMANCE TECHNICAL PERSPECTIVE PISTON MULTIFUEL ENGINE WITH VARIABLE COMPRESSION RATIO AT AN EARLY STAGE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The results of the thermodynamic test "method of scientific research" inline four-cylinder engine ZMZ-4021.10 a working volume of 2.445 liters, working on low-octane gasoline A-76 with a variable compression ratio, the fuel of different chemical composition and the use of the working bodies of three, two, and monatomic chemical composition. Supply of heat from heat sources to the mass of the working fluid was carried out by Otto and Carnot cycle. With the use of these data according to a geometric model and the geometric characteristics of the numerical calculations are determined principally unavoidable heat losses by the second law of thermodynamics and the ways to reduce them. The physical, thermodynamic and mathematical models to improve the thermodynamic work cycle. Found a beneficial effect on improving the thermodynamic performance of power, economic and environmental reciprocating internal combustion engine when operating at rated load.

Key words: working thermodynamic cycle internal combustion engine compression ratio, type of working fluid, the average pressure of the cycle, forcing the ICE with a favorable economy.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков¹, А.С. Плехов²

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Энергосбережение»²

Обсуждаются информационные подходы к анализу и синтезу алгоритмов управления работой систем электропотребления на примере энергосберегающих комплексов с использованием компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока частотно управляемого электропривода.

Ключевые слова: энергосберегающие генерирующие комплексы переменной скорости вращения; компенсационный преобразователь частоты; информационная совместимость; взаимосвязанные системы электрооборудования; метод динамических аналогий для исследования совместимости подсистем электропотребления.

Современные комплексы электрооборудования предприятия или цеха связаны между собой в узле нагрузки системы электроснабжения и влияют друг на друга через общую шину, вызывая появление гармоник в напряжении питания, несимметрии напряжений трёхфазной сети, потери энергии за счёт потоков реактивной мощности.

В условиях современного производства на первый план выходят мероприятия по решению вопросов улучшения динамики и экономичности действующих электроприводов механизмов различного класса. Улучшение энергетических показателей путём внедрения новых алгоритмов управления является одной из приоритетных задач электропривода [1, 2].

Нагрузки распределительной сети электроснабжения характеризуются избыточностью потребляемой активной мощности по отношению к мощности, необходимой для технологического процесса; потреблением реактивной мощности; наличием нелинейностей - генерацией высших гармоник; несимметрией нагрузок, приводящей к несимметрии напряжений в трёхфазной сети. Нивелировать перечисленные проблемы возможно посредством применения средств регулируемого интеллектуального электропривода - компенсационных преобразователей [3, 4].

С другой стороны, электроприводы используются для воспроизведения заданного закона движения органов механизма («информационный» привод), либо для выполнения этими органами полезной механической работы («силовой» привод). К первой группе относятся большинство приводов подачи металлорежущих станков, испытательных, проверочных стендов, считывающих и записывающих узлов и другого оборудования. Ко второй группе относятся главные приводы металлорежущих станков, прокатных станов, приводы насосов, вентиляторов и всех других механизмов и машин, предназначенных для преобразования механической энергии в полезную работу.

Эта дуальность свойственна всем системам электропривода. Это заставляет одни из них рассматривать как системы передачи и преобразования информации, а другие – как системы электромеханического преобразования энергии. Таким образом, в первом случае

при конструировании электропривода основное внимание обращается на придание ему свойств, обеспечивающих качественное воспроизведение передающей информации. При этом в установившемся режиме работы установленная мощность электродвигателя недоиспользуется. Во втором случае доминирующее значение имеет выбор необходимой мощности электродвигателя и других элементов силового электропривода.

Однако не следует рассматривать электроприводы первой группы только как системы для воспроизведения информации, базируя все расчёты системы и исследования на положениях теории управления. Очевидно, самые совершенные управляющие устройства не смогут обеспечить заданное движение рабочих органов исполнительного механизма, если оно не обеспечено энергетически силовой частью. Таким образом, в каждом электрическом приводе осуществляются сложные взаимосвязи между его информационной и энергетическими частями.

Двойственность функций присуща также и механической части привода. Она состоит в том, что её кинетические цепи могут осуществлять жёсткие или упругие, а также нелинейные связи между элементами. Кроме того, могут обладать жёсткостью или вязкостью элементы технологического процесса, например, упругость прокатываемого материала или вязкость перекачиваемых нефтепродуктов. Поэтому различают упругость и вязкость кинематических звеньев – упругость первого рода, и упругость и вязкость тел, участвующих в технологическом процессе – второго рода.

При исследовании и расчётах целесообразно применять обобщенные математические модели электропривода. Такие модели создаются на основе использования приведённых систем. Например, при равенстве мощностей на валах двигателя и исполнительного органа рабочей машины:

$$M_c \cdot \omega_d = M_m \cdot \omega_m, \tag{1}$$

где M_c – статический момент, приведённый к валу двигателя; M_m – статический момент сопротивления механизма на его валу; ω_d и ω_m – угловая скорость вала двигателя и механизма.

Из (1) получим

$$M_c = M_m \left(\frac{\omega_m}{\omega_d} \right) = M_m / j,$$

где j – передаточное число приводного устройства.

При учёте потерь энергии

$$M_c = M_m \frac{\omega_m}{\omega_d \cdot \eta_n} = \frac{M_m}{j_n \cdot \eta_n},$$

где $j_n = j_1 \dots j_k$ – передаточное отношение передачи и его отдельных ступеней; η_n – КПД передачи и его отдельных ступеней $\eta_n = \eta_1 \dots \eta_n$.

Баланс мощностей в электромеханической системе однодвигательного электропривода можно представить в виде равенства

$$P_c = M_{p.o} \cdot \omega_{p.o} + \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j c_j \varphi_j \frac{d\varphi_j}{dt} + \sum_k m_k g \frac{dh_k}{dt} + \sum_l L_l i_l \frac{di_l}{dt} + \sum_n C_n U_n \frac{dU_n}{dt} + \Delta P_\Sigma, \tag{2}$$

Мощность электрической энергии, поступающей из сети на вход электропривода, обозначена P_c . Доля мощности, расходуемая на реализацию движения рабочего органа механизма, преодоление сил статического сопротивления, есть $P_{p.o} = M_{p.o} \cdot \omega_{p.o}$. Мощность $P_{p.o}$ может быть связана с преодолением реактивных сил на рабочем органе или активных, когда осуществляется привод, например, подъёмного механизма. В последнем случае $P_{p.o}$ частично или полностью идёт на увеличение потенциальной энергии поднимаемого груза $m_{rp} g \frac{dh}{dt} h_{rp}$. Это относится и к электроприводу турбомеханизмов, которые обеспечивают

перемещение энергоносителя по трубопроводу, преодолевая разницу в геодезических уровнях.

При работе электропривода часть энергии неизбежно теряется, рассеиваясь в виде теплоты. Суммарная мощность потерь ΔP_{Σ} складывается из потерь в обмотке электрического и электромеханического преобразователей, потерь, связанных с перемагничиванием стали, потерь в ёмкостных элементах и, наконец, потерь из-за наличия сухого и/или вязкого трения в механической части.

В соответствии с (2) возможно большое число сочетаний потоков мощности и их направлений в системе электропривода, поэтому весьма велико и число возможных энергетических режимов электропривода.

В [3, 4] показано, что для целей компенсации реактивной мощности в узлах нагрузки систем электроснабжения предприятий, имеются работоспособные технические решения для управления возбуждением синхронных двигателей и компенсационными преобразователями (КП) любых электроприводов переменного и постоянного тока со свойствами компенсации реактивной мощности.

Для промышленных установок характерно усложнение функций, выполняемых электроприводами, а также взаимная увязка этих функций в едином автоматическом цикле работы. Взаимодействие подсистем электропривода возникает как в силу общности технологического процесса, так и в результате осуществления задачи оптимального управления этим процессом. В цикле управления решаются задачи идентификации и оптимизации в энергосберегающем электроприводе, например, распределение ресурса установленной мощности компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты синхронного или асинхронного электропривода переменного тока между технологической нагрузкой и реактивной нагрузкой [4]. Последняя должна быть равной компенсируемой реактивной мощности в распределительной сети. При этом должны быть осуществлены вычисления мощности искажений, а также необходимой величины напряжения на выходе КП с учётом внешней характеристики преобразователя. Следовательно, информационная составляющая систем энергосберегающего электрооборудования играет важнейшую роль в таких комплексах.

Любые системы управления, какою бы структуру они не имели, являются системами передачи и переработки информации.

Целью управления технологическим процессом (установкой), включая преобразования как энергии, так и продукта во всех переделах, является формирование определённой траектории изменения во времени общего вектора состояния (вектора параметров режима) $x^*(t)$, которым может быть описан технологический процесс, с желаемой вероятностью. Управление реализуется способами преобразований продукта, различных видов энергии, информации о состояниях продукта и энергии в целях достижения с заданной вероятностью $P(x^*)$ производственной цели $|x^*(t) - x(t)| < \varepsilon$.

Первостепенное значение для производства имеет не количество потреблённой электроэнергии, а числовые величины, характеризующие текущие параметры режима, такие как момент на валу электропривода и частота вращения этого вала, а для технологических установок – величины других переменных состояния технологического процесса. Энергосберегающие потребители в течение технологического процесса оцениваются дополнительно коэффициентом мощности и показателями качества электроэнергии в узле нагрузки.

Квантирование физических величин, характеризующих технологический процесс, позволяет перейти к информационным описаниям. Они эквивалентны описаниям в относительных приведенных единицах, но являются более универсальными.

При одновременном наличии m однородных дискретных состояний какого-либо параметра не обладающие логическим аппаратом измерительные органы просто получают

или суммируют информацию с датчиков J_D , так что $J = mJ_D$, или при непрерывном поступлении измеряемой величины x , когда $m = x/\Delta x$, они дают информацию в битах:

$$J = x/\Delta x, \quad (3)$$

где Δx - разрешающая способность чувствительного органа.

Возможность создания общесистемного языка моделирования следует из сходства математических описаний процессов различной физической природы, в том числе электрических и механических. Для примера рассмотрим основные законы, определяющие эти процессы, - закон Кулона и закон Ньютона:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \text{ и } F = \frac{\gamma m_1 m_2}{r^2}, \quad (4)$$

где q_i, m_i – соответственно заряды и массы, находящиеся на расстоянии r друг от друга; остальные величины – известные константы.

Проквантируем соотношения в законах (4) условными квантами заряда Δq и массы Δm .

Поскольку при этом материальные свойства объекта (заряд $q/\Delta q$ и масса $m/\Delta m$) станут безразмерными, то и другое можно обозначать через M . Тогда, домножив числители и знаменатели выражений (4) на квадраты соответствующих «квантов», получим соответственно

$$F = M_1 M_2 \Delta q^2 / 4\pi\epsilon r^2 \text{ и } F = M_1 M_2 \Delta m^2 / \gamma r^2. \quad (5)$$

Чтобы полученные соотношения слились в одно, обозначим силовую проницаемость $\Delta q^2/\epsilon$ и $4\pi\Delta m^2\gamma$ через ξ , имеющую размерность Дж·м, одинаковую для обоих случаев, так что

$$F = \xi M_1 M_2 / 4\pi r^2. \quad (6)$$

Подобным образом могут быть преобразованы к универсальной форме и все другие физические уравнения. В результате получим формализованную основу для построения модели, в которой качественно различные материальные процессы подчиняются одинаковым закономерностям, отличающимися лишь в количественных проявлениях. Эти процессы будут отличаться величиной, но не размерностью, физических констант ξ, r, L, c и других.

В технических системах первичная физически воспринимаемая информация может синтезироваться в целостное восприятие J . Роль синтезатора заключается в представлении первичных информаций в виде компонент единого многомерного вектора информации J , т.е. сводится к геометрическому векторному сложению. Продуктом синтезатора будет являться восприятие, а значит и решение (управление). Вектор информации – восприятие J в отличие от своих компонент J_D или J_k , доставляемых отдельными датчиками, не имеет определённого материального носителя, а создаётся совокупным взаимодействием носителей этих компонент. Кроме того, говорить о том или ином законе распределения вероятностей можно, лишь имея всю совокупность представлений о процессе, то есть, имея целостную картину предметной области. Чтобы система (управления или информационная) имела такую картину, она должна обладать памятью и логикой, увязывающей отдельные явления в единое целое.

Необходимо решить вопрос об измерении всех участвующих в процессе управления величин, например, таких как энергетические показатели, показатели качества электроэнергии и другие характеристики оборудования и технологических процессов. Для этого необходимо логическое отражение действительности, то есть некоторых характеристик объектов и процессов. Необходимо математизировать логическое отражение путём обращения к формальной логике, законы которой должны получить математическое выражение. В формальной логике выделяется закон обратной зависимости объёма понятия n и его содержания – величины информационного потенциала H :

$$H = M/n, \quad (7)$$

где M – измеряемое содержание изучаемой или управляемой переменной, параметра процесса или объекта. Именуемая в формальной логике объёмом понятия информационная

ёмкость n численно равна количеству носителей, пошедших на формирование одного бита информационного потенциала H . Объем понятия может измеряться в программах, функциях, элементарных операциях, в битах данных.

Соотношение (7) позволяет измерять первичную чувственную информацию любого происхождения и природы, как непрерывную, так и дискретную. Для измерения дискретной информации J надо принять разрешающую способность равной «размеру» дискретного материального носителя. Например, информация о напряжении $x = 220$ В в электрической сети с точностью до $\Delta x = 1$ В равна 220 бит, а с точностью $\Delta x = 10$ В равна 22 бит, поскольку увеличение точности сопровождается пропорциональным увеличением информации.

При увеличении чувствительности прибора в K раз – в отличие от физически воспринимаемой информации J – неопределенность возрастёт не в K раз, а лишь на $\log K$.

Шеннон решил вопрос об измерении скалярных величин. Для дискретной информации:

$$H = - \sum_{k=1,m}(p_k \log(p_k)), \quad (8)$$

где m – число возможных значений параметра режима или системы; p_k – вероятность того или иного состояния измеряемой величины.

Так как всегда $H = \sum_{k=1,m}(p_k) = \int_{-\infty, \infty} f(x) dx = 1$, то для равномерных распределений при $p_k = 1/m = \text{const}$ и $f(x) = 1/x = \text{const}$, вычисление информации упрощается:

$$H = \log(m) = \log(x/\Delta x). \quad (9)$$

Например, сущность сигнала об уровне мощности искажений при вариациях углов управления двумя группами клапанов компенсационного преобразователя в диапазоне 1024 при условии равномерного распределения вероятности их состояния составляет $H = \log_2 1000 = 10$ бит.

Продуктом измерения, изучения или управления является знание или принимаемое решение – управление в нашем случае, выступающее в форме информационного потенциала H вектора физически воспринимаемой информации J . Знание (управление) – информационный потенциал явления H выступает в форме понятия. Это тоже информация, но в отличие от физически воспринимаемой информации J знание (управление, решение) представляет собой логическую информацию. То есть понятие не только не имеет определённого материального носителя, но даже и не соответствует никакому конкретному материальному объекту.

Объектом управления могут быть лишь системы, имеющие более одного состояния, причём одно или несколько из этих состояний, отвечающее оптимуму существования управляющей системы, выступает как цель управления. Цель может быть достигнута с вероятностью $p_{\text{цк}} < 1$, так что состояние k , соответствующее желаемой цели системы даже вследствие управления все же имеет некоторую неопределённость, оцениваемую энтропией процесса, называемую в [6] информационным потенциалом:

$$H_{\text{цели}} = - \sum_k p_{\text{цк}} \log(p_{\text{цк}}). \quad (10)$$

Если до управления система характеризовалась энтропией состояния $H_0 = - \sum_k p_{0k} \log(p_{0k})$, где p_{0k} – вероятность состояний системы до управления ею, то сущность управления составляет: $\Delta H = H_0 - H_{\text{цели}}$. Целью и смыслом всякого управления является изменение в ту или иную сторону этой априорной вероятности события до некоторого нового значения $p_{\text{усл}}$, где $p_{\text{усл}}$ – вероятность события при условии управления им. Этому значению $p_{\text{усл}}$ соответствует новое значение информационного потенциала: $H_{\text{усл}} = - \log(p_{\text{усл}})$.

Таким образом, сущность управления, осуществляемого источником информации, может быть охарактеризована некоторым информационным напряжением: $\Delta H = H_0 - H_{\text{усл}} = \log(p_{\text{усл}}/p_0)$. Из этого соотношения можно заключить, что информационное напряжение источника ΔH может быть как > 0 , когда его целью является увеличение вероятности события, так и < 0 , когда его целью является снижение вероятности события.

Напряжение источника информации, которым он обладает на холостом ходу, без информационной нагрузки (без учета внутреннего сопротивления – запаздывания в

источнике) в [5, 6] называют информационной движущей логикой (ИДЛ) и её можно обозначить h . Это – управляющий сигнал. ИДЛ – информация источника управляющего сигнала

Управление в общем случае – это реакция на изменение условий среды или параметров системы. Процесс работы информационной подсистемы обеспечения управления в условиях неизменности ситуации сводится к получению и анализу информации. Необходимый промежуток времени для логической обработки информации назовём временем усвоения τ . Среднее время усвоения информации называют информационным сопротивлением системы. Оно ограничивает скорость работы системы управления и создаёт запаздывание, за которое поступившая информация успевает устареть, τ обратно пропорционально пропускной способности системы, т.е. предельной скорости восприятия информации, на которую только способна система.

В линейных системах информационная сопротивляемость τ не зависит от средней скорости поступления информации: $I = \Delta J / \Delta t$, где I - информационный ток.

В линейных информационных цепях, которыми можно представлять системы управления при использовании информационного метода [DEN], вероятность того, что реальный период T поступления информации меньше среднего времени обработки информации τ , подчиняется закону $p = e^{-T/\tau \ln 2} = 2^{-T/\tau}$. Если учесть, что $H = \log_2 m$, то

$$H = \tau I. \tag{11}$$

Это соотношение подобно закону Ома для электрических цепей. Его называют информационным законом Ома [5, 6], где информационный ток определяется, как:

$$I = dJ/dt = 1/T_{cp} \text{ [бит/с]}, \text{ где } T_{cp} - \text{средний период поступления информации.}$$

Производительность САУ, связанную с обработкой информации, характеризует соотношение:

$$I * H = H * (dI/dt) = dC/dt = N, \tag{12}$$

где N - информационная мощность системы, C – содержание понятия.

Из (12) с учётом (11) получаем:

$$N = I^2 \tau = H^2 / \tau.$$

Обобщая приведённые соотношения можно писать:

$$H = J/n + I\tau = H_n + H_\tau. \tag{13}$$

Поскольку соотношения, соответствующие выражению (13), касаются не только настоящего, но и прошлого, то в такой логике присутствует подход, которого требует диалектика развития процессов. Но диалектика требует также рассмотрения явления в его возможном дальнейшем развитии в будущем. Предельный темп $1/\tau$, где τ – среднее время обработки единицы информации, может быть достигнут в общем случае по мере адаптации управляющей программы к процессам, протекающим в объекте управления. Темп обработки будет постоянно возрастать от 0 до $1/\tau$.

Пусть адаптация программы происходит с постоянной скоростью и занимает время Δt . Тогда предельное для данной части программы ускорение темпа распознавания данных составит: $1/\tau * \Delta \tau = 1/t^2_{\text{ускорения}}$, а величина, обратная этому предельному ускорению называется ригидность (индуктивность) L , которая имеет размерность квадрата времени. С учётом выражения $H = \log(m) = \log(x/\Delta x)$ получим:

$$H_L = L * (dI/dt). \tag{14}$$

Свойство ригидности (инерционности, индуктивности) объясняется неспособностью программного сегмента немедленно изменять алгоритм своей работы. Однако внешне эти свойства проявляются в активном противодействии управлению, т.е. в выработке встречного информационного напряжения, противодействующего управлению. Переходные процессы в информационных цепях такого характера будут описываться соответствующими дифференциальными уравнениями.

В самонастраивающихся технических системах ригидность сводится к инерции различной физической природы, которая характеризуется в любых инерционных звеньях

постоянной времени T . Причём, это та же самая постоянная времени, что и в информационной цепи, поскольку речь идет о двух сторонах: информационной и энергетической – одного и того же процесса управления.

Это обстоятельство означает, что нормированные, то есть, безразмерные, передаточные функции информационной и энергетической цепей одной и той же системы управления одинаковы по соответствующим каналам.

Но сочетание выражений (13) и (14) констатирует не только намерения, но и движение к цели с учетом предыстории:

$$H = H_n + H_\tau + H_L = J/n + I\tau + L*(dI/dt) = (1/n)*[I*dt + I\tau + L*(dI/dt)].$$

Из аналогии информационных и электрических цепей следует, что емкостные (с памятью) и ригидные информационные модули программного обеспечения могут оказывать заметное влияние на свойства рассматриваемых систем, поскольку на коротких временных интервалах ведут себя подобно источникам напряжения и тока. Работу любой управляющей программы можно рассматривать как циклически повторяющуюся последовательность различных структурных состояний и режимов. При этом однотипные источники не могут в этой временной последовательности соединяться друг с другом непосредственно, а лишь с разнотипными, или посредством дополнительного включения информационного сопротивления при последовательном соединении понятий (емкостей) или при параллельном соединении ригидностей (индуктивностей).

При информационной нагрузке информационный ток I создаёт падение информационного напряжения $I\tau_\epsilon$, которое снижает h до рабочего информационного напряжения:

$$\Delta H = h - I\tau_\epsilon.$$

Можно увеличить напряжение источника, либо уменьшить его внутреннее сопротивление до нужной величины, поскольку к подобным цепям применимы «Информационные законы Кирхгофа» [6].

Поэтому при проектировании источника для работы на определенную нагрузку (на заданный информационный ток) приходится с учетом внутреннего сопротивления завышать его ИДЛ на $I\tau_\epsilon$ с целью обеспечить заданную вероятность нужного события.

При этом под последовательным соединением нагрузок понимается не схемная, а временная последовательность поступления информации в нагрузки, что характерно для временной селекции. О последовательном соединении можно говорить только тогда, когда информация от источника либо сначала поступает в первую нагрузку и лишь после выполнения программы – во вторую, либо когда одна из нагрузок после выполнения всей программы сама передаёт её другой нагрузке. Общее время работы последовательно соединённых нагрузок должно равняться сумме времен отработки своих программ отдельными нагрузками.

При параллельном соединении нагрузок речь идёт о том, что несколько исполнительных органов, каждый из которых может в одиночку достичь цели, одновременно получают управляющую информацию и одновременно исполняют операции, необходимые для достижения цели, соответственно сокращая время ее достижения. Примером такого соединения можно считать известные технические решения, например, касающиеся устройств защиты элементов электропривода, которые выполняют разными способами одни и те же функции. Информационные токи обратно пропорциональны их информационным сопротивлениям. При этом источник должен обеспечить ток, равный сумме токов отдельных нагрузок. В противном случае источник снижает свое напряжение, то есть снижает вероятность достижения цели своим управлением.

Реальные информационные цепи часто представляют собой сложные комбинации источников информации и приёмников, не сводимые только к последовательным или

параллельным соединениям. В общем случае, применяя информационные законы Кирхгофа, составляем уравнения для узлов и контуров, решения которых позволяют находить информационные напряжения и токи, в том числе и в переходных режимах.

Например, рассмотрим информационную цепь заполнения памяти с ёмкостью n от источника информации с напряжением ΔH через сопротивление τ . τ – это время заполнения одной ячейки памяти. В непрерывных системах τ – это время заполнения минимально различимой доли памяти. Напряжение источника уравнивается:

$$\Delta H = \tau I + \Delta H'_n,$$

где $\Delta H'_n$ – информационное напряжение на памяти.

За время заполнения памяти ток будет изменяться, поэтому $\Delta H'_n = \int I dt$. Решение этих уравнений: $I = (\Delta H / \tau) e^{-(t/n\tau)}$. Обозначим $T = n \cdot \tau$ и назовем её постоянной времени T заполнения памяти. Обычно принято считать, что память заполняется практически при $t = (3-5) \cdot T$. В АСУ и САУ ток регламентирован и постояен в процессе заполнения памяти, например при передаче информации по каналам связи. Тогда будем иметь:

$$\Delta H = I^*(\tau + T/n). \quad (15)$$

Соотношение (8 15) позволяет определить ток заполнения памяти I при заданном времени заполнения $t = 5T$ и при заданной вероятности определённого состояния памяти после заполнения: $\Delta H = -\log_2(1/p_{\text{цел}})$. Переходя к изображениям по Лапласу получим передаточную функцию цепи заполнения памяти: $I(s)/\Delta H(s) = ns/(Ts+1)$.

Технические системы, которым приходится обучаться в процессе выполнения работы, вначале малоэффективны в работе, так как большую часть тока отправляют в память. Но по мере научения и заполнения памяти они все большую часть управляющего информационного тока реализуют в деле, то есть на нагрузке τ . Управление в процессе обучения требует от источника большей мощности, чем управление обучившимся объектом.

Ригидные цепи, хотя и трудно поддаются перестройке, весьма стойки к помехам, вызывающим кратковременные случайные изменения тока управления.

Инструментом исследования таких процессов, представленных причинно-следственными связями, является имитационное динамическое моделирование (ИДМ), которое построено на понятиях уровней (величины на выходе интегрирующих процессов – переменные состояния, вероятности попадания величин в пределы $0 < x(t) < x^*(t)$) и потоков (производные, характеризующие скорость изменения переменных состояния, плотности распределения вероятностей) [5]. Потоки и уровни связываются алгебраическими матричными зависимостями, логическими функциями или вероятностными матрицами, описывающими марковские процессы.

Информационные цепи позволяют применять к ним информационные законы Ома и Кирхгофа, определять правильность формируемой цепи при её синтезе, учитывая возможность параллельного и последовательного соединения источников информационного напряжения и информационного тока на основе применяемых в теории электротехники законов коммутации. Главное преимущество такого подхода заключается в возможности построения ИДМ в одних терминах описания гетерогенной системы электропотребления, характеризующейся в частности электромагнитными процессами, электромеханическими, информационными, а также энергетическими показателями, внешними нагрузочными характеристиками и другими функционалами параметров режима и параметров системы.

ИДМ энергосберегающего комплекса электропотребления в узле нагрузки представляет собой систему дифференциальных уравнений, правые части которых могут включать в себя всю указанную гамму вероятностных и логических зависимостей. Последние позволяют менять параметры модели в зависимости от величин переменных состояния и их функционалов, то есть в зависимости от режимов работы моделируемого

объекта. При этом нет необходимости в условиях линейности и стационарности. Такая модель в общем информационном представлении позволяет исследовать устойчивость комплекса электроприемников в узле нагрузки применительно к каждому из возможных режимов работы. Для этого могут быть применены любые методы теории автоматического управления. Авторам представляется, что наиболее оперативным методом исследования устойчивости многомерной системы является метод Гурвица.

Выводы

1. Информационная составляющая систем энергосберегающего электрооборудования играет важнейшую роль в управлении такими комплексами. Для ее реализации должны быть определены необходимые и достаточные требования в терминах электротехники, позволяющие разработчикам и наладчикам оценивать эффективность автоматических (или автоматизированных) систем управления, возможность их совершенствования и модернизации с использованием имеющегося оборудования, беря за основу алгоритмы управления электрооборудованием.

2. Целью и смыслом всякого управления является изменение в ту или иную сторону априорной вероятности события до некоторого нового значения. Таким образом, сущность управления, осуществляемого источником информации, может быть охарактеризована информационным напряжением, являющимся логической, а не энергетической характеристикой процесса управления.

3. Показатели работоспособности систем, такие, как коэффициенты усиления производительности программных модулей, вероятность достижения цели, времена переходных процессов при информационном обмене, зависящие от информационного сопротивления, ригидности, объема памяти и уровня информационного напряжения – являются объективными факторами оценки функциональной эффективности не только информационных, но любых материальных производственных систем.

4. Управление сводится к коммутации программных инструкций, которые должны соединяться по правилам «источников потенциала» и «источников тока», которыми на коротком промежутке времени в данной логике являются соответственно понятия (емкости) и ригидности (индуктивности).

5. При построении микропроцессорных систем управления с ограниченным быстродействием целесообразно заранее получить на моделях решения задач во всем диапазоне изменения их переменных и таблицы решений представить как массивы для выбора управляющих данных по совокупности входных сигналов. Это позволит избежать влияния «реактивных» параметров информационных цепей в системах управления.

Библиографический список

1. **Хватов, О.С.** Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 4. С. 126-131.
2. **Хватов, О.С.** Высокоэффективная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения на основе машины двойного питания / О.С. Хватов [и др.] // Приводная техника. – М., 2010. №5. С. 14–19.
3. **Титов, В.Г.** / Анализ использования синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности / В.Г. Титов, А.С. Плехов // Электрооборудование промышленных установок: труды Нижегородского государственного технического университета. – Нижний Новгород, 2005. С. 5–7.

4. **Плехов, А.С.** Учет мощности искажений при энергосберегающем управлении электроприводами / А.С. Плехов, В.Г. Титов, К.А. Бинда // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.- Нижний Новгород, 2011. № 4(91). С. 203–210.
5. **Денисов, А.А.** Теория больших систем управления / А.А. Денисов, Д.Н. Колесников. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 288 с.
6. **Денисов, А.А.** Информационные основы управления / А.А. Денисов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 72 с.

*Дата поступления
в редакцию 24.07.2012*

A.B. Darienkov¹, A.S. Plehov²

**INFORMATION APPROACH TO DEVELOPMENT INTELLECTUAL MANAGERIAL
SYSTEM ENERGY ECONOMY ELECTRICAL DRIVE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Ltd «Energy Economy»²

The information approaches are discussed to analysis and syntheses algorithm control functioning the systems consumption to energy on example energy economy complex with use the compensation rectifier in section of the direct current frequency operated electrical drive.

Key words: energy economy generating complexes of variable velocity of the rotation; the compensation converter of the frequency; information compatibility; the interconnected systems electrical; the method dynamic analogy for study of compatibility of the subsystems consumption of energy.

УДК 004.72

С.А. Анисимов¹, А.Б. Лоскутов¹, И.В. Полозов¹, А.И. Смирнов², Е.Н. Соснина¹

РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГРИДАХ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Общество с ограниченной ответственностью «Теком»², г. Н. Новгород

Цель работы: Исследование и разработка протокола маршрутизации системы управления электрическими сетями, состоящими из распределительных узлов, содержащих интегрированные модули системы управления электрическими сетями и обеспечивающих одновременную возможность автономной работы каждого узла и централизованное управление всей совокупностью элементов энергосети.

Научный подход: Исследование проведено с использованием графовой модели электрических сетей и с использованием графа коммутационной схемы для модели электрических схем.

Результат: Разработана общая концепция, архитектура и протокол маршрутизации сети, состоящей из узлов – интегрированных модулей системы управления электрическими сетями (ИСУЭС) и узлов распределённой системы мониторинга (РСМ).

Новизна: Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для хозяйственных задач электроэнергетики, связанных с процессами генерации, распределения и учёта электроэнергии и инвентаризации оборудования узлов. Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.516.11.6063 от 28.04.2011).

Ключевые слова: протокол маршрутизации, интегрированная система управления электрическими сетями, топология, граф.

В настоящее время под развитием электроэнергетики нередко понимают только рост генерирующих мощностей, не принимая во внимание, что увеличение лишь мощности нагрузки узла в существующих распределительных сетях с радиальной топологией приводит к усугублению последствий каскадных аварий, в результате которых без электричества остаются миллионы человек. Одним из примеров может служить авария, в которой многие города США и Канады 14 августа 2003 г. остались без электроэнергии в результате мощнейшего сбоя в работе энергосистем. Другим показательным примером является авария в энергосистеме Москвы 25 мая 2005 г. В случае использования связанной топологии сетей отказ одной части сети не приведет к потере поставки электроэнергии потребителям.

Опыт эксплуатации распределительных сетей 6-10 кВ, а также последствия известных аварий показывают, что существующая конфигурация сети 6-10 кВ не может удовлетворять необходимому уровню надежности [1]. С точки зрения надежности и равномерности распределения нагрузок наиболее рациональными являются «равномерно-распределенные сети». Распределенная электрическая сеть представляет собой совокупность равномерно-распределенных узлов потребления электрической энергии соединенных между собой равномерно-загруженными линиями одинакового сечения.

В работе [2] предложена концепция построения распределенной электрической сети, как совокупности равномерно-распределенных узлов нагрузки, организованных таким образом, чтобы территория города была покрыта равномерно-распределенной сетью, которая показана на рис. 1.

Узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты с трехлучевой архитектурой. Первый луч – питающий, второй луч – транзитный, третий луч – резервный (находится в горячем резерве). Причем для любого узла соблюдается принцип инвариантности. Узел показан на рис. 2.

Данная сеть состоит из трех связанных уровней. В распределительной сети первого уровня, показанной на рис. 1, узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты

20 кВ, в сети второго уровня – 220 кВ, а третьего уровня – свыше 500 кВ. Компланарное представление детально описано в [2] и представлено на рис. 3.

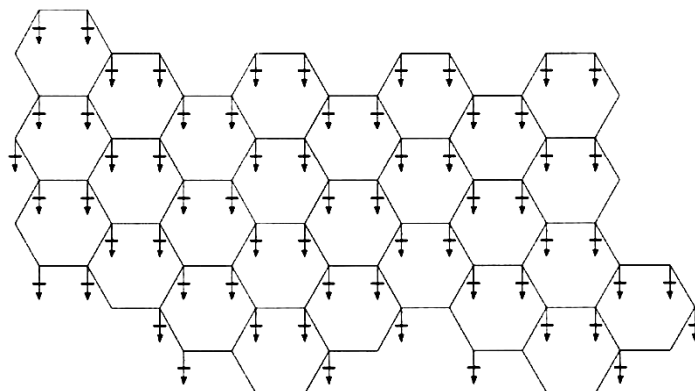


Рис. 1. Равномерно-распределенная сеть [2]

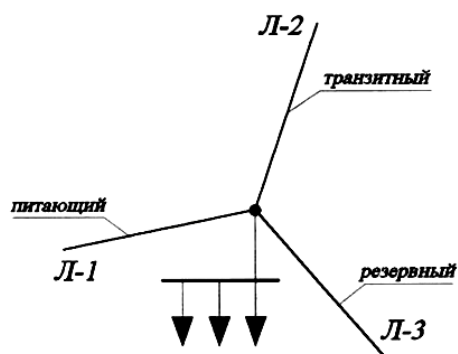


Рис. 2. Узел нагрузки [2]

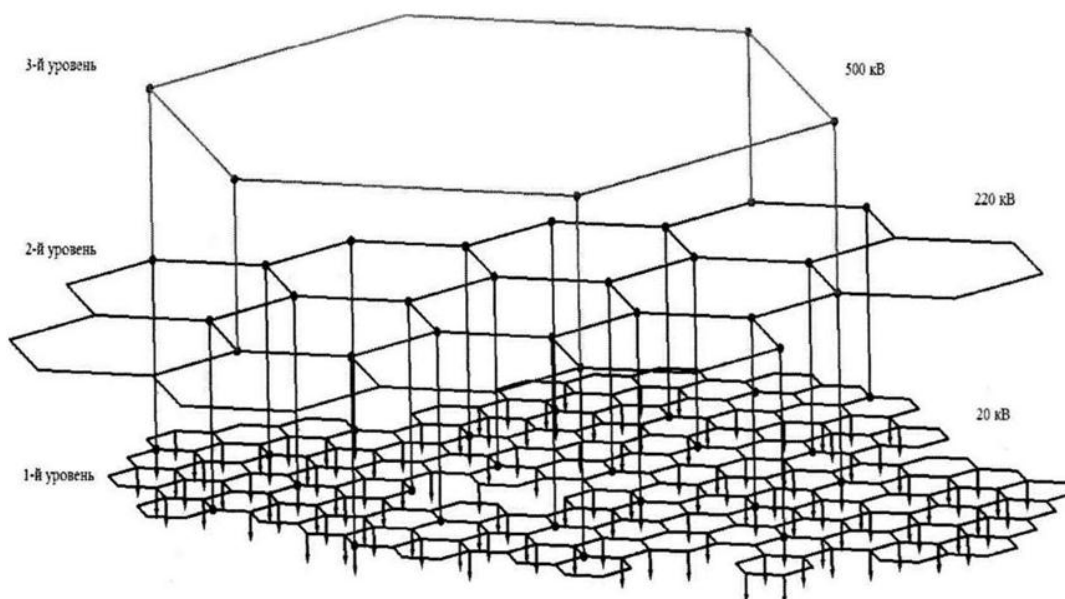


Рис. 3. Компланарное представление распределительных сетей

Основная проблема данной концепции заключается в отсутствии интеллектуальной системы управления. Предлагается для каждого узла, изображенного на рис. 3, использовать

интеллектуальный модуль. Таким образом, будет построена параллельная энергетической компьютерная сеть, которая будет осуществлять активное управление первой. Топология компьютерной сети совпадает с электрической сетью и показана на рис. 3. В работе [3] были предложены алгоритмы управления отказами первого уровня энергетического грида. Однако в настоящее время отсутствуют алгоритмы поиска ресурсов и протокол маршрутизации. В работах [4-6] показано решение аналогичных задач для децентрализованных компьютерных гридов следующего поколения.

Цель настоящей работы – разработка протокола маршрутизации между интегрированными модулями системы управления электрическими сетями (ИСУЭС), а также между ИСУЭС и распределенными системами мониторинга (РСМ) в энергетических гридах следующего поколения.

Протокол маршрутизации

Модуль ИСУЭС осуществляет диагностику, защиту, измерение, контроль, учет, оперативное хранение гетерогенной информации. Кроме этого, данный модуль передает информацию на вышестоящий уровень иерархии сети (рис. 3). Данный модуль должен обеспечивать автономную работу при нарушении связи с другими устройствами. РСМ осуществляет сбор, хранение, визуализацию и агрегацию получаемой информации.

Сеть передачи данных ИСУЭС-РСМ может в общем виде быть представлена как ненаправленный граф, в узлах которого находятся ИСУЭС, а связи между узлами представлены линиями электропередачи. К некоторым узлам графа также подключены узлы РСМ. Данные от РСМ к ИСУЭС и между ИСУЭС разных уровней иерархии передаются так же, как и между двумя ИСУЭС. Логически вся сеть разбита на области – зоны ответственности разных РСМ. Каждая такая зона ответственности управляется одной РСМ. Также в каждой зоне сети существует вторая РСМ, находящаяся в состоянии холодного резерва. Топология сети представлена на рис. 4.

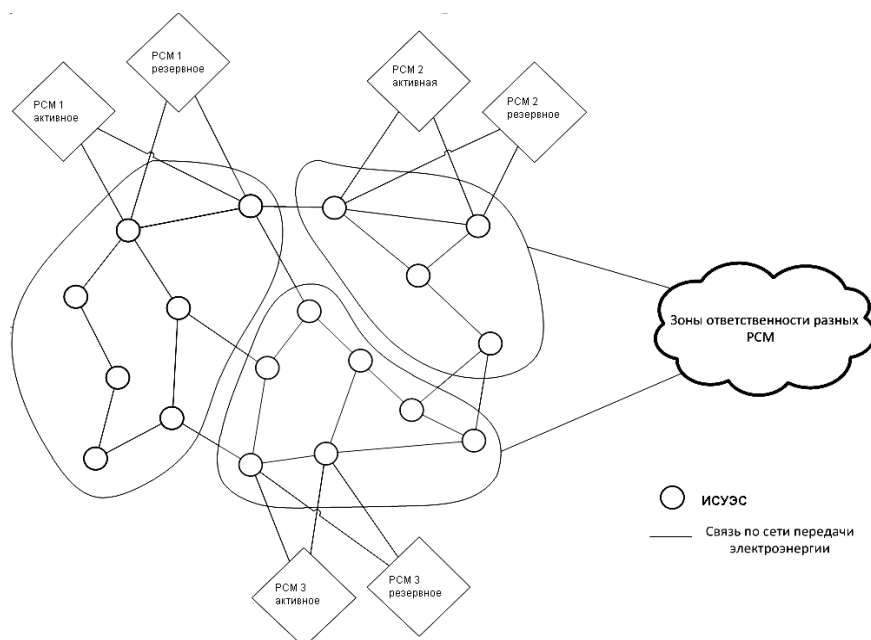


Рис. 4. Топология сети

Необходимо заметить, что данный протокол поддерживает также степень вершины графа больше трех. Данное допущение позволяет добиться универсальной работы протокола при изменении базовой модели. При построении протокола маршрутизации были приняты следующие допущения:

- 1) каждой ИСУЭС присвоен уникальный числовой идентификатор;
- 2) в каждой ИСУЭС содержится список родительских РСМ. Требуется обеспечить маршрутизацию сообщений от ИСУЭС до любой РСМ из этого списка;
- 3) идентификаторы всех РСМ хранятся в конфигурации ИСУЭС;
- 4) РСМ имеет информацию о топологии всей сети и своевременно получает информацию о ее изменении;
- 5) разрыв соединения – редкое событие (пуассоновский поток) по сравнению со скоростью передачи сообщений от ИСУЭС до РСМ.

Общие положения данного протокола показаны далее.

1. Каждая ИСУЭС содержит таблицу маршрутизации сообщений ко всем родительским РСМ. Для каждой РСМ таблица маршрутизации содержит идентификатор соседней ИСУЭС, которой надо переслать сообщение и число хопов – транзитных ИСУЭС, через которые сообщение будет проходить до РСМ.

2. Число хопов не может превышать 256 (параметр выбирается при конфигурации всего протокола).

3. Каждое сообщение содержит идентификатор отправителя, идентификатор получателя и порядковый номер, определяемый отправителем (уникальный для пары отправитель-получатель).

4. Каждое сообщение от РСМ к ИСУЭС содержит полный маршрут (список идентификаторов ИСУЭС), через которые оно будет доставлено получателю.

5. Для каждого сообщения от ИСУЭС к РСМ все транзитные ИСУЭС добавляют свой идентификатор в поле маршрута сообщения.

6. При получении любого сообщения от РСМ все ИСУЭС (не только получатель, но и транзитные ИСУЭС) анализируют длину маршрута. Если эта длина меньше числа хопов до данной РСМ, то таблица маршрутизации обновляется. Сохраняется только кратчайший маршрут. Информация об изменении таблицы маршрутизации отсылается всем соседним узлам [4].

7. При получении сообщения типов 1,2,3,6,7 получатель высылает специальное сообщение, подтверждающую доставку «АСК» (acknowledge).

8. При отсутствии «АСК» уведомления в течение 10 секунд (конфигурируемый параметр) отправитель повторно пересылает сообщение с тем же порядковым номером.

9. Получатель сохраняет сообщение в течение 2 минут. Если в этот промежуток времени получатель получает сообщение повторно, происходит повторная посылка «АСК» сообщения.

10. Если транзитный ИСУЭС не может переслать сообщение в связи с повреждением маршрута, происходит пересылка отправителю специального «ERR» сообщения. Для передачи настоящего сообщения используется инвертированный маршрут из исходного сообщения.

11. При получении «ERR» сообщения отправитель-ИСУЭС считает соединение до РСМ разорванным и действует в соответствии с пунктом 13 данного протокола.

12. При получении «ERR» сообщения отправитель-РСМ:

- a) сохраняет сообщение;
- b) помечает как недоступные все ИСУЭС, маршруты до которых идут через соединение между транзитным ИСУЭС, пославшим «ERR», и следующим ИСУЭС в маршруте исходного сообщения;
- c) отсылает широковещательное сообщение.

13. При обнаружении разрыва соединения («ERR» пакет или превышение количества попыток посылки пакета) ИСУЭС:

- a) удаляет из таблицы маршрутизации маршрут до РСМ, соединение с которым было потеряно;
 - b) отправляет всем своим соседним узлам информацию о том, что маршрут через данную ИСУЭС больше не действует (сообщение типа 10);
 - c) ждет ответа от соседних узлов (сообщение типа 10), в случае таймаута канал до соседнего узла помечается как недействующий;
 - d) Если у соседней ИСУЭС какой-либо из маршрутов проходил через удаленный маршрут, последняя удаляет данный маршрут в соответствии с пунктами 13.а-13.е;
 - e) Если у соседней ИСУЭС один из удаленных маршрутов проходит через другой путь, то она пересылает по этому маршруту специальное сообщение к РСМ «PING» с целью проверки доступности маршрута. При получении от РСМ «АСК» уведомления на «PING» сообщение маршрут признается действительным и передается обратно к проблемной ИСУЭС, которая перестроит таблицу маршрутизации. При получении «ERR» сообщения или при отсутствии «АСК» сообщения от РСМ маршрут считается недействительным и ИСУЭС переходит к шагу 14.а.
14. Сообщение «PING» – есть сообщение с пустым телом, требующее ответа в виде сообщений «АСК» или «ERR».
15. При подключении новой РСМ происходит рассылка широковещательного сообщения о своей доступности. Каждое ИСУЭС, получившее данное сообщение, отправляет «АСК» уведомление.
16. Широковещательное сообщение передается от ИСУЭС всем соседним узлам, за исключением отправителя.
17. Все идентификаторы широковещательных сообщений хранятся на ИСУЭС в течение 2 минут. Если в течение этого времени было получено сообщение от той же РСМ с тем же идентификатором, оно игнорируется.
18. При получении (первом или повторном) широковещательного сообщения ИСУЭС обновляет свою таблицу маршрутизации (в соответствии с п.6).
19. Каждая ИСУЭС хранит список родительских РСМ. Если ИСУЭС получает транзитное сообщение с отправителем или получателем РСМ не из настоящего списка, то сообщение игнорируется и при необходимости (в зависимости от типа сообщения) высылается сообщение «ERR».
20. Обнаружение восстановления разорванной связи с соседним узлом происходит в режиме опроса каждые 30 секунд (конфигурируемый параметр): по каналу связи с соседним узлом отправляется сообщение «DISCOVERY» (тип 9).
21. При получении сообщения «DISCOVERY» РСМ и ИСУЭС отправляют по тому же каналу ответ: сообщение типа 10.
22. При обнаружении восстановленного соединения (получение сообщения типа 10):
- a. ИСУЭС обновляет свою таблицу маршрутизации на основании информации в сообщении;
 - b. В случае, если таблица маршрутизации была обновлена, обновленная таблица рассылается всем соседним узлам.
23. Алгоритм восстановления соединения п. 22 выполняется для каждой ИСУЭС на конце восстановленного соединения независимо друг от друга.

Формат и виды сообщений в протоколе маршрутизации

Формат передаваемых сообщений представлен на рис. 5.

Формат сообщения в протоколе канального уровня



Рис. 5. Формат сообщений в протоколе маршрутизации

Краткое описание типов сообщений приведено в табл. 1.

Таблица 1

Тип сообщения 1	Назначение 2	Параметры 3
1. Обычное сообщение. Отправитель ИСУЭС, получатель РСМ 6. Ответ для РСМ на сообщение 2 типа	Сообщение о состоянии, аварийных сообщений и пр.	1. ID ИСУЭС-отправителя 2. ID РСМ-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Тело сообщения
2. Обычное сообщение. Отправитель РСМ, получатель ИСУЭС 7. Ответ для ИСУЭС на сообщение 1 типа	Посылка управляющих команд	1. ID РСМ-отправителя 2. ID ИСУЭС-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Полный путь до ИСУЭС-получателя (список ID транзитных ИСУЭС) 5. Тело сообщения
3. Сообщение «PING»	Пустое сообщение типа 1 (отправитель ИСУЭС, получатель РСМ)	1. ID ИСУЭС-отправителя 2. ID РСМ-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения
4. Сообщение «ACK»	Уведомление о получении сообщения типа 1-3,6-7	1. ID отправителя 2. ID получателя 3. message ID - идентификатор сообщения, совпадает с идентификатором оригинального сообщения 4. Полный путь до получателя (список ID транзитных ИСУЭС, взятый из принятого сообщения)
5. Сообщение «ERR»	Уведомление об отсутствии пути к получателю по заданному маршруту (для сообщений типа 1-3,6-7)	1. ID отправителя - транзитная ИСУЭС 2. ID получателя (отправитель не доставленного сообщения) 3. message ID - идентификатор сообщения, совпадает с идентификатором оригинального сообщения 4. Полный путь до получателя (список ID транзитных ИСУЭС, взятый из принятого сообщения)
8. Сообщение «BROADCAST»	Широковещательное сообщение, рассылаемое РСМ 1. при включении; 2. по запросу оператора; 3. с определенной периодичностью	1. ID отправителя - РСМ 2. ID получателя (всегда 0) 3. message ID - идентификатор сообщения

Окончание табл. 1

1	2	3
9. Сообщение «DISCOVERY»	Запрос информации о соседе. Не пересылается другим устройствам. Получатель отвечает на запрос сообщение «ROUTE_UPDATE»	1. ID отправителя - ИСУЭС 2. ID получателя - всегда 0. 3. message ID - идентификатор сообщения
10. Сообщение «ROUTE_UPDATE»	Ответ на запрос информации о соседе и обновление таблицы маршрутизации. Не пересылается другим устройствам.	1. ID отправителя - ИСУЭС или РСМ. 2. ID получателя - всегда 0. 3. message ID - идентификатор сообщения. 4. для РСМ - пустое сообщение 5. для ИСУЭС - набор из 4-байтных big-endian слов. 5.1. keep-alive (ответ на информацию о потере соединения) - одно слово: 0 5.2 route removed (информация о потере соединения) - три слова: 0; ID РСМ, с которым потеряна связь; -1 (все единицы) 5.3 route update (информация о маршрутах, в ответ на «DISCOVERY» или при обновлении таблицы) - $2*n+1$ слов: ID активного РСМ; ID устройства первого маршрута; число транзитных ИСУЭС в первом маршруте; ID устройства второго маршрута и тд.
11. Сообщение «ISUES_TO_ISUES»	Сообщение от одного ИСУЭС другому	1. ID отправителя 2. ID получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Полный путь до получателя

Разработан гибкий универсальный протокол маршрутизации между ИСУЭС и РСМ в энергетических сетях следующего поколения. Определен формат сообщений и исчерпывающий их список. Работа представляет большой практический интерес при развертывании энергетических сетей следующего поколения

Библиографический список

1. **Воропай, Н.И.** / Об основных положениях Концепции обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалев // Энергетическая политика, 2010. №3. С. 7–10.
2. **Лоскутов, А.Б.** / Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. №3. С. 147–151.
3. **Анисимов, С.А.** / Алгоритмы управления отказами в энергетических сетях следующего поколения / С.А. Анисимов, М.Н. Ушакова // Технические науки XVII Нижегородская сессия молодых ученых: материалы научно-технической конференции. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2012. С. 112–114.
4. **Анисимов, С.А.** / Протокол поиска ресурсов в децентрализованных сетях, обладающих свойствами тесного мира / С.А. Анисимов, В.А. Зыбин, В.В. Крылов // Труды НГТУ, 2009. Т. 80. №1. С. 13–19.
5. **Анисимов, С.А.** Распределение нагрузки в децентрализованных сетях, обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ, 2011. №3. С. 173–179.

6. **Анисимов, С.А.** Управление отказами в децентрализованных гридах обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ, 2011. №6. С. 214–218.

*Дата поступления
в редакцию 24.07.2012*

S.A. Anisimov¹, A.B. Loskutov¹, I.V. Polozov¹, A.I. Smirnov², E.N. Sosnina¹

**ROUTING PROTOCOL DEVELOPMENT IN THE DISTRIBUTED NEXT GENERATION
ELECTRICAL POWER GRID**

**Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.Y. Alexeev¹,
Tecom LLC²**

Purpose: Research and development of the routing protocol for the electrical network control system, which contains distribution centers. They support integrated module for the electrical network control system, and provide the opportunity of the off-line working of each node and centralized direction of the whole grid.

Design/methodology/approach: Research is conducted using graph model of the electrical power grid and circuit diagram for the electrical circuit model.

Findings: The main concept, architecture and routing network protocol have been developed. Network contains nodes: integrated modules for the electrical network control system and distributed monitoring system.

Originality/value: Findings of this work can be used in the area of commercial electrical power distribution, generation and metering, as well as power distribution equipment inventory. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as part of government contract from April 28 2011, № 16.516.11.6063.

Key words: Routing Protocol, integrated modules for the electrical network control system, topology, graph.

УДК 621.314.2.38

Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, А.А. Кралин

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТКОМ
ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ ТОКОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрена проблема асимметрии напряжений в сетях электроснабжения. Предложено использование преобразовательного устройства СТАТКОМ для создания устройства симметрирования токов сети и разработана система управления с использованием ШИМ напряжений и токов. Приведены результаты моделирования предложенного компенсатора токов несимметрии. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракт №16.526.12.6076 от 11.10.2011).

Ключевые слова: несимметрия напряжений, несимметрия токов реактивная мощность, СТАТКОМ.

ГОСТ 13109-97 регламентирует практически все параметры электроэнергии для обеспечения функционирования любого электрооборудования. Широко ведутся разработки в области компенсации реактивной мощности электрооборудования, стабилизации напряжения и обеспечения бесперебойной работы электрооборудования, активной и пассивной фильтрации токов высших гармоник. Одним из важных параметров электроэнергии является несимметрия напряжения. ГОСТ13109-97 устанавливает значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям - нормально допустимое 2% и предельно допустимое 4%. [1]

Несимметрия напряжений происходит только в трёхфазной сети и обусловлена неравномерным распределением нагрузок по фазам. Источниками несимметрии напряжений являются: дуговые сталеплавильные печи, тяговые подстанции переменного тока, электросварочные машины, однофазные электротермические установки и другие однофазные, двухфазные и несимметричные трёхфазные потребители электроэнергии, в том числе бытовые. Несимметрия напряжения негативно сказывается на работе электрооборудования и системы электроснабжения в целом. [2, 3]

Влияние несимметрии напряжений на работу электрооборудования: [2, 3]

1. В электрических сетях возрастают потери электроэнергии от дополнительных потерь в нулевом проводе, ухудшается функция защитных устройств.

2. Однофазные, двухфазные потребители и разные фазы трёхфазных потребителей электроэнергии работают не на номинальных напряжениях.

3. Ухудшаются режимы работы многофазных вентильных выпрямителей: значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

4. В электродвигателях, кроме отрицательного влияния несимметричных напряжений, возникают магнитные поля, вращающиеся встречно вращению ротора. Общее влияние несимметрии напряжений на электрические машины, включая трансформаторы, выливается в значительное снижение срока их службы.

Например, электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижение напряжения электродуговых печей, например, на 7 % приводит к удлинению процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения выше 5% приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения также отрицательно влияют на работу электросварочных

машин: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15% получается 100 % брак продукции.

Методы борьбы с несимметрией напряжений;

- 1) равномерное распределение нагрузки по фазам.
- 2) применение симметрирующих устройств.

Равномерное распределение нагрузки по фазам не всегда возможно, например в условиях производства оборудование может работать независимо друг от друга и создавать переменную неравномерную загрузку сети в течение дня. Использование симметрирующих устройств является более гибким и универсальным способом устранения негативного влияния несимметрии напряжений.

В рамках проекта в НГТУ им. Р.Е.Алексеева проводится исследовательская работа по анализу и исследованию режимов работы устройства симметрирования на математических и имитационных моделях, выполненного на основе трехфазного мостового инвертора рис.1. Исследуемое устройство представляет собой трехфазный мостовой инвертор, подключенный через фазные реакторы с сетью в точке где наблюдается неравномерная загрузка сети по фазам. Емкостной накопитель в цепи постоянного тока служит как источник напряжения для формирования выходного напряжения и обмена мощностью между фазами для симметрирования токов.

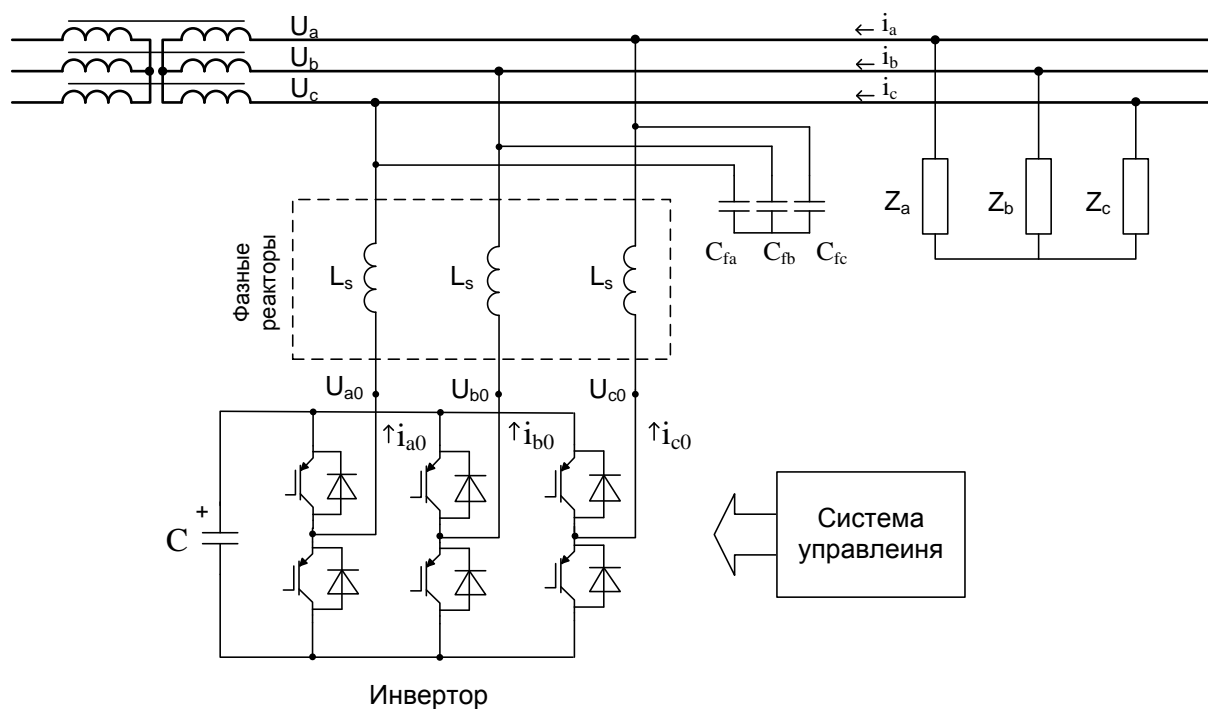


Рис. 1. Схема симметрирования сетевых токов

Аналитические выражения в синхронной системе координат представлены выражениями (1) и (2).

$$U_0^d(t) = U^d(t) + R_{L_s} \cdot i_0^d(t) - \omega L_s i_0^q(t) + L_s \frac{d}{dt} i_0^d(t), \quad (1)$$

$$U_0^q(t) = U^q(t) + R_{L_s} \cdot i_0^q(t) + \omega L_s i_0^d(t) + L_s \frac{d}{dt} i_0^q(t), \quad (2)$$

где R_{L_s} – активное сопротивление фазного реактора.

Аналитическое выражение, позволяющее построить систему управления, обеспечивающую симметрирование токов сети, представленное выражениями (1) и (2) в

синхронной системе координат, преобразуем к дискретному виду (3)-(6), учитывая, что время дискретизации T_s . Опорное расчетное напряжение на k -м шаге будет иметь задержку T_s из-за математических расчетов и смещения по фазе выходного сигнала, поэтому данную задержку следует скомпенсировать в регуляторе и системе управления [4].

$$U_0^d(k+1) = U^d(k) + R_{L_s} \cdot i_0^d(k) - \omega L_s i_0^q(k) + Kp(i^{d*}(k) - i_0^d(k)) + \Delta U_{Id}(k), \quad (3)$$

$$U_0^q(k+1) = U^q(k) + R_{L_s} \cdot i_0^q(k) + \omega L_s i_0^d(k) + Kp(i^{q*}(k) - i_0^q(k)) + \Delta U_{Iq}(k), \quad (4)$$

$$\Delta U_{Id}(k) = Ki(i^{d*}(k-1) - i_0^d(k-1)) + \Delta U_{Id}(k-1), \quad (5)$$

$$\Delta U_{Iq}(k) = Ki(i^{q*}(k-1) - i_0^q(k-1)) + \Delta U_{Iq}(k-1). \quad (6)$$

Полученные уравнения учитывают дискретность системы и единичную задержку распространения управляющего сигнала. Пропорционально-интегральные регулировочные дискретные звенья обеспечивают устойчивость системы.

Используя полученные уравнения, разработана система управления трехфазным мостовым инвертором с использованием синхронной системы координат. Несимметрия в синхронной системе координат соответствует удвоенной частоте сети, поэтому необходимо ввести полосовые фильтры для выделения полезных задающих сигналов несимметрии. Частота фильтра должна соответствовать 100 Гц, при частоте питающей сети 50 Гц. Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

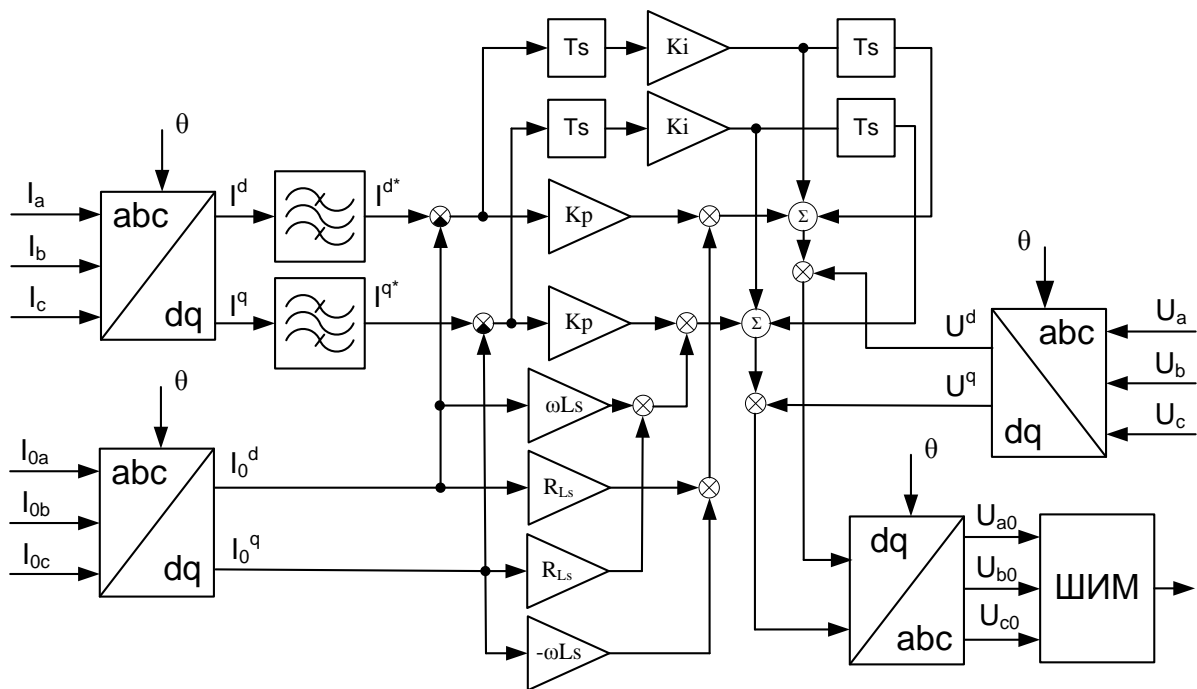


Рис. 2. Структурная блок-схема системы управления

Сигналы токов и напряжений, измеренные с помощью датчиков в точке подключения к сети, и симметрирующее устройство квантуются по времени с шагом дискретизации T_s и передаются на блоки преобразования из статической abc в синхронную dq систему координат. Математические вычисления выполняются в соответствии с уравнениями Парка. Так как рассматриваемая сеть трехпроводная, то нулевая последовательность отсутствует и не берется в расчет.

Полосовой фильтр, настроенный на 100 Гц, выполняет выделение полезной гармоники по двум составляющим d и q . Фильтр должен быть цифровым и учитывать фазовые и амплитудные искажения. Для расчетов сигналы с выхода фильтра берутся как

опорные. Блоки T_s выполняют задержку сигнала на один период квантования, тем самым выполняя функцию запоминания значения на один такт. Управления силовыми ключевыми элементами требуют управляющих импульсов, поэтому блок ШИМ преобразует трехфазные рассчитанные сигналы в импульсы.

Используя полученную систему управления, исследована работа симметрирующего устройства в пакете Matlab/Simulink. На рис. 3 представлены временные характеристики сетевых токов несимметричной нагрузки без симметрирующего устройства и с использованием такого устройства, приведенного на рис. 1. Как видно из диаграммы, перераспределение токов по фазам выравнивает амплитуды фазных токов – симметрирует токи сети.

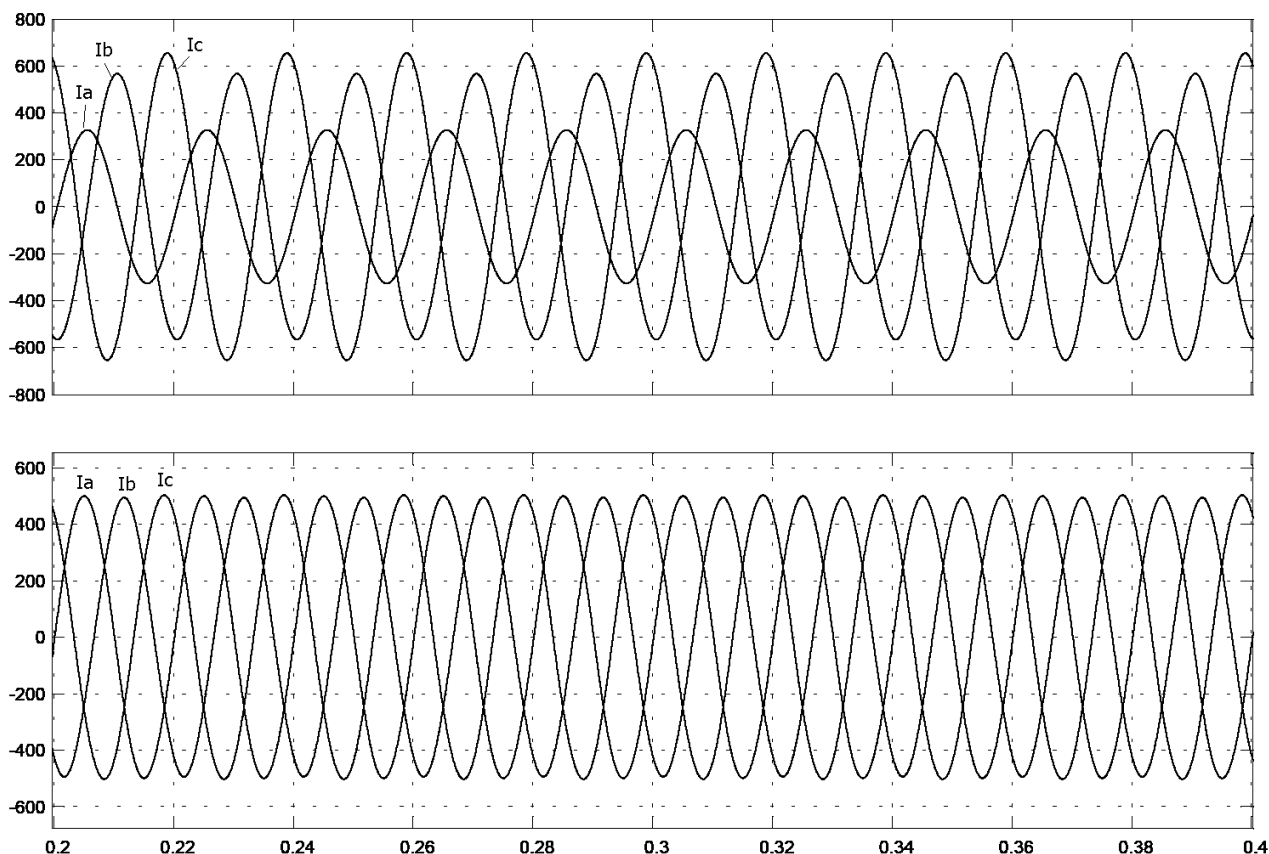


Рис. 3. Временная диаграмма сетевых токов несимметричной нагрузки без симметрирующего устройства и с симметрирующим устройством

Одним из тяжелых режимов работы трансформатора является неполнофазный режим, который также заметно влияет на несимметрию напряжений. Рассмотрим режим работы устройства при двухфазной нагрузке – фазы A и C имеют номинальную нагрузку активного характера, а нагрузка в третьей фазе B отсутствует, например, обрыв фазы. Симметрирующее устройство должно выполнять перераспределение токов между фазами для получения симметричных токов в фазах сети.

На рис. 4 представлена временная диаграмма токов неполнофазного режима без симметрирующего устройства, на которой фазные токи присутствуют только в двух фазах. Подключение предложенного симметрирующего устройства с разработанной системой управления выравнивает фазные токи по амплитуде и по фазе. Устраненная несимметрия токов в фазах не вызывает несимметрии напряжений на вторичной обмотке трансформатора. Как показали исследования, применение симметрирующего устройства в значительной степени снижает несимметричное распределение токов даже в аварийном режиме.

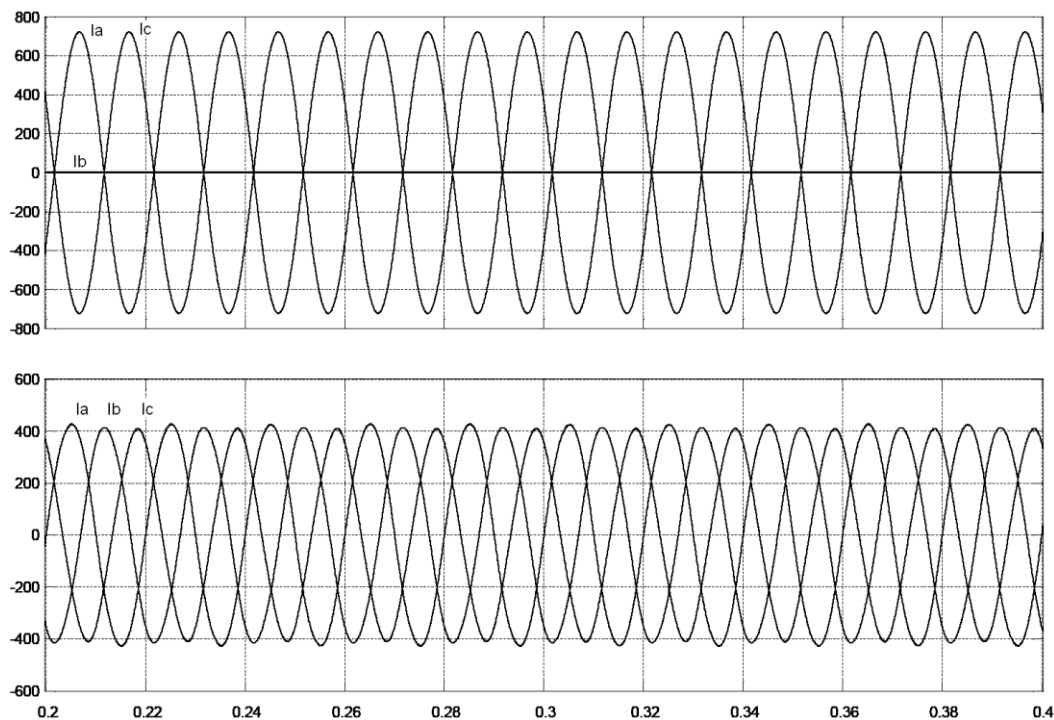


Рис. 4. Временная диаграмма неполнофазного режим работы без симметрирующего устройства и с симметрирующим устройством

По полученным аналитическим выражениям, описывающим симметрирующее устройство на основе трехфазного мостового инвертора, разработана система управления перераспределения фазных токов в синхронной dq системе координат. Эффективное снижение несимметрии токов сети устраняет несимметрию напряжений питающей сети, вызванную несимметричным потреблением фазных токов.

Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”
2. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009.
3. Шидловский, А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наук. думка, 2005.
4. Fang Lin Luo, Hong Ye, Muhammad Rashid / Digital Power Electronics and Applications / Elsevier (USA), 2005.

Дата поступления
в редакцию 09.10.2012

B.U. Altunin, I.A. Karnavskiy, A.A. Kralin

SIMULATION MODEL OF STATCOM'S SYSTEM CONTROL FOR BALANCING THE CURRENT NETWORK

This article presents the problem of voltage imbalance in supply networks. The STATCOM devices can balance current and voltage network. The control system developed using the PWM voltage and current. Simulation results of the proposed compensator current unbalance.

Key words: voltage unbalance, current unbalance reactive power STATCOM.

УДК 502:620.9

Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева

ОЦЕНКА ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 10/0,4 кВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены источники шума силовых трансформаторов. Произведена оценка шумового воздействия проектируемой трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ с тремя сухими трансформаторами суммарной номинальной мощностью 2400 кВА для территории, непосредственно прилегающей к техническому университету. Расчеты показали, что специальных мероприятий по снижению шума не требуется. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт № 16.526.12.6016 от 11.10.2011 г.)

Ключевые слова: сухой трансформатор, трансформаторная подстанция, шум.

Производство энергии, являющееся необходимым средством для существования и развития человечества, оказывает существенное воздействие на окружающую среду. От энергетики в решающей мере зависит экономический потенциал государств и благосостояние людей. Самые острые экологические проблемы (изменение климата, кислотные осадки, всеобщее загрязнение среды и другие) прямо или косвенно связаны с производством или использованием энергии. Поэтому человек все больше уделяет внимание экологическому аспекту энергетики. Одним из таких воздействий является шум, создаваемый энергетическим оборудованием.

На рис. 1 показано воздействие энергоустановок на окружающую среду



Рис. 1. Воздействие энергоустановок на окружающую среду

В настоящее время "шумовая болезнь" характеризуется комплексом симптомов: снижение слуховой чувствительности; изменение функции пищеварения, выражающейся в понижении кислотности; сердечно-сосудистая недостаточность; нейроэндокринные расстройства. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т.д. Воздействие шума может вызывать негативные изменения эмоционального состояния человека, вплоть до стрессовых.

Силовые трансформаторы понизительных подстанций являются одним из источников шума для производственных территорий и окружающего района. Шум трансформаторов вызывается вибрацией активной части, а также вентиляторами системы охлаждения. Существенное влияние на шум трансформатора оказывают резонансные явления, возникающие в его отдельных элементах [1].

Вибрация активной части трансформатора обусловлена магнитострикционными и электромагнитными силами в магнитной системе и динамическими силами в обмотках. В трансформаторах преобладает магнитострикционная составляющая вибрации.

Магнитострикция – это явление деформации кристаллической решетки магнитного материала при его намагничивании. В процессе возрастания индукции сначала происходит смещение границ кристаллов материала, а затем их вращение, что ведет к изменению линейных размеров стали. Магнитострикционное удлинение листа стали может достигать нескольких десятков микрон на один метр длины. При перемагничивании магнитной системы трансформаторов индукция в ней достигает максимума дважды за один период частоты переменного тока, что соответствует двукратному изменению длины листов стали магнитной системы. Это ведет к периодическим колебаниям магнитной системы на удвоенной частоте переменного электрического тока (вибрация с частотой 100 Гц при частоте сети 50 Гц).

Проявление магнитных сил наиболее выражено в стыковых соединениях. В шихтованных магнитных системах магнитный поток вынужден перетекать из листа в лист в воздушном зазоре, образующимся за счет неплотной стыковки листов стали. При этом возникают поперечные силы, приводящие к изгибным колебаниям листов. Поскольку листы стали на участках, соседствующих с зазорами, перенасыщаются, здесь увеличиваются также и магнитострикционные силы. Одним из источников шума трансформаторов является обмотка, проводники которой вибрируют под действием сил взаимного притяжения при протекании в них переменного тока в режиме нагрузки. Генерирующими звук поверхностями в данном случае являются торцевые части обмоток, прессующие кольца, ярмовые балки, детали крепления.

Уровни звуковой мощности трансформаторов пропорциональны их массогабаритным параметрам, хотя на практике эта зависимость может значительно меняться под действием разного рода конструктивно-технологических факторов. Уровень звуковой мощности трансформатора прямо пропорционален длине стержня магнитной системы и зависит от свойств электротехнической стали, распределения поперечных магнитных потоков в углах и над средним стержнем магнитной системы, а также от высших гармоник магнитострикции и магнитного потока на отдельных участках магнитной системы, что определяет известную приближенность расчета. При прочих равных условиях увеличение длины стержня вдвое повышает уровень звука на 6 дБ. Резонанс магнитной системы может увеличить уровень звука трансформатора на 5 дБ.

Характерным для магнитных систем трансформаторов является густой спектр собственных частот в диапазоне 1-3 кГц, обусловленных отдельными пластинами электротехнической стали. Последние не всегда монолитно стянуты, в толще магнитной системы имеются пустоты, определяемые коэффициентом заполнения стали, что ведет к высокочастотным резонансным колебаниям пластин и их участков.

Существует прямая зависимость уровней звуковой мощности трансформаторов от их электрической мощности. Эта зависимость может меняться с изменением конструкции и материалов, индукции или массы при сохранении на прежнем уровне прочих параметров. Для геометрически подобных трансформаторов их уровень звуковой мощности пропорционален массе (M) или линейным размерам в третьей степени, а также пропорционален электрической мощности трансформатора в степени $3/4$.

Влияние индукции: уровень звука трансформатора изменяется на 3 дБ при изменении индукции на 10%. Это соотношение характерно для основной гармоники шума трансформатора. Высшие гармоники (3-я и 5-я) при снижении индукции уменьшаются быстрее: на 4-5 дБ при снижении индукции на 10%, что связано с улучшением синусоидальности индукции в отдельных участках магнитной системы.

Уровни вибрации и звука трансформатора зависят от характера распределения магнитных потоков по сечению сердечника. Индукция во внутренних углах шихтованных рамных магнитных систем может достигать удвоенного значения от номинального, что является предпосылкой повышения вибраций и шума.

Для трехфазных магнитных систем характерно повышенное содержание 3-й гармоники шума, что связано как с фазовым сдвигом колебаний отдельных стержней, так и с наличием значительной 3-й гармоники индукции. Повышенным шумом и вибрацией отличаются симметричные трехфазные магнитные системы из навитых магнитопроводов, где 3-я гармоника индукции может достигать 40% от основной гармоники.

Бак обычно повышает уровень звука источника, т.е. активной части трансформатора, как за счет увеличения поверхности звукового излучения, так и за счет резонанса стенок бака. Это повышение характерно для низших гармоник звука. Более высокие гармоники источника, звукоизолированные баком, могут и снижаться.

Спектральное содержание характеристик шума трансформаторов связано с частотой питающего напряжения. У трехфазных трансформаторов (частота сети - 50 Гц) наиболее ярко выражены первые три гармоники - 100, 200, 300 Гц.

Включение трансформатора в работу приводит к повышенному шуму вследствие остаточной намагниченности магнитопровода. Из-за перенасыщения магнитопровода уровень шума может превысить уровень при нормальной работе на 20 дБ. Снижение шума до установившегося состояния после включения может длиться до 6 часов.

Спецификой сухих трансформаторов мощностью до 1000 кВА включительно является большое разнообразие конструкций магнитных систем, среди которых можно назвать шихтованные, навитые, стыковые (склеиваемые из двух половин), симметричные пространственные при множестве модификаций, обусловленных типами стыков, видами шихтовки, характером прессовки и т.д.

Наиболее шумными являются симметричные пространственные магнитные системы 3-фазных трансформаторов, укомплектованные тремя О-образными навитыми магнитными элементами. Повышенная виброактивность такой системы обусловлена резкой несинусоидальностью индукции в отдельных элементах, низкой жесткостью конструкции и собственными частотами, находящимися в диапазоне 100-300 Гц.

Более всего распространены сухие трансформаторы 3-фазные с шихтованной магнитной системой. Шум активной части таких трансформаторов без кожуха не высок. Однако он резко возрастает у полностью собранного трансформатора с кожухом, который увеличивает поверхность звукоизлучения трансформатора и к тому же не обладает достаточной жесткостью, будучи изготовлен из тонколистовой стали.

Наибольший шум (иногда в области частот 1000 Гц) имеет место во внутренних углах окон магнитопровода. На этих участках имеет место повышенная индукция (до 2Тл), вызывающая возрастание вибрации и, соответственно, шума. Поскольку такие участки сухих трансформаторов доступны, снижение шума осуществляется путем заливки внутренних углов окон магнитопровода эпоксидным компаундом.

В процессе эксплуатации может ослабнуть прессовка магнитной системы. В частности, бывает ослаблена стяжка листов стержней магнитопровода, функции которой выполняет насаженная на стержень обмотка - дистанцирующие рейки свободно перемещаются от руки.

Расчет шума трансформаторов подстанции

Для оценки шумового воздействия проектируемой трансформаторной подстанции (ТП), которую предполагается установить во дворе учебного корпуса технического университета, необходимо произвести расчет уровня звукового давления на территории, прилегающей к учебным корпусам.

ТП размещена в кирпичном здании, имеющем размеры 6 х 6 х 4 м.

На ТП будет установлено 3 сухих трансформатора: номинальной мощностью 400 кВА – 1 шт; 1000 кВА – 2 шт классом напряжения 10/0,4 кВ. Трансформаторы изготовлены на ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш» [3].

Силовые трансформаторы с литой изоляцией предназначены для распределительных подстанций для внутренней установки и обладают высокой механической и термической прочностью. Материал обмоток – алюминий. Магнитопровод изготовлен из листов холоднокатаной электротехнической стали по технологии «Step-lap», позволяющей значительно снизить уровень шума. Обмотки низшего напряжения намотаны из алюминиевой ленты с изоляцией между витками, пропитаны смолой. Обмотки высшего напряжения капсулированного типа выполнены методом литья в вакууме на основе многокомпонентной смолы. Охлаждение естественное воздушное. Степень защиты от IP00 до IP 23. Кожух имеет вентиляционные отверстия для охлаждения.

Регламентируемой шумовой характеристикой для трансформаторов является скорректированный уровень звуковой мощности $L_{РА}$, дБА, который указывается в технических характеристиках трансформатора. Скорректированный уровень звуковой мощности для сухих трансформаторов представлен в табл. 1.

Таблица 1
Шумовые характеристики трансформаторов ТСЛ

Мощность (кВА)	Корректированный уровень звуковой мощности не более $L_{РА}$, дБА
250	65
400	68
630	70
1000	74

Акустический расчет уровня звукового давления L , дБ, в помещении с несколькими источниками шума [2]:

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^m \frac{10^{0,1L_{wi}} \cdot \chi_i \Phi_i}{\Omega \cdot r_i^2} + \frac{4}{kB} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{wi}} \right),$$

где L_w - октавный уровень звуковой мощности, дБ; χ - коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля; Φ - фактор направленности источника шума; Ω - пространственный угол излучения источника, рад; r - расстояние от акустического центра источника шума до расчетной точки, м; k - коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении; B - акустическая постоянная помещения, м².

Акустическая постоянная помещения:

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{cp}},$$

где α_{cp} - средний коэффициент звукопоглощения; A - эквивалентная площадь звукопоглощения, м².

Эквивалентная площадь звукопоглощения:

$$A = \alpha_i \cdot S_i,$$

где α_i - коэффициент звукопоглощения i -й поверхности; S_i - площадь i -й поверхности, м².

Для расчета приняты следующие значения в соответствии с [2]:

- коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля: $\chi = 2$;
- фактор направленности источника шума: $\Phi = 1$ (для источников с равномерным излучением);
- пространственный угол излучения источника: $\Omega = 2\pi$ рад (для источника шума, находящегося на полу);

- расстояние от акустического центра источника шума до расчетной точки: $r = 1\text{ м}$;
- коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении: $k=1,25$;
- средний коэффициент звукопоглощения: $\alpha_{\text{ср}}=0,15$;
- площадь i -й поверхности: $S=64\text{ м}^2$;
- эквивалентная площадь звукопоглощения: $A=9,6\text{ м}^2$;
- акустическая постоянная помещения: $B=11,3\text{ м}^2$.

Результатом расчета является величина шума внутри здания ТП:

$$L = 75,3 \text{ дБА.}$$

Уровень звуковой мощности шума $L_w^{\text{пп}}$, дБ, прошедшей через ограждение на территорию:

$$L_w^{\text{пп}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{wi}} - 10 \lg B_{\text{ш}} - 10 \lg K + \lg S - R,$$

где L_{wi} - уровень звуковой мощности i -го источника, дБА; $B_{\text{ш}}$ - акустическая постоянная помещения с источником (источниками) шума, м^2 ; S - площадь ограждения, м^2 ; R - изоляция воздушного шума ограждением, дБА.

Для расчета приняты следующие значения: $L_{wi} = 80\text{ дБА}$, $B_{\text{ш}} = 11,3\text{ м}^2$, $S = 24\text{ м}^2$, $R = 47\text{ дБ}$ согласно [2] уменьшение шума 15-сантиметровой оштукатуренной стены в полкирпича.

В результате расчета получается, что величина шума с наружной стороны здания ТП составляет $L_w^{\text{пп}} = 30,6\text{ дБА}$.

Согласно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки», допустимый уровень шума на территории, прилегающей к зданию университета, не должен превышать 55 дБА.

Таким образом, шум, создаваемый проектируемой ТП 10/0,4кВ с тремя сухими трансформаторами суммарной номинальной мощностью 2400 кВА, будет ниже допустимого для территории, непосредственно прилегающей к техническому университету. Поэтому специальных мероприятий по снижению шума не требуется.

Библиографический список

1. Лазароиу, Д.Ф. Шум электрических машин и трансформаторов: [пер. с рум.] / Д. Ф. Лазароиу, Н. Бикир. – М.: Энергия, 1973. – 271 с.
2. СНиП 23.03.2003 "Защита от шума".
3. <http://www.uetm.ru>. Веб сайт ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш»

Дата поступления
в редакцию 06.11.2012

E.N. Sosnina, O.V. Masleeva

THE NOISE IMPACT ASSESSMENT TRANSFORMER SUBSTATION 10/0, 4 KV ENVIRONMENTAL

Purpose: Determination of the need for special measures to reduce noise in the design of the transformer substation 10/0, 4 kV.

Design/methodology/approach: By calculating the sound power level of noise exposure assessed projected substation substation 10/0, 4 kV with three dry transformers total nominal capacity of 2400 kVA for the area immediately adjacent to the Technical University.

Findings: Calculations of the sound power level, the special measures to reduce the noise when installing substation 10/0, 4 kV is required.

Research limitations/implications: Research limitations — electric power industry.

Originality/value: Raised the important question of the environmental impact of power equipment on the environment.

Key words: dry transformer, transformer substation, noise.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74.041

В.А. Изотов, А.А. Акутин, Ю.С. Федулова

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДОЖДЕВОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева

Представлена методика расчета исполняемых размеров дождевой литниковой системы для отливок из алюминиевых сплавов, обеспечивающая отсутствие в отливке брака по «вторичному шлакообразованию» и «спай» на стадии заполнения полости литейной формы в условиях наложенных ограничений на заполняемость. Проведено практическое опробование разработанной методики расчета. Оценена возможность применения дождевого подвода для отливок из магниевых сплавов.

Ключевые слова: направленное затвердевание, дождевая литниковая система, «вторичное шлакообразование», «спай», методика расчета, минимально допустимая скорость заполнения, критическое значение силы удара струи, температура заливки.

Получение отливок из алюминиевых сплавов является очень сложной задачей, так как эти сплавы имеют высокое сродство к кислороду, малую удельную массу и высокую теплопроводность, сплавы эти относятся к группе А, то есть к сплавам, которые имеют склонность к образованию браков типа «спай», «вторичное шлакообразование», «рыхлота» (в зоне образующегося «проточного течения»). Для получения алюминиевых отливок, в основном, используются литниковые системы типа: сифонной, ярусной, вертикально-щелевой, что не всегда позволяет получать годные корпусные тонкостенные отливки. Это связано с тем, что часть отливки становится литниковой системой для более удаленных частей, что приводит к различным усадочным дефектам. Поэтому совершенствование подачи металла в полость формы без использования ее в роли литниковой системы является очень актуальной задачей. Перспективной для литья корпусных отливок из алюминиевых сплавов может стать дождевая литниковая система, которая нашла применение при получении отливок из чугуна. В тоже время принято, что верхний подвод металла для литья алюминиевых сплавов применять и исследовать нельзя, и проведенный анализ показывает, что надежные методики расчета дождевых литниковых систем для алюминиевых сплавов отсутствуют, хотя системы такого вида получили достаточно широкое распространение в практике литья благодаря ряду преимуществ. Во-первых, подобные литниковые системы дают возможность обеспечить направленное заполнение и затвердевание отливок, что позволяет получать годные отливки, во-вторых, они обеспечивают достаточно высокий коэффициент использования металла. Однако, как показали теоретические исследования, методик проектирования таких литниковых систем не существует. Поэтому проблема разработки и проектирования дождевой литниковой системы для отливок из алюминиевых сплавов с учетом выбора оптимальных размеров, параметров заливки и условий заполнения полости форм расплавом, обеспечивающих необходимое качество отливок, является весьма актуальной.

Исследования, проведенные ранее авторами [1–3], позволили изучить характер течения сплава в дождевой литниковой системе, установить факторы, влияющие на возникно-

вание в отливке дефектов «вторичное шлакообразование», «спай», «неслитина» на стадии заполнения полости литейной формы и наложить ограничения на заполняемость, обеспечивая при этом отсутствие образования данных видов брака. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана методика расчета исполняемых размеров дождевой литниковой системы для отливок из алюминиевых сплавов, которая заключается в следующем:

1) принимаются начальные условия: толщина стенки отливки δ , напор H , высота падения расплава в полости литейной формы h ;

2) определение максимально возможного диаметра струи $d_{\text{отв.макс}}$, м:

$$d_{\text{отв.макс}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{N_{\text{кр}}}{2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot g \cdot \mu \cdot \sqrt{H(\mu^2 H + h)}}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м³; μ – коэффициент расхода литниковой системы, $\mu = 0,8$; H – напор металла, м. Рекомендуемый напор $H = 0,05 - 0,1$ м; h – высота падения металла, м; $N_{\text{кр}}$ – критическое значение величины силы удара струи расплава, $N_{\text{кр}} = 0,28$ Н.

Диаметр питателя принимается с учетом условия:

$$d_{\text{отв}} \leq \delta \quad (2)$$

$$d_{\text{отв}} \leq d_{\text{отв.макс}} \quad (3)$$

3) определение минимально допустимой скорости заполнения полости литейной формы расплавом $\omega_{\text{ф.мин}}$, м/с;

$$\omega_{\text{ф.мин}} = \left(\frac{b_{\text{ф}}}{b_{\text{м}}}\right)^{-3,21} \cdot \left(\frac{H}{l_{\text{ом}}}\right)^{-1,89} \cdot \left(\frac{\sigma \cdot v}{l_{\text{оф}}^2 \cdot \rho_{\text{м}} \cdot g \cdot h}\right)^{0,503} \quad (4)$$

где $b_{\text{ф}}$ и $b_{\text{м}}$ – теплоаккумулирующие способности формы и металла соответственно;

4) определение минимального количества питателей, обеспечивающих заполнение полости литейной формы:

$$n_{\text{мин}} = b_{\text{отл}} / 120 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где $b_{\text{отл}}$ – длина стенки отливки, в которую подводятся «дождевые» питатели.

Количество питателей принимается с учетом условия:

$$n > n_{\text{мин}}, \quad (6)$$

5) определение расхода расплава через питатели:

$$Q_{\text{отв}} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (7)$$

Должно выполняться условие неразрывности потока:

$$Q_{\text{ф}} = Q_{\text{отв}}; \quad (8)$$

6) определение скорости заполнения полости формы расплавом:

$$\omega_{\delta} = \frac{Q_{\delta}}{F_{\delta}}. \quad (9)$$

Должно выполняться условие:

$$\omega_{\text{ф}} \geq \omega_{\text{ф.мин}}. \quad (10)$$

Если оно не выполняется, то необходимо увеличить расход, приняв больше количество питателей.

7) определение длины «компактной» части струи расплава:

$$l = L \cdot d_{\text{отв}}, \quad (11)$$

$$L = 10,17 \cdot \text{Fr}^{0,16} \cdot \text{We}^{0,408}. \quad (12)$$

Должно выполняться условие:

$$l \geq h_{\text{отл}}. \quad (12)$$

Если условие (12) выполняется, то отливка заливается и обеспечиваются условия бездефектного заполнения с рассчитанными параметрами литья. Если условие (12) не выполняется, то необходимо увеличить диаметр отверстия, но при этом должны выполняться условия (2) и (3). Затем провести расчет повторно. Если условия (2) и (3) не выполняются, то бездефектное заполнение полости литейной формы невозможно и необходимо сменить вид литниковой системы;

6) из соотношения $\Sigma F_{\text{пит}} : \Sigma F_{\text{лк}} : \Sigma F_{\text{ст}} = 1 : 2 : 1$ (1 : 3 : 1) (условие замкнутости литниковой системы) рассчитываются геометрические размеры элементов литниковой системы.

7) определение коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м²·К):

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_{\text{дж}} \cdot \lambda}{l_0}, \quad (13)$$

где λ – теплопроводность металла, Вт/м·К; $\text{Nu}_{\text{дж}}$ – критерий Нуссельта, характеризует отношение теплоотдачи в результате движения потока к передаче теплоты чистой теплопроводностью:

$$\text{Nu}_{\text{дж}} = 0,000017 \cdot \text{Re}_{\text{дж}}^{1,547}, \quad \text{Re}_{\text{дж}} \leq 80, \quad (14)$$

где $\text{Re}_{\text{дж}}$ – критерий Пекле, представляет собой среднюю меру отношения интенсивности переноса теплоты теплопроводностью:

$$\text{Re}_{\text{дж}} = \frac{\omega_{\text{ср}} \cdot l_0}{a}, \quad (15)$$

где a – коэффициент температуропроводности; $\omega_{\text{ср}}$ – средняя скорость падения струи расплава:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\omega_0 + \omega_1}{2} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} + \sqrt{2 \cdot g \cdot (\mu^2 \cdot H + h)}}{2}; \quad (16)$$

8) определение температуры заливки расплава:

$$T_{\text{зал}} = \frac{\alpha \cdot T_{\text{пов}} \cdot \Delta\tau - 2 \cdot \Delta\tau \cdot \alpha \cdot T_{\text{окр}} + 2 \cdot c \cdot \rho \cdot l_0 \cdot T_{\text{пов}}}{(2 \cdot c \cdot \rho \cdot l_0 - \Delta\tau \cdot \alpha) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(0,936 \left(\frac{\text{Re}_{\text{идж}} \cdot l_{0\text{илк}}}{L_{\text{илк}}} \right)^{-0,75} \right) \right)}, \quad (17)$$

где $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности расплава, $T_{\text{пов}} = T_L + \Delta T_{\text{распл}}$, К; T_L – температура ликвификации сплава, К; $\Delta T_{\text{распл}}$ – изменение температуры расплава, К; $\Delta T_{\text{распл}} = 30$ °С – значение получено экспериментально; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, К; $\Delta\tau$ – время падения металла, с:

$$\Delta\tau = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (\mu^2 \cdot H + h)}}; \quad (18)$$

c – теплоемкость металла, Дж/кг·К; $\Delta T_{\text{лс}}$ – потери теплоты металла при его течении в каналах литниковой системы, град:

$$\Delta T_{\text{лс}} = T_{\text{зал}} \cdot \sum_{i=1}^n \left(0,936 \left(\text{Re}_{\text{идж}} \cdot l_{0\text{илк}} / L_{\text{илк}} \right)^{-0,75} \right); \quad (19)$$

где $\text{Re}_{\text{идж}}$ – критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{идж}} = \frac{\omega_{\text{илк}} \cdot l_{0\text{илк}}}{\nu}, \quad (20)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава, м²/с; $L_{\text{илк}}$ – длина литникового канала, м; $l_{0\text{илк}}$ – характерный размер элемента литниковой системы, м:

$$l_{0\text{илк}} = \frac{F_i}{P_i}, \quad (21)$$

где F_i – площадь сечения литникового канала, м²; P_i – периметр сечения литникового канала, м; n – количество литниковых каналов, в которых определяется охлаждение расплава.

По разработанной методике проведен расчет дождевой литниковой системы для отливки «Крышка» (рис. 1) из сплава АК12, массой 2,4 кг, габаритные размеры: 310×162×129 мм.

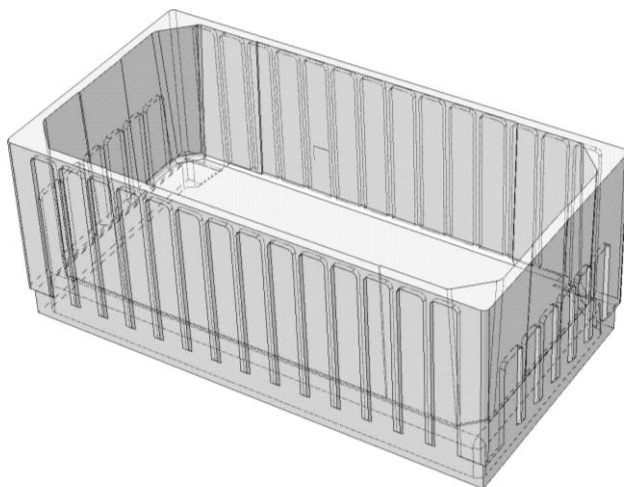


Рис. 1. 3D-модель отливки «Крышка»

Отливка крышка с дождевой литниковой системой представлена на рис. 2.

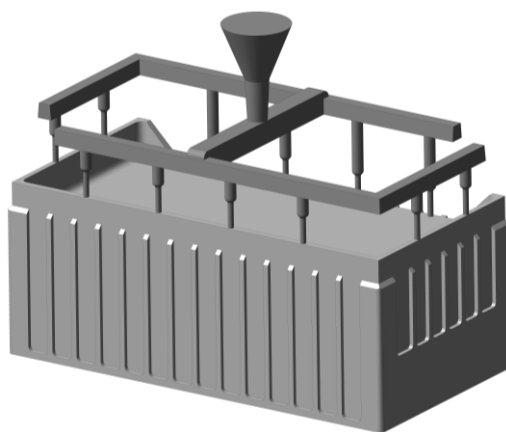


Рис. 2. Отливка с дождевым подводом расплава

Для подтверждения адекватности разработанной методике по рассчитанным исполняемым размерам дождевой литниковой системы получена экспериментальная отливка «Крышка». Залитая отливка с элементами литниковой системы представлена на рис. 3.

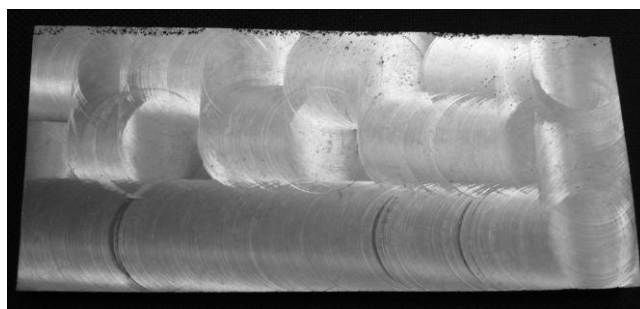
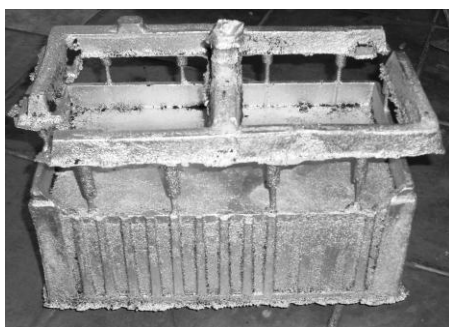


Рис. 3. Опытная отливка «Крышка» и макрошлиф боковой стенки опытной отливки

Для того, чтобы оценить загрязненность полости литейной формы изготовлен макрошлиф боковой стенки отливки с помощью фрезерования. Полученный образец показал наличие мелких пор в зоне технологического напуска на механическую обработку.

Проведена оценка возможности применения дождевой литниковой системы для магниевых сплавов. Для этого разработаны экспериментальные литейные формы для получения отливок типа «плита» с размерами 120x150x10 мм. Заливку проводили в полость формы через стояк и коллектор. Диаметр стояка 15 мм. Эксперименты проводили на сплаве МЛ5. Температура заливки 720 °С. Для сравнения были залиты 5 отливок. Подвод расплава осуществлялся через щелевой питатель толщиной 6 мм, через литниковую сетку с разной площадью отверстий и через «дождевые» питатели (рис. 4). Количество включений в отливке оценивали по снимкам рентгенодефектоскопии опытных отливок.

В отливках, залитых через прямые дождевые питатели, а также с помощью подвода расплава через сетку, отсутствуют неметаллические включения. Аналогичный результат достигнут с помощью вертикально-щелевого подвода расплава.

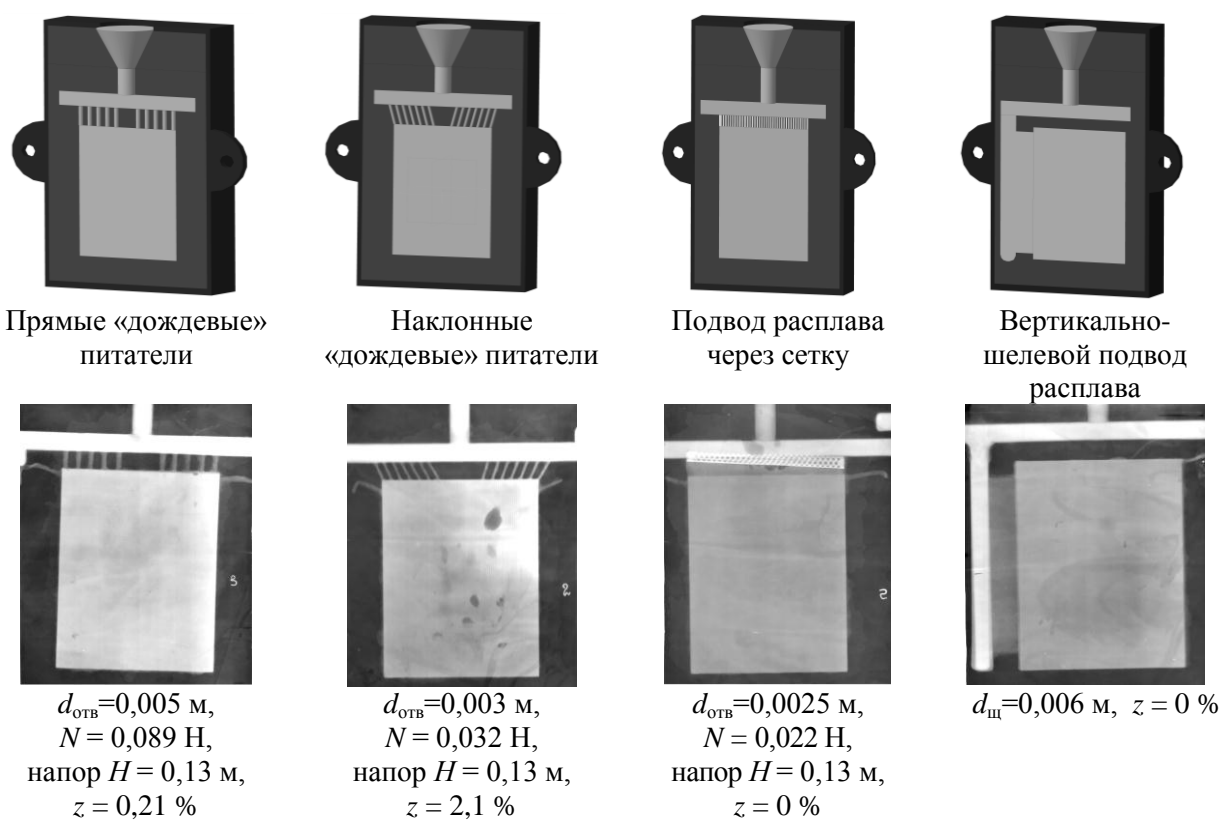


Рис. 4. Схемы подвода расплава в полость литейной формы и снимки рентгенодефектоскопии экспериментальных отливок

Выводы

Разработанная методика расчета дождевой литниковой системы позволяет получать отливки с минимальным весом литниковой системы и с отсутствием брака по «вторичному шлакообразованию». Адекватность методики расчета подтверждена практическим опробованием, в результате которого получена отливка «Крышка» из алюминиевого сплава. Это свидетельствует о том, что разработанная методика является надежной и пригодной для применения ее на производстве при получении отливок из алюминиевых сплавов. Результаты рентгенодефектоскопии экспериментальных отливок из магниевых сплавов позволяют сделать вывод о возможности применения дождевого подвода и для магниевых сплавов,

адаптировав разработанную методику расчета исполняемых размеров дождевой литниковой системы.

Библиографический список

1. **Артамонова, Ю. С.** Выбор оптимальных скоростей заполнения полости литейной формы при использовании дождевой литниковой системы / Ю. С. Артамонова [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – М., 2011. № 6.
2. **Изотов, В. А.** Выбор температуры заливки алюминиевого сплава при заполнении полости формы дождевой литниковой системой / В. А. Изотов, А. А. Акутин, Ю. С. Артамонова, // Вестник «РГАТУ им. П. А. Соловьева». – Рыбинск, 2011. № 2 (21).
3. **Артамонова, Ю. С.** Возможность использования дождевой литниковой системы для заливки форм сплавами на основе алюминия / Ю. С. Артамонова [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – М., 2012. № 2.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

V. A. Izotov, A. A. Akutin, Y. S. Fedulova

THE PRACTICAL TESTING OF EXECUTABLE SIZES CALCULATION METHODOLOGY OF SHOWER GATE FOR ALU-ALLOY

Rybinsk State Aviation Technical University n.a. P. A. Solovyov

The executable sizes calculation methodology of shower gate for alu-alloy castings provided the «secondary slag formation» and «shut» absence in casting on a mold cavity filling stage in terms of limited filling is submitted. The practical testing of designed calculation methodology is executed. The application possibility of shower gate for magnesium alloy is estimated.

Key words: aimed solidification, shower gate, «secondary slag formation», «shut», calculation methodology, minimum possible filling speed, critical value of jet blow, pouring temperature.

УДК 669.715

В.А. Кечин, А.В. Киреев

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОТЕКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ВОДОРОДА

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

В работе представлены данные по определению влияния газосодержания на основные электрохимические свойства стандартных алюминиевых протекторных сплавов и расчетные данные предельно-допустимых газосодержаний для различных марок стандартных алюминиевых протекторных сплавов.

Ключевые слова: алюминиевые протекторные сплавы, газовая пористость, растворимость водорода, коррозионные и электрохимические свойства.

Протекторная защита является одним из наиболее надежных, доступных и эффективных средств борьбы с электрохимической коррозией металлических сооружений и конструкций. В качестве протекторных материалов находят применение сплавы на основе алюминия, магния и цинка [1]. Наиболее широкое применение в системах протекторной защиты получили алюминиевые сплавы (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав алюминиевых протекторных сплавов* (ГОСТ 26251-84)

Марка сплава	Массовая доля основных компонентов, %							
	Алюминий	Магний	Цинк	Марганец	Олово	Цирконий	Галлий	Индий
АП1	остальное	-	4,0-6,0	0,02-0,5	-	-	-	-
АП2		-	0,6-1,0	-	-	-	-	-
АП3		-	4,0-6,0	0,01-0,2	-	0,001-0,1	-	-
АП4		0,06-0,2	2,5-4,5	-	0,1-0,2	-	0,01 -0,05	0,01 -0,05
АП5		9.5-10.5	9.5-10.5	-	-	-	-	-

Примечание: * Предельно-допустимое содержание примесей в сплавах: железо $\leq 0,10\%$, медь $\leq 0,01\%$, кремний $\leq 0,10\%$.

Однако в условиях эксплуатации литых протекторов из различных марок алюминиевых протекторных сплавов наблюдается разброс значений основных электрохимических свойств протекторных материалов [2].

Одной из причин, вызывающих нестабильные электрохимические характеристики, на наш взгляд, является неконтролируемое содержание водорода в литых протекторах.

В ранних работах [4, 5] было выявлено влияние нерегламентируемых примесей на степень электрохимической гетерогенности протекторных материалов и показано негативное влияние газов и неметаллических включений на стабильность основных электрохимических свойств литых протекторов. В частности, повышенные содержания водорода в алюминиевых протекторных сплавах приводят к понижению КПИ алюминия и сплавов от 85 до 55% (рис. 1). Причем при повышенных содержаниях водорода значения КПИ имеют боль-

шой разброс. Содержание водорода несущественно изменяет стационарный потенциал сплавов. Скорость коррозии алюминиевых протекторных сплавов в морской воде имеет различные значения в зависимости от состава. Однако во всех случаях наблюдается некоторое увеличение скорости коррозии с повышением содержания водорода.

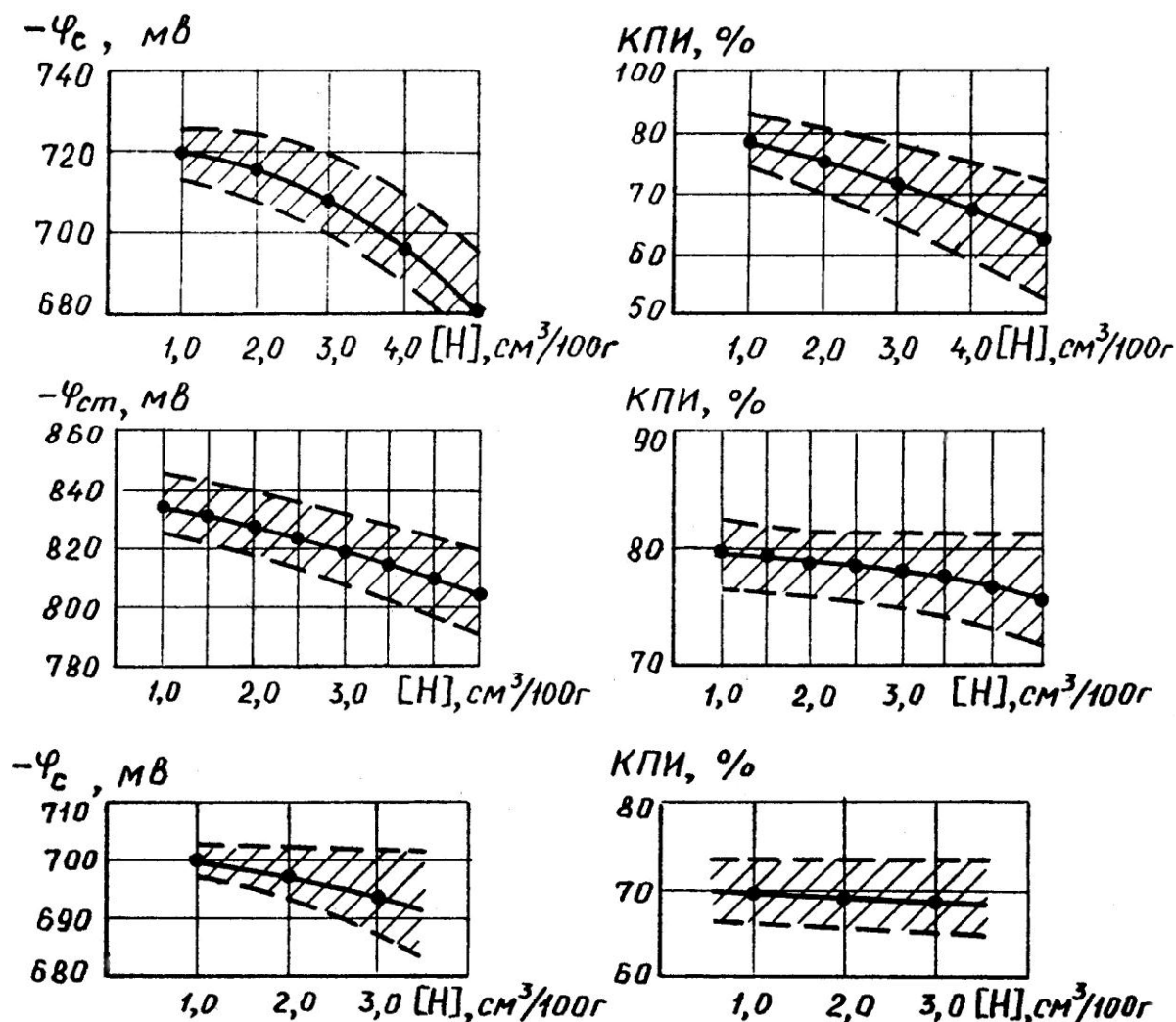


Рис. 1. Влияние газосодержания на изменение электрохимических сплавов АП1 (а), АП4 (б), АП5 (в) [3]

В связи со сказанным представляло интерес выявить источники газов и неметаллических включений в алюминии и алюминиевых сплавах и роль легирующих элементов в изменении пористости протекторных материалов.

В табл. 2 представлены данные по содержанию основных катодных примесей (железо и медь) и не регламентируемых стандартами водорода и кислорода в алюминии и алюминиевых протекторных сплавах по ГОСТ 26251-84.

Как видно в алюминии-сырце присутствуют в достаточно широком диапазоне кислород и водород, контроль содержания которых в протекторных сплавах, на наш взгляд, должен быть регламентирован.

В жидком состоянии алюминий достаточно легко растворяет водород, что связано с большими скоростями эффективной диффузии водорода в жидком алюминии. Растворимость водорода в алюминии при переходе из жидкого в твердое состояние уменьшается с 0,69 до 0,036 $\text{cm}^3/100 \text{ г}$ [2], вследствие чего в литом металле возможно появление газовой пористости, приводящей к нестабильности эксплуатационных характеристик протекторов.

Таблица 2

Содержание примесных элементов в алюминии и протекторных сплавах на их основе, % [3]

Элемент	Алюминий		Протекторные сплавы
	Сырце***	Фактическое для А85***	ГОСТ на протекторы 26251-84
Fe	0.08- 0.50	0.05- 0.07	0.1
Cu	0.01- 0.02	0.0005- 0.0026	0.01
O*	0.02- 0.07	-	-
H**	0.1- 2.85	-	-

Примечания: * - содержание кислорода в пересчете на оксид алюминия, %; ** - содержание водорода в $\text{см}^3/100\text{г Al}$; *** - содержание примесей по данным ряда заводов страны для алюминия-сырца и марки А85 за три года.

На растворимость водорода в жидком алюминии оказывают влияния легирующие элементы. Вклад легирующих элементов на перепад растворимости водорода в жидком и твердом алюминии, равный $\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{тв}}$, будет различным. Чем этот перепад больше, тем большее количество водорода должно выделяться при кристаллизации сплава и тем большая вероятность появления газовой пористости в отливке. Очевидно, для получения макроплотной отливки растворимость водорода в твердом металле ($S_{\text{тв}}$) должна быть близка к растворимости водорода в расплаве ($S_{\text{ж}}$).

Для выбора элементов, увеличивающих растворимость водорода в алюминии в твердом состоянии, были рассчитаны величины ΔS для сплавов на основе алюминия (табл. 3).

Таблица 3

Растворимость водорода в алюминии и алюминиевых сплавах (температура 660°C)

Элемент	Содержание лег. эл., % (по массе)	ΔS , $\text{см}^3/100\text{г}$
Al	0	0,65
Al-Zn	1,0 – 10,0	0,52 – 1,76
Al-Mn	0,2 – 1,0	0,50 - 0,57
Al-Mg	0,2 – 10,0	0,50 - 0,20
Al-Ti	0,1 - 0,3	0,40 - 0,53
Al-Zr	0,1 - 0,3	0,40 - 0,54

Из табл. 3 видно, что элементом, существенно понижающим перепад растворимости водорода при кристаллизации сплавов, является только магний. Далее (табл. 4) приведены расчеты растворимости водорода в алюминии и алюминиевых протекторных сплавах.

Таблица 4

Растворимость водорода в алюминии и алюминиевых протекторных сплавах в жидком (Мж) и твердом (Мтв) состояниях, $\text{см}^3/100\text{ г}$

Материал	М ж	М тв
Al	0,69	0,036
АП1	0.73	0.03
АП2	0.76	0,057
АП3	0.80	0,07
АП4	0.9	0,07
АП5	более 2,0	0,24

Представленные данные свидетельствуют о значительном влиянии легирующих элементов на изменение растворимости водорода в алюминии при различных температурах.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию газовой пористости на основные электрохимические характеристики алюминия и алюминиевых протекторных сплавов. Сплав готовили в печи СШОЛ с использованием предусмотренных ГОСТ 26251-84 исходных шихтовых материалов. Образцы для электрохимических испытаний и оценки балла пористости получали литьем в металлическую формы при температуре литья 740°C. Оценку газовой пористости проводили сравнительным анализом плотности образцов и по пятибалльной шкале ВИАМ [6].

Электрохимические испытания образцов проводили в течение 15 суток при анодной поляризации током 3 мА по стандартной методике на специальной установке [7].

Для оценки скорости коррозии исследуемых образцов использовали весовой метод. Образцы взвешивали с помощью электронных весов до и после испытаний, а затем рассчитывали потерю массы (Δm) и скорость коррозии (K) по формуле:

$$K_m = \Delta m / (S \cdot \phi); \text{ г/м}^2 \cdot \text{сутки},$$

где Δm – изменение массы образца в результате испытаний, г; S – площадь поверхности образца, м², ϕ – время, сут.

Теоретическую и фактическую токоотдачи вычисляли по формуле:

$$Q_T = \frac{1000}{a_{c.m.}}, \frac{A \cdot \text{ч}}{\text{кг}},$$

где $a_{c.m.}$ – электрохимический эквивалент сплава,

$$a_{c.m.} = \Delta m_1 a_{m1} + \Delta m_2 a_{m2} + \dots + \Delta m_i a_{mi},$$

где a_{mi} – электрохимический эквивалент компонента сплава;

Δm_i – массовая доля компонента в сплаве.

$$Q_\phi = \frac{1000}{a_{c.т.}}, \frac{A \cdot \text{ч}}{\text{кг}},$$

где $a_{c.т.}$ – электрохимический эквивалент сплава,

$$a_{c.т.} = \Delta m_1 a_{m1} + \Delta m_2 a_{m2} + \dots + \Delta m_i a_{mi},$$

где a_{mi} – электрохимический эквивалент компонента сплава; Δm_i – массовая доля компонента в сплаве.

Коэффициент полезного использования (КПИ) определяли по формуле:

$$\eta = 100\% \cdot \frac{Q_\phi}{Q_T}.$$

Следует отметить увеличение численных значений скорости коррозии (K_m), коэффициента полезного использования (КПИ) и токоотдачи (Q_ϕ) с повышением газосодержания исследуемых образцов.

Так с повышением пористости скорость коррозии алюминия возрастает с 3,03 до 3,34 г/м² · сутки; скорость коррозии сплавов АП1 и АП4 изменяется с 2,13 до 2,35 и с 2,02 до 2,42 г/м² · сутки соответственно (рис. 2) Увеличение скорости коррозии образцов с увеличением газосодержания можно объяснить возрастанием суммарной площади поверхности образцов.

Результаты электрохимических испытаний показали, что с увеличением балла пористости в алюминии и протекторных сплавах на его основе наблюдается незначительное изменение рабочего и стационарного потенциала исследуемых образцов (рис. 3).

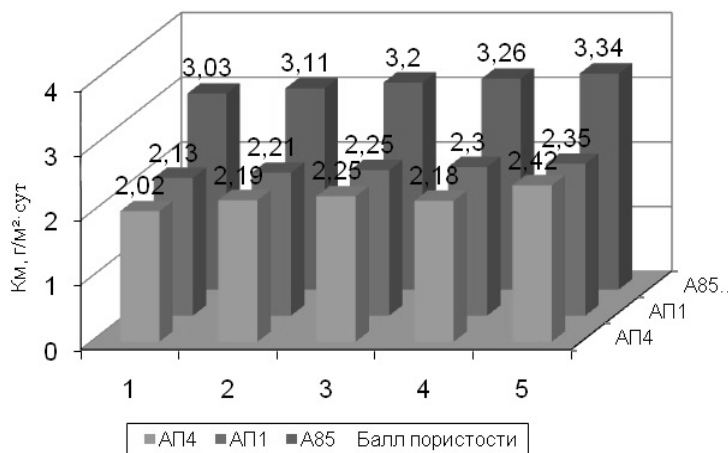


Рис. 2. Изменение скорости коррозии алюминия и алюминиевых протекторных сплавов от газосодержания

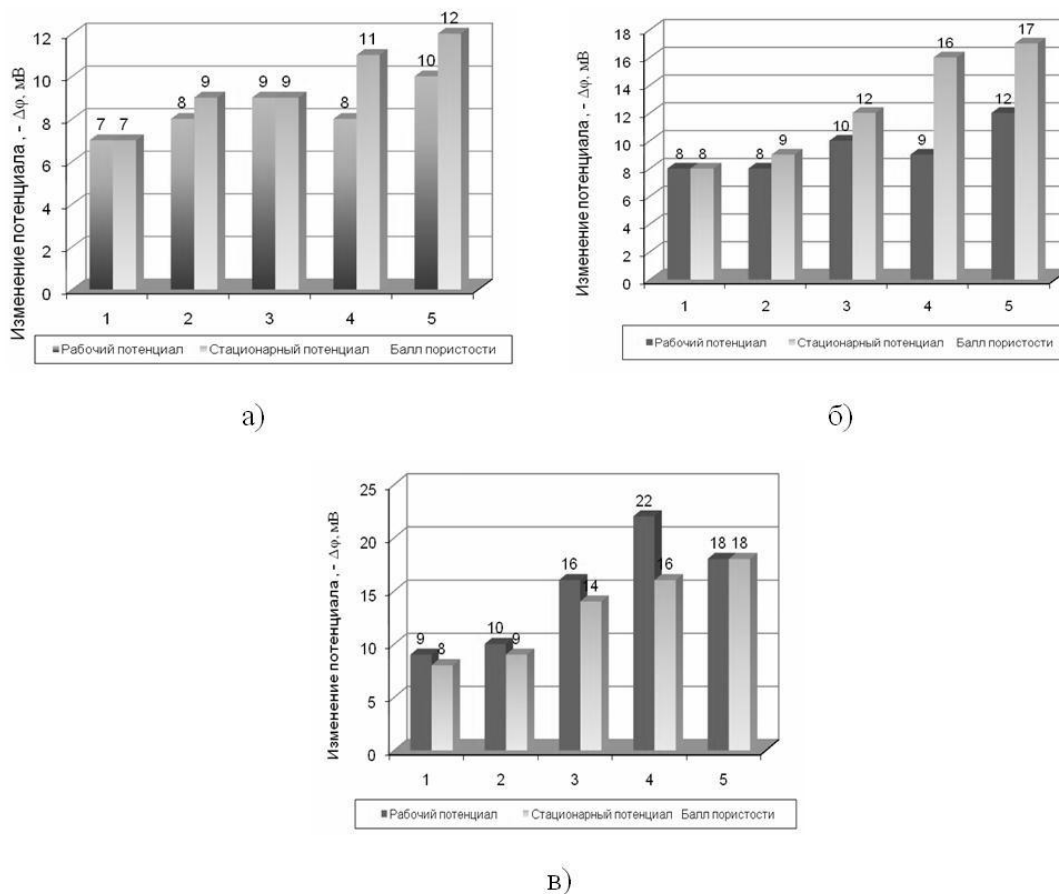


Рис. 3. Изменение стационарного и рабочего потенциалов образцов алюминия марки А85 (а), сплавов АП1 (б) и АП4 (в) с изменением балла пористости

Исследования фактической токоотдачи, определяющей срок службы протекторов, подтверждают данные работ [3, 4, 5] о существенном изменении коэффициента полезного использования литых протекторных материалов в зависимости от их газосодержания (рис. 4). Так, с увеличением содержания водорода в образцах из алюминия марки А85 КПИ снижается на 10-12% с 54,9% до 49,9%; для сплавов АП1 и АП4 с 78,3% до 70,8%; и с 82,3% до 68,9% соответственно (рис. 5).

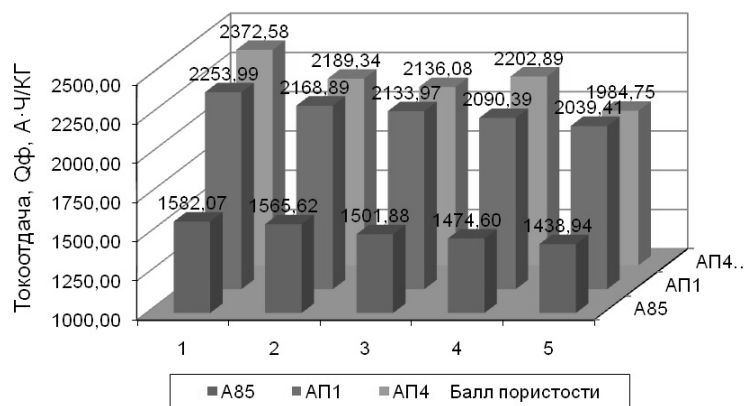


Рис. 4. Изменение токоотдачи алюминия и протекторных сплавов от балла пористости

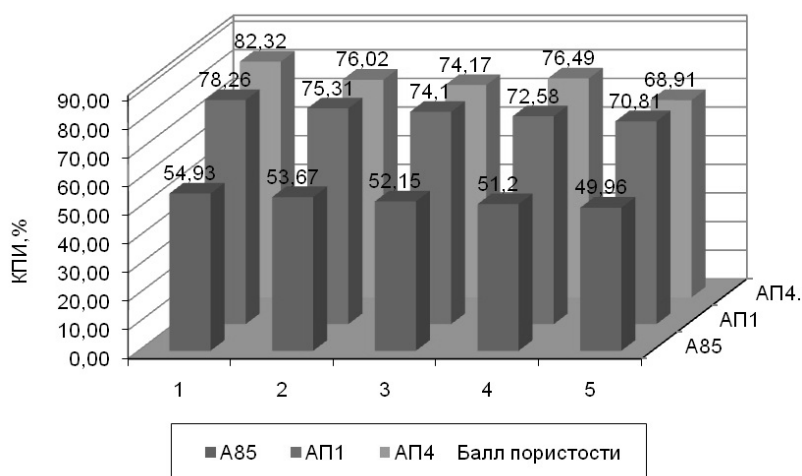


Рис. 5. Изменение коэффициента полезного использования алюминия и протекторных сплавов в зависимости от балла пористости

Видно, что численные значения токоотдачи снижаются как для алюминия, так для протекторных сплавов, в зависимости от содержания водорода. Следует особо отметить увеличение значений исследуемых свойств и характеристик образцов с повышенным газо-содержанием.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о важности контроля газосодержания протекторных сплавов. При этом обеспечение предельно-низких концентраций водорода протекторных сплавах будет способствовать стабилизации основных электрохимических свойств литых протекторов.

Для практических целей важно установить предельные содержания водорода в сплавах различного состава, обеспечивающие получение качественных отливок [8].

Верхним пределом опасного газосодержания алюминиевых сплавов по данным работы [9] следует считать предельную растворимость водорода в твердом состоянии, а точнее, растворимость водорода в последних порциях жидкой части сплава, состав которой определяется выражением: $C_Z = C_0 : k$, где C_Z - концентрация жидкой части сплава (кристаллизуется в последнюю очередь), %; C_0 - исходная концентрация сплава, %; k - коэффициент распределения, равный отношению $C_{ТВ}/C_{Ж}$, при $t=const$.

Нижний предел благоприятного газосодержания находится из выражения:

$$C_H = \frac{(1-m) \cdot k_1 \cdot \alpha_v}{\gamma(1+t/273)} \cdot 100$$

где m – количество затвердевшей части отливки, отнесенное к общей массе отливки, $m = 0.6$; k_1 – коэффициент, учитывающий изменение растворимости газа: $k_1 = 1$ (нет изменения растворимости водорода с увеличением концентрации легирующего элемента; $k_1 > 1$ (когда растворимость водорода увеличивается); $k_1 < 1$ (когда она уменьшается); α_v – коэффициент объемной усадки при затвердевании сплава; γ – плотность сплава, г/см³; $(1 + t/273)$ – коэффициент для приведения водорода к нормальным условиям.

Поскольку в протекторных сплавах АП1-АП5 основными легирующими компонентами являются цинк и магний (от 1 до 10%), то, в основном, присутствием этих металлов должен определяться интервал безопасного газосодержания. Для сплава марки АП5 этот интервал соответствует интервалу значений газосодержания от 0,21 до 0,34 см³/100г без учета влияния цинка, так как растворимость водорода в твердых алюминии и цинке величины близкие.

Расчеты нижних и верхних пределов содержания водорода в протекторных сплавах приведены в табл. 5.

Сопоставимый анализ верхних пределов газосодержания сплавов с максимальной растворимостью водорода в сплавах в твердом состоянии, убедительно показывает, что верхний предел газосодержания для всех сплавов выше максимальной растворимости.

Таблица 5

Результаты расчета газосодержания в протекторных сплавах

Сплав	Плотность сплава, г/см ³	Интервал кристаллизации, °С	Объемная усадка при затверд., %	Максим. раствор. водорода в тв. сост., см ³ /100г	Средний коэффициент распределения	Нижний предел газосодержания, см ³ /100г	Верхний предел газосодержания, см ³ /100г	Коэффициент изменения растворим. водорода
АП1	2,777	652-640	5,166	0,026	0,438	0,0311	0,047	1,667
АП2	2,603	656-648	5,035	0,017	0,355	0,0513	0,020	1,800
АП3	2,787	652-640	5,166	0,028	0,438	0,0132	0,047	1,667
АП4	2,768	648-620	5,171	0,045	0,439	0,0308	0,069	1,616
АП5	2,913	620-500	5,184	0,110	0,45	0,1003	0,154	0,1003

Очевидно, для каждой марки протекторного сплава можно установить оптимальное содержание водорода, при котором пористость отливок будет наименьшей. Эти оптимальные содержания водорода в протекторных сплавах можно принять равным нижнему пределу газосодержания, применительно к каждому составу сплава.

Библиографический список

1. Люблинский, Е.Я. Протекторная защита морских судов и сооружений от коррозии / Е.Я. Люблинский. – Л.: Судостроение, 1979. – 288 с.
2. Чернега, Д.Ф. Газы в цветных металлах и сплавах / Д.Ф. Чернега [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. 176 с.
3. Кечин В.А. Теория и технология литых протекторных материалов: монография / В.А. Кечин. – Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2004. – 184 с.

4. **Кечин, В.А.** Исследование электрохимических характеристик сплавов с различным газосодержанием / В.А. Кечин, В.Ю. Богатиков // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: тез. док. Республ. конф. – Запорожье, 1985. – 240 с.
5. **Кечин, В.А.** Исследование влияния газосодержания на электрохимические свойства протекторных сплавов на основе алюминия и цинка / В.А. Кечин, В.Ю. Богатиков / Сев.-Осет. гос. ун-т. Сев-Кавк. горно-металлург. ин-т – Ордженикидзе, 1986. – 10 с.
6. **Альтман, М. Б.** Плавка и литье алюминиевых сплавов: справ. изд. / М. Б. Альтман [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.
7. **Клусов, А.А.** Электрохимические свойства алюминиевых протекторных сплавов системы Al-Zn с повышенным содержанием железа / А.А. Клусов, В.А. Кечин // Прогрессивные литейные технологии: тез. док. V научно-практическая конференция. – М., 2010. – 36 с.
8. **Добаткин, В.И.** Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / В.И. Добаткин [и др.]. – М.: Metallurgia, 1976.
9. **Стрельцов, Ф.Н., Лейбов Ю.М.** // Цветные металлы. 1973. №9. – 24 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

V.A. Kechin, A.V. Kireev

STUDY OF THE CORROSION AND ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ALUMINUM, THE TREAD MATERIAL WITH DIFFERENT HYDROGEN CONTENT

Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs

Presents the data to determine the influence of gas content in the basic electrochemical properties of the standard aluminum alloy sacrificial and estimates the maximum permissible gas content for various brands of standard aluminum alloy tread.

Key words: aluminum sacrificial alloy, gas porosity, solubility of hydrogen corrosion and electrochemical properties.

УДК 621.785.363 (088.8)

В.И. Астащенко, А.И. Швеев, И.М. Родькин, Т.В. Швеева, А.В. Родькина

**ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ
К ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Показана возможность изготовления методом холодной пластической деформации деталей автомобиля из легированных сталей. Предложен способ термической обработки стальных заготовок под холодную объемную штамповку и выдавливание. Циклическая стойкость деталей, изготовленных данными методами, повышается в три и более раз.

Ключевые слова: термическая обработка, сталь, деформация, структура, твердость.

Вступление страны в ВТО обязывает машиностроительный комплекс существенно изменить отношение к производству автотехники. Продукция автомобилестроительных предприятий должна быть конкурентоспособной и отвечать требованиям европейских и мировых стандартов по надежности, долговечности, экологичности, удельной грузоподъемности и т.д. Кроме того, на этапах технологического передела металла в деталь немаловажным условием является экономия топливно-энергетических и материальных ресурсов. Наиболее перспективным направлением одновременного решения этих задач является разработка и внедрение малоотходных и высокоэффективных процессов формообразования деталей. К таким процессам относятся различные методы холодной пластической деформации: выдавливание, штамповка, высадка, редуцирование и прочие, которые находят все более широкое применение на заводах машиностроения. Благодаря этим технологиям, коэффициент использования металла достигает 90% и более. Существенно снижается, а в ряде случаев, и отпадает необходимость в последующей механической обработке таких металлоизделий. Дополнительно, в процессе формообразования деталей этим способом, и особенно деталей сложной геометрии, в металлоизделиях создается благоприятная текстура деформации, способствующая повышению их эксплуатационных характеристик. Известно, что высокими технологическими свойствами при обработке давлением в холодном состоянии обладают низкоуглеродистые стали, которые по химсоставу, прочности и пластичности удовлетворяют требованиям ГОСТ 10702-78, ГОСТ 9045-95, DIN 10149-1-95 и DIN 10149-2-95. Однако применение в автомобилестроении сталей, указанных в этих стандартах ограничивается пониженным уровнем их прочности и тяжелыми условиями эксплуатации многих деталей. Для изделий, одновременно испытывающих статические и динамические нагрузки в эксплуатации, рекомендуют и зачастую используют высокопрочные легированные стали, которые в свою очередь обладают недостаточным уровнем пластичности при комнатной температуре, что затрудняет их деформацию в холодном состоянии. Особенно это заметно при изготовлении мелко модульных зубчатых и толстостенных трубчатых деталей.

Важным звеном на стадиях создания и внедрения ресурсосберегающих технологий холодной пластической деформации при изготовлении высокопрочных стальных изделий является обеспечение однородности структуры и свойств сплава по всему объему полуфабриката.

Цель работы – создание необходимого структурного состояния в легированных цементуемых сталях под холодную пластическую деформацию деталей автомобиля.

Основными критериями структурного состояния сталей, характеризующими высокую пластичность сплава, является дисперсность зеренного строения, количество и морфо-

логия структурных и фазовых составляющих, степень загрязненности неметаллическими включениями и их сконцентрированность.

Первые показатели структуры формируются при термической обработке полуфабриката и в первую очередь в результате длительного (40 часов и более) сфероидизирующего отжига. Но даже после столь длительных выдержек в структуре легированных сталей встречаются участки со следами недиффузионного распада аустенита (рис. 1).

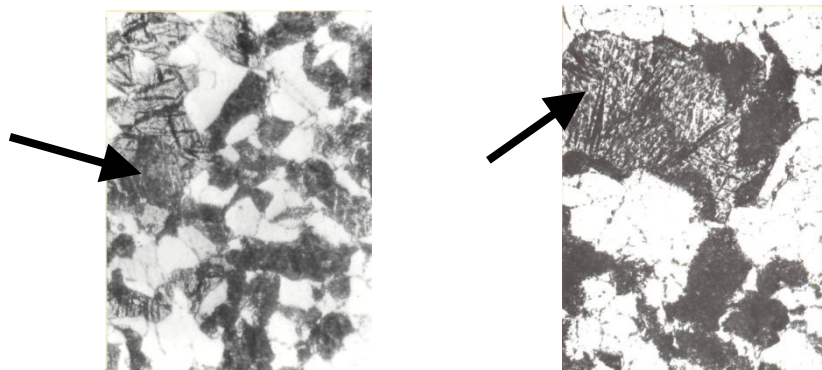


Рис. 1. Неперлитные продукты превращения в стали после отжига заготовок

Присутствие микроучастков с мартенситной (рис. 1) или бейнитной структурой в стали, имеющей феррито-перлитную основу, создает напряженное состояние между градиентными структурными составляющими и снижает показатели пластических свойств сплавов. Для повышения технологической пластичности конструкционной стали необходимо иметь структуру зернистого, а не пластинчатого перлита, что повышает изотропность сплава, уменьшает его упрочнение при деформации и улучшает штампуемость [1].

В работе для металлографических исследований использовали оптические микроскопы «Неофот-21» (Германия) и IM-7200 (Япония) с лицензионным программным продуктом «Трихотет-PRO» системы «ВидеоТест-М». Твердость определяли в соответствии со стандартами на поверенных приборах ТШ-2М и ТК-2М. Микротвердость структурных составляющих оценивали с помощью микротвердомера «Durimet» (Германия) при нагрузке на индентор 9,8Н. Термическую обработку образцов и натуральных деталей проводили в лабораторных и производственных условиях в электропечах М-12 и в печах с газовым обогревом мод. 34898 «Теплопроект» соответственно. Пластическую деформацию стальных полуфабрикатов проводили на прессах мод. КБ 0034.

Изгибную циклическую долговечность зубчатых деталей в составе узлов автомобиля КАМАЗ оценивали при испытаниях* ведущих мостов на стенде модели AV-604. Химический состав металлополуфабрикатов, заготовок и деталей определяются по ГОСТ 18895-97 на эмиссионном спектрометре «СПЕКТРОЛАБ», на микрофотометре МФС-51 и спектрографе АФС-51, а также на приборах мод. АН-7529 и АН-7560 для определения углерода и серы.

Исследования проводились на широкоприменяемых в автомобилестроении в конструкционных цементуемых легированных сталях марок 20ХГНМТА и 12ХНЗА, используемых для изготовления зубчатых деталей и поршневых пальцев ДВС автомобиля КАМАЗ.

Установлено, что химический состав исследуемых сталей по всем элементам находится в пределах допустимых ГОСТ 4543 и ТУ 14-1-5509 (рис. 2, 3). При этом колебания по отдельным химическим элементам в стали 20ХГНМТА составили от 1,19 до 4,0 раз, а в стали 12ХНЗА – от 1,31 до 2,80 раза.

* Испытания выполнены в НТЦ ОАО «КАМАЗ».

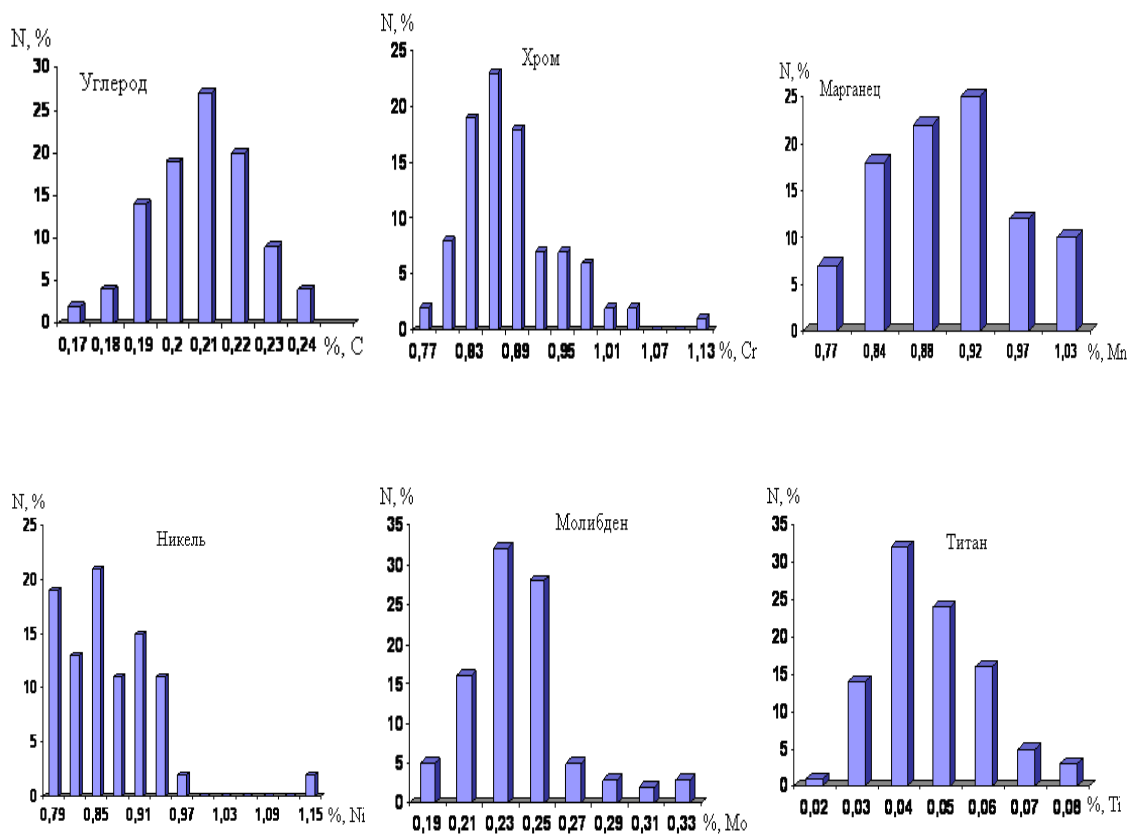


Рис. 2. Частота распределения по содержанию химических элементов в стали 20XГНМТA (по результатам анализа 294 плавков стали)

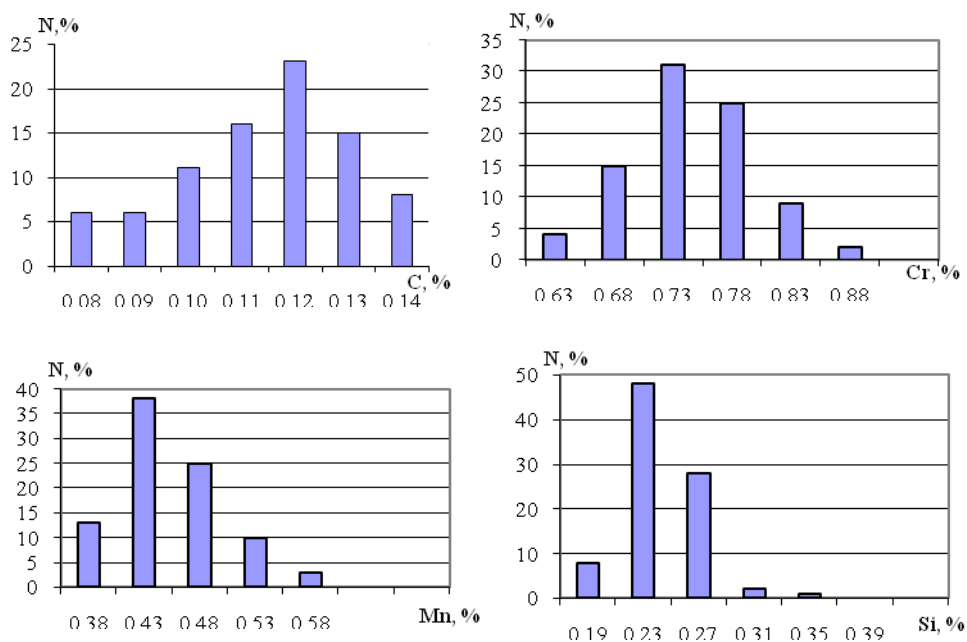


Рис. 3. Частота распределения по содержанию химических элементов в стали 12ХН3А (по результатам анализа 174 плавков стали)

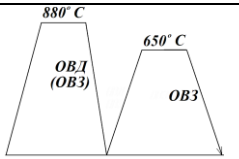
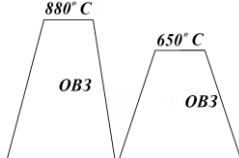
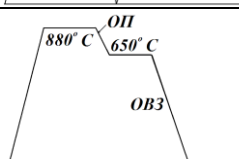
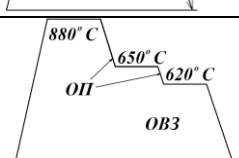
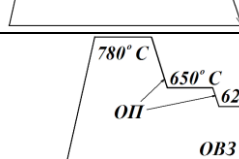
Широкоприменяемые способы термической обработки таких сталей не обеспечивают стабильного получения рекомендуемой структуры и твердости заготовок под холодную пластическую деформацию. Об этом убедительно свидетельствуют значительные колеба-

ния по твердости стали 12ХН3А после отжига, которая колебалась от 176 до 197 НВ. Поэтому, при разработке технологии разупрочнения стали необходимо учитывать не только колебания химических элементов (рис. 2, 3), но и структурную неоднородность в микрообъемах (рис. 1).

В работе исследовано влияние температурно-временных параметров нагрева, охлаждения и диффузионного распада переохлажденного аустенита на получаемую структуру, твердость и размер зерна стали. В табл. 1 представлены результаты анализа таких свойств в стали 12ХН3А после различных видов обработки. Наиболее благоприятными показателями по структуре и твердости под холодную пластическую деформацию обладает данная сталь после термической обработки, включающей аустенитизацию при температуре 880°С с последующим диффузионным изотермическим γ - α превращением при температурах 650°С и 620°С (табл. 1, режим № 4).

Таблица 1

Свойства стали 12ХН3А после различных видов термообработки

Номер режима	Схема термической обработки	Микроструктура	Размер зерна, мм	Твердость, НВ
1.		П+Ф Пзерн < 80%	0,017-0,026	187 (159)
2.		П+Ф Пзерн < 80%	0,017-0,028	159
3.		П+Ф Пзерн > 80%	0,016-0,022	149-153
4.		П+Ф Пзерн > 85%	0,014-0,021	146-149
5.		П+Ф Пзерн > 85%	0,017-0,038	146-149

Обозначение: охлаждение с печью (ОП), в воде (ОВЗ), на воздухе (ОВЗ), П-перлит, Ф-феррит, Пзерн. – перлит зернистый, Пс- перлит сорбитообразный

Внедрение данной технологии термообработки стали 12ХН3А при изготовлении поршневых пальцев ДВС показала свою экономичность и технологичность. Из предварительно термообработанных заготовок методом холодного выдавливания получены высококачественные детали с минимальным припуском на механическую обработку (рис.4).

Разработанная технология отжига может быть использована в качестве разупрочняющей термической обработки для заготовок из стали 20ХГНМТА. Для интенсификации процесса перекристаллизации стали и обеспечения в ней мелкозернистого строения температуру аустенити-

зации рекомендуется повысить до 900-920°C. Подтверждением этому служит устойчивость и рост зерна при нагреве данной стали до температуры ~950°C (рис. 5), что можно объяснить наличием в ней легирующих тугоплавких элементов – молибдена и титана [2].

Термическая обработка по предлагаемой технологии заготовок из сталей 20ХГНМТА показала, что их твердость не превышает 163НВ, микротвердость перлита находится в пределах 227-286 НV, феррита – 179-210НV при разности между этими структурными составляющими составляет менее 80 НV. Такое состояние стали позволило получить методом холодной объемной штамповки (ХОШ) детали с высокой точностью зуба (рис. 6).

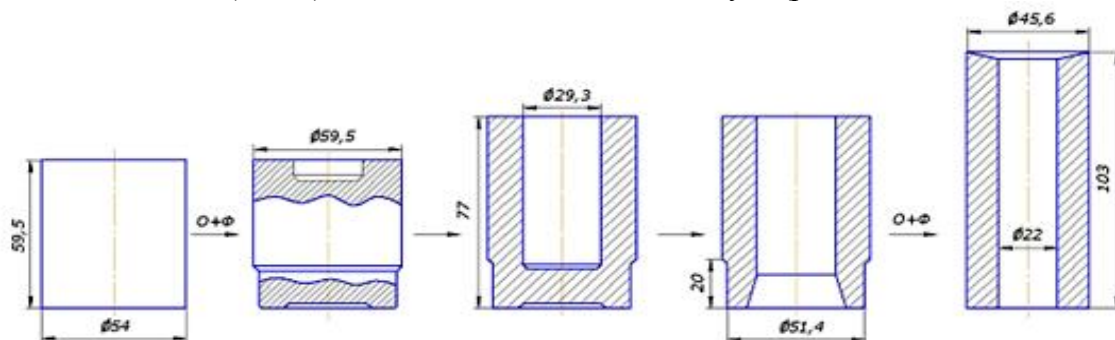


Рис. 4. Схема изготовления поршневых пальцев ДВС и межоперационного отжига заготовки из стали 12ХН3А. О – отжиг; Ф – фосфатирование

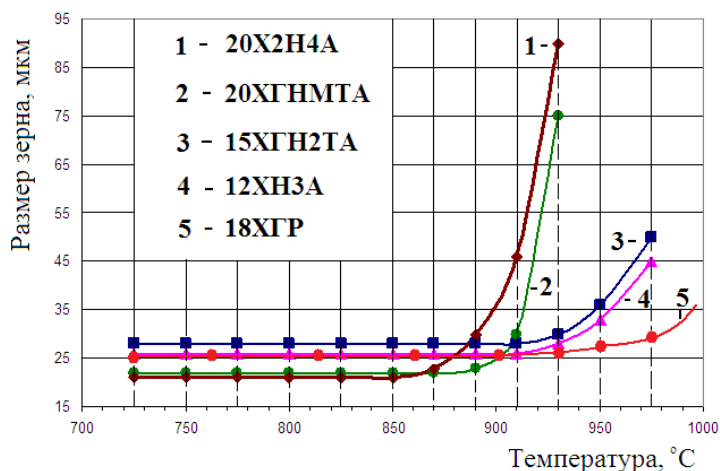


Рис. 5. Температурная зависимость роста зерна в различных сталях



Рис. 6. Сателлит, изготовленный методом холодной объемной штамповки (сталь 20ХГНМТА)

Стендовые испытания колесных передач ведущих мостов с сателлитами, изготовленными методом ХОШ, показали изгибную долговечность деталей в пределах 1070-1150 тыс. циклов нагружения, что примерно в три раза превышает стойкость сопрягаемых деталей, входящих в звено механизма.

Выводы

1. Разработан способ термической обработки стали 12ХНЗА и 20ХГНМГА под холодную пластическую деформацию, включающий аустенитизацию и распад переохлажденного аустенита при температурах 650 и 620°C.

2. Выявлено трехкратное повышение циклической стойкости деталей, изготовленной методом ХОШ.

3. Технология отжига заготовок рекомендуется к применению на предприятиях при изготовлении деталей методом холодной пластической деформации.

Библиографический список

1. **Ильин С.И.** Технология термической обработки сталей: учеб. пособие / С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.
2. **Фиргер И.В.** Термическая обработка сплавов: справочник / И.В. Фиргер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 304 с.

V.I. Astashchenko, A.I. Shveev, I.M. Rodkin, T.V. Shveeva, A.V. Rodkina

PREPARATION OF THE ALLOYED STEEL FOR COLD PLASTIC DEFORMATION OF DETAILS OF THE CAR

Kama State Academy of Engineering and Economics

Possibility of manufacturing by a method of cold plastic deformation of details of the car from alloyed staly is shown. The mode of thermal processing of steel preparations under cold volume punching and expression is offered. Cyclic firmness of the details made by these methods, raises in three and more times.

Key words: thermal processing, steel, deformation, structure, hardness.

УДК 621.74

И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, Н.В. Петрова, А.Ф. Журавлев, А.А. Моляков

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОФОСФАТНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Чебоксарский политехнический институт (филиал) Московского государственного
открытого университета им. В.С.Черномырдина»

Рассмотрены некоторые особенности применения металлофосфатных связующих и смесей для получения отливок из черных и цветных металлов и сплавов.

Ключевые слова: технологический процесс, холоднотвердеющие смеси, металлофосфатные связующие и смеси, трепел, отходы металлургического производства, торф низкой степени разложения, теплоизоляционные покрытия, отливки.

Актуальность исследования проблемы. Технологические процессы получения холоднотвердеющих смесей и смесей, отверждаемых при кратковременной тепловой обработке, а также теплоизоляционных смесей для прибылей и отливок основаны на использовании в смесях высокотоксичных, дорогостоящих, имеющих малый срок хранения синтетических органических связующих и катализаторов их отверждения. В процессе приготовления смесей, формообразования, отверждения, выдержки, заливки, выбивки и охлаждения они выделяют высокотоксичные, канцерогенные вещества, отравляют окружающую среду (водный и воздушный бассейн), требуют установления специальной вытяжной вентиляции и 10-15 кратного обмена воздуха, а также обезвреживания или сжигания отходов производства отливок [1].

При производстве фасонного литья из черных и других металлов на промышленных предприятиях около 30% (иногда значительно выше) жидкого металла расходуется на прибыли, предназначенные для питания отливок в процессе затвердевания и служащие для устранения в отливке усадочных раковин и пористости. При этом нормальная работа прибыли достигается за счет увеличения ее массы, что снижает выход годного литья. В среднем, с применением обычных прибылей по машиностроению, выход годного литья в лучшем случае составляет около 60% от металлозавалки. Такое положение на многих предприятиях является следствием несовершенства существующих способов питания отливок. Известные методы уменьшения массы прибылей — применение газового и воздушного давления, электрообогрева, применение экзотермических смесей и др. не получили широкого распространения ввиду сложности технологической подготовки и значительных трудовых и материальных затрат. Теплоизоляция прибылей - наиболее рациональный метод снижения их массы. Метод теплоизоляции способствует замедлению отвода тепла от прибыли, тем самым увеличивает работу прибылей. В результате повышается выход годного литья, сокращается брак, снижается себестоимость литья. Технология применения теплоизоляционных смесей предусматривает изготовление прибыльной части формы из теплоизоляционных оболочек и облицовок, изготовление подприбыльных и тонких ее частей из теплоизоляционных облицовок и стержней-утеплителей. Также применяются легкоотделяемые прибыли с теплоизоляционной оболочкой отличающиеся тем, что между прибылью и питаемым узлом отливки устанавливают тонкую огнеупорную разделительную пластину (диафрагму) с питающим отверстием малого диаметра. Эффективность питания и экономичность прибыли зависят от ее формы и соотношения основных размеров.

Для теплоизоляции прибылей отливок в формах из песчано-глинистых и других

смесей, авторами разработаны теплоизоляционные металлофосфатные смеси, отличающиеся наличием новых ингредиентов, а также высокими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами [2-3 и др.]. Использование металлофосфатных связующих в составах теплоизоляционных материалов, разработка методов их применения позволяет повысить свойства смесей, их термостойкость и улучшить санитарно-гигиенические условия труда.

Материал и методика исследований. Предлагается к применению новые запатентованные составы теплоизоляционных металлофосфатных смесей, служащие для теплоизоляции прибылей отливок. Изобретение направлено на улучшение физико-механических и теплоизоляционных свойств теплоизолирующей смеси. Смесь содержит алюмохромофосфатное связующее, отход металлургического (ваграночного) производства и дополнительно трепел при следующем соотношении компонентов, мас. %: алюмохромофосфатное связующее – 8-12, трепел – 5-10, отход ваграночного производства – остальное. Предлагаемый состав отличается введением в смесь трепела Первомайского месторождения Алатырского района Чувашской Республики. Трепел природного происхождения, за счет порошкообразной структуры совместно с фосфатным связующим, в результате приготовления смеси, образует массу, которая обволакивает частицы отхода ваграночного производства, обеспечивает хорошую формуемость смеси и термостабильность при оптимальном расходе связующего. Теплоизоляционную смесь приготавливают следующим образом: отход ваграночного производства, металлофосфатное связующее и трепел в указанных по изобретению количествах загружают в смеситель и перемешивают в течение 5-10 минут. Отверждение образцов производят в печи при температуре 150-200°С в течение 20-40 минут.

Результаты исследований и обсуждение. Для холоднотвердеющих смесей и смесей, отверждаемых при кратковременной тепловой обработке, применяемых в литейном производстве, разработано и находятся в стадии широкого внедрения магний-алюмофосфатное связующее МАФС, алюмофосфатное, алюмоборфосфатное и другие фосфатные связующие, представляющие собой водный раствор фосфатов магния, алюминия, бора, цинка, кальция и других металлов, которые отверждаются пылью (отходом) электросталеплавильного производства (ОЭСП), трифолином, крокусом и другими оксидами [1]. Отвердителями служат мелкодисперсные порошки (удельной поверхностью 250-550 м²/кг), содержащие оксиды основного металла (оксиды железа, магния, цинка и др.), а в случае кратковременной подсушки при температуре 180-250°С, не требуется наличия отвердителей. Разработанные металлофосфатные связующие обладают длительным сроком хранения (не менее 6 месяцев), низкой стоимостью по сравнению с синтетическими связующими и экологической безопасностью. Предлагаемая технология обеспечивает соблюдение санитарно-гигиенических условий труда, высокую термостойкость, низкую газотворную способность (не более 5 см³ на 1 г смеси при температуре 950°С). Технологический процесс защищен авторскими свидетельствами и патентами РФ №954137, 980919, 1026925, 1077692, 1072929, 1159716, 1156805, 1168313, 1171179, 2356688, 2455108 и др.

Технологический процесс изготовления отливок с применением холоднотвердеющих смесей на металлофосфатных связующих и отходов электросталеплавильного производства может применяться в литейном производстве на машиностроительных и металлургических предприятиях страны для мелкосерийного и крупносерийного производства средних и крупных стальных и чугуновых отливок, а также цветного литья.

Смеси, содержащие 3,5 мас. части связующего и 2,5–3,0 мас. части порошкообразного отвердителя, имеют следующие физико-механические и технологические свойства (табл. 1). В качестве порошкообразного отвердителя применяли отход электросталеплавильного производства Чебоксарского завода промышленных тракторов, улавливаемый системой "Бейкхауз". В качестве металлофосфатных связующих применяли алюмофосфатные, алюмомагнийфосфатные, алюмокальциймагнийфосфатные и другие связующие и ортофосфорную кислоту. Синтез металлофосфатных связующих проводили в литейной

лаборатории кафедры «Технология конструкционных материалов и литейное производство» ЧПИ (ф) МГОУ имени В.С.Черномырдина, а промышленные партии связующих готовили по 5–7 т в условиях Актюбинского завода хромовых соединений. В табл. 1 приведены свойства ХТС с некоторыми фосфатными связующими.

Таблица 1

Содержание и физико-механические свойства ХТС

Характеристики	Ортофосфорная кислота	Алюмомагний-фосфатное связующее	Алюмофосфатное связующее
Содержание в смеси, %	3,5	3,5	3,5
Влажность смеси, %	1,5	1,5	1,5
Живучесть, мин.	6-8	8-12	10-15
Газопроницаемость, ед.	свыше 200	свыше 200	свыше 200
Осыпаемость, %	0,1	0,03	0,05
Прочность при растяжении, кгс/см ²			
через 0,5 ч	3,5	1,0	1,6
через 1,0 ч	4,2	2,4	4,4
через 4,0 ч	7,5	8,5	9,6
через 24,0ч	8,0	13,6	9,1
Прочность на изгиб, кг			
через 0,5 ч	2,0	1,3	1,6
через 1,0 ч	3,8	2,4	4,5
Деформация при изгибе, мм, через 0,5 ч	0,19	1,25	0,51
Газотворность смеси при 1200°С см ³ /г	меньше 2	меньше 2	меньше 2

Данные смеси прошли производственные испытания в условиях Чебоксарского завода промышленных тракторов. Приготовление смеси осуществлялось на лопастном смесителе периодического действия. Для изготовления смеси могут быть использованы смесители любых типов как отечественного, так и зарубежного производства. Желательно производить предварительное смешивание отходов электросталеплавильного производства с кварцевым песком или другим наполнителем, т.е. необходимо предварительно приготовить базовую смесь, которая при необходимости будет смешиваться с металлофосфатными связующими и выпускаться из смесителей, готовая к употреблению для ХТС.

Масса замеса изменяется в пределах 300–600 кг в зависимости от веса приготавливаемого стержня. Время приготовления смеси 3–5 мин. Смеси не имеют запаха, так как не содержат вредных, токсичных и отравляющих веществ. В составе металлофосфатных связующих отсутствуют фенол, формальдегид и другие токсичные вещества.

Смесь хорошо выбивается (высыпается) из внутренних полостей отливок. Полученные отливки не имеют поверхностных дефектов. В виду того, что смесь обладает высокой термостойкостью, отливки получаются без пригара.

Применение данного технологического процесса позволяет ликвидировать брак отливок по пригару, ситовидной и газовой пористости, горячим трещинам и другим дефектам. Выбиваемость смесей находится на уровне песчано-глинистых.

Для приготовления ХТС можно применять обогащенные и необогащенные (глинистые) пески.

Варьируя соотношение связующее – отвердитель можно изменять живучесть смеси и прочность на различных этапах отверждения.

Внедрение разработанного технологического процесса возможно на любом

машиностроительном и металлургическом предприятии страны.

В качестве отвердителей фосфатных холоднотвердеющих смесей успешно можно применять и отходы кузнечного, прокатного, кислородно-конверторного и других производств определенной дисперсности и влажности с заданным химическим составом.

Согласно техническим условиям магнийалюмофосфатное связующее имеет следующий химический состав фосфорный ангидрид 38-42%, оксид магния 4,5-5,5%, оксид алюминия 4,0-5% [1].

Разработанные технологии приготовления теплоизоляционных смесей на основе металлофосфатных связующих обладают существенным преимуществом по сравнению с известными аналогами теплоизоляционных смесей. Подобранный совокупность компонентов и их количественные соотношения обеспечивают увеличение теплоизолирующего эффекта смеси при достаточных физико-механических свойствах, необходимых для изготовления теплоизоляционной оболочки. Свойства улучшаются за счет порошкообразной структуры трепела и торфа низкой степени разложения, и содержания в нем оксидов различных металлов, которые хорошо совместимы с оксидами, содержащимися в ваграночном шлаке, что способствуют повышению теплостойкости смеси. Наиболее приемлемыми для изготовления теплоизоляционных смесей, как показывает практика, являются металлофосфатные связующие – АХФС и МАФС. Металлофосфатные связующие обладают высокой термостойкостью, стабильностью свойств, низкими токсичностью, газотворностью и осыпаемостью [1–3].

Заключение. Таким образом, разработанные и предлагаемые металлофосфатные связующие и смеси для получения отливок из черных металлов и сплавов, а также теплоизоляционные смеси для утепления прибылей отливок обладают хорошими физико-механическими, технологическими и теплоизоляционными свойствами. При этом улучшается экологическая обстановка в литейных цехах за счет утилизации отходов металлургического производства и снижается себестоимость получаемых отливок в результате использования промышленных отходов, природного трепела и металлофосфатных связующих.

Библиографический список

1. Металлофосфатные связующие и смеси / И.Е. Илларионов [и др.]. – Чебоксары: ЧГУ, 1995. – 524 с.
2. Пат. РФ №2356688 Теплоизоляционная смесь для утепления прибылей отливок / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, Н.В. Петрова, А.Ф. Журавлев. Оpubл. 2010 27.05. Бюл. №15.
3. Пат. РФ №2455108 Теплоизоляционная смесь для утепления прибылей отливок / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, А.Ф. Журавлев; опубл. 2012 10.07. Бюл. № 19.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

I.E. Illarionov, I.A. Strelnikov, N. V. Petrova , A.F. Zhuravlev, A.A. Molyakov

SOME QUESTIONS AND FEATURES OF APPLICATION OF METALPHOSPHATIC MIXES FOR RECEIVING OTLIVOK FROM FERROUS METALS AND ALLOYS

Cheboksary Polytechnic Institute (branch) of Moscow State Open University. V.S. Chernomyrdin

Discusses some of the features of the application of металлофосфатных binders and mixtures to obtain castings from ferrous and non-ferrous metals and alloys.

Key words: technological process, холоднотвердеющие mixture, metalphosphatic binders and mixtures, Tripoli, metal production waste, peat, low degree of decomposition, heat-insulating coating, casting.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК.621.793.3:669.248.8

В.В. Рогожин, Е.Ю. Ананьева, В.В. Бенсон, М.Г. Михаленко

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИТРАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА НИКЕЛИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

На основе метода потенциометрического титрования, рН-метрии и компьютерной обработки данных определены области образования труднорастворимых соединений, формирующихся в цитратных электролитах никелирования в условиях их приготовления и эксплуатации. Даны рекомендации по повышению стабильности таких электролитов и методы приведения отработанных электролитов в работоспособное состояние.

Ключевые слова: электроосаждение, покрытия никель-бор, цитратные комплексы, стабильность.

Электроосаждение покрытий из комплексных электролитов является весьма распространенным процессом в гальванотехнике.

Из комплексные электролиты отличаются высокой буферной емкостью, низкой чувствительностью к различным загрязнениям, но часто мало стабильны в работе [1].

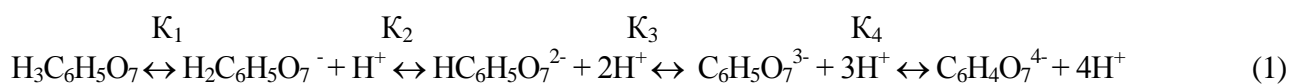
Из комплексных электролитов обычно выделяются мелкокристаллические покрытия, которые более равномерно распределены по поверхности и имеют низкие внутренние напряжения. Это обусловлено высокой катодной поляризацией, которая в свою очередь зависит от строения комплекса. Характерной особенностью электродных процессов, протекающих с участием комплексов любых металлов, является наличие химической стадии, предшествующей стадии разряда [2]. Комплексные электролиты отличаются высокой буферной емкостью, низкой чувствительностью к различным загрязнениям, но часто мало стабильны в работе [1].

Для процесса никелирования комплексные электролиты менее распространены. Известен, цитратный (лимоннокислый) электролит никелирования, который рекомендуется к использованию для целей гальванопластики и электроосаждения сплавов. Такой нейтральный по значению рН электролит позволяет наносить прочносцепленные, равномерные покрытия на сложнопрофилированные поверхности, а также на металлические основы, которые подвергаются коррозии в стандартных (кислых) электролитах никелирования [2, 3].

Лиганд в таких электролитах - лимонная кислота имеет одну спиртовую и три карбоксильные группы, способные образовывать координационные соединения с двухвалентными металлами, в том числе никелем.

В зависимости от величины рН с ионами никеля будут образовываться комплексы с различной растворимостью, устойчивостью, способные накапливаться в прикатодном слое и влиять на процесс электроосаждения никеля [2].

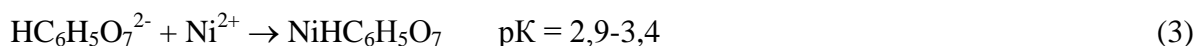
В водных растворах лимонной кислоты устанавливаются следующие равновесия:



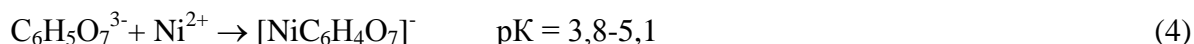
С константами диссоциации:

$$K_1 = 8,4 \cdot 10^{-4}; \quad K_2 = 1,8 \cdot 10^{-5}; \quad K_3 = 3,24 \cdot 10^{-6}; \quad K_4 = 2,5 \cdot 10^{-12} \quad (2)$$

Процесс комплексообразования при $pH > 1$ протекает в основном с третьей формой лимонной кислоты:



При $pH > 3$ образуется комплекс $[NiC_6H_4O_7]^-$:



Близко к нейтральной среде начинается диссоциация оксигруппы лимонной кислоты, в результате чего образуется комплекс никеля:



Анализ литературных данных показал, что pK комплекса $[NiC_6H_4O_7]^{2-}$ зависит от величины pH раствора и составляет:

$$pK = 5,27 \text{ при } pH=7 \quad \text{и} \quad pK=11,2 \text{ при } pH=8.$$

В работах [4-6] показано, что наилучшими характеристиками обладают цитратные электролиты никелирования с добавкой хлорида аммония, который увеличивает выход по току никеля, улучшает растворение анодов и повышает качество покрытий.

С ростом концентрации ионов NH_4^{+} в приэлектродном слое повышается содержание комплексов, константа нестойкости которых при $pH=7-8$ имеет более высокое значение, чем для цитратных. Например, для $Ni(NH_3)_2^{2+}$ pK составляет 13,71, а для комплекса $Ni(NH_3)_5^{2+}$ соответственно 38,15. Положительный заряд аммиачных комплексов способствует протеканию процесса никелирования с меньшими поляризационными затруднениями.

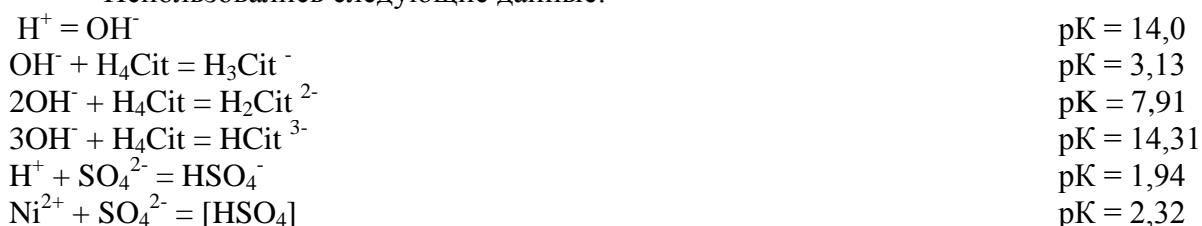
Кроме того, ионы NH_4^{+} могут образовывать при взаимодействии с гидроксильными ионами, находящимися у катодной поверхности, гидроксид аммония, который растворяет гидроксид никеля, в той или иной степени, влияющий на твердость получаемого осадка и внутренние напряжения.

В условиях приготовления и эксплуатации цитратного электролита никелирования в ряде случаев происходит нарушение стабильности его состава. В частности? отмечалось выпадение кристаллического осадка (двойные соли аммонийного сульфата никеля и плохо растворимых цитратов никеля при нейтральных значениях pH раствора) [7].

В целях предотвращения образования труднорастворимых соединений в электролите нами, с использованием метода потенциометрического титрования, pH -метрии и компьютерной обработки данных по программе «Комплексообразование» [8], были определены области существования возможных труднорастворимых соединений в виде фазовых диаграмм.

В расчетах была использована наиболее полная система равновесий для растворов, содержащих ионы никеля, цитрат, аммоний и сульфат (вода в равновесиях не указана) [8].

Использовались следующие данные:



$3\text{OH}^{3-} + \text{Ni}^{2+} = \text{Ni}[\text{OH}]_3^-$	pK = 30,0
$2\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} = \text{Ni}[\text{OH}]_2$	pK = 19,0
$\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} = \text{Ni}[\text{OH}]^+$	pK = 9,86
$2\text{OH}^- + \text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{H}_2\text{Cit})]$	pK = 4,43
$3\text{OH}^- + \text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{HCit})]^-$	pK = 7,85
$7\text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{Cit} + 2\text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}_2\text{HCit}_2]^{3-}$	pK = 21,6
$8\text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{Cit} + 2\text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}_2\text{HCit}_2]^{4-}$	pK = 30,3
$2\text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{H}_3\text{Cit})_2]^{2-}$	pK = 3,91
$4\text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{H}_2\text{Cit})_2]^{2-}$	pK = 9,7
$6\text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{HCit})_2]^{4-}$	pK = 16,8
$9\text{OH}^- + 3\text{H}_4\text{Cit} + \text{Ni}^{2+} = [\text{Ni}(\text{HCit})_3]^{7-}$	pK = 28,4
$\text{OH}^- + \text{NH}_4^+ = \text{NH}_3$	pK = 9,25
$\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} = \text{NH}_4^+ = \text{NiNH}_3^{2+}$	pK = 6,58
$2\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} + 2\text{NH}_4^+ = \text{Ni}(\text{NH}_3)_2^{2+}$	pK = 13,71
$3\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} + 3\text{NH}_4^+ = \text{Ni}(\text{NH}_3)_3^{2+}$	pK = 21,35
$4\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} + 4\text{NH}_4^+ = \text{Ni}(\text{NH}_3)_4^{2+}$	pK = 29,53
$5\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} + 5\text{NH}_4^+ = \text{Ni}(\text{NH}_3)_5^{2+}$	pK = 38,15
$6\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} + 6\text{NH}_4^+ = \text{Ni}(\text{NH}_3)_6^{2+}$	pK = 47,49

Произведение растворимости основных солей:

$2\text{OH}^- + \text{Ni}^{2+} = \text{Ni}(\text{OH})_2$	pL = 13,11
$\text{Ni}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{NiSO}_4$	pL = 1,78
$2\text{SO}_4^{2-} + \text{Ni}^{2+} + 2\text{NH}_4^+ = (\text{NH}_4)_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2$	pL = 3,93
$\text{SO}_4^{2-} + 2\text{NH}_4^+ = (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	pL = 3,18

Исследования условий комплексообразования проводились путем титрования растворов, содержащих различные комбинации компонентов электролита водным раствором аммиака (10 моль/л) [7].

В качестве исходных растворов использовались:

1. Раствор NiSO_4 (2 моль/л).
2. Аммиак водный, разбавленный до 10 моль/л.
3. Серная кислота (1 моль/л), приготовленная из фиксанала.
4. Кислота лимонная или натрий лимоннокислый.

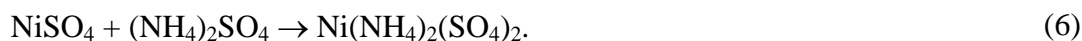
Растворы для титрования готовились сливанием расчетного количества исходных растворов, лимонная кислота (цитрат натрия) вводилась по навеске.

Титрование проводилось раствором аммиака из бюретки объемом 50 мл, с шагом 2 мл, до измерения pH проводилась выдержка в течение 1 минуты. Калибровка pH-метра проводилась с использованием буферных растворов, приготовленным по стандарт-титрам (pH=3,5; 9,6).

В результате проведенных расчетов были построены диаграммы равновесия системы никель-аммоний-сульфат в отсутствие и присутствии цитрата ионов.

На рис. 1 показаны области образования гидроксида и двойных аммонийно-сульфатных солей в зависимости от pH раствора и концентрации компонентов.

Области образования $\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ и $\text{Ni}(\text{OH})_2$ лежат в пределах от 7 до 2 pH и зависят от соотношения компонентов раствора – NH_3 и H_2SO_4 . При содержании аммиака в растворе меньше 3 моль/л и H_2SO_4 не более 0,2 моль/л образуется гидроокись никеля, при том же содержании NH_3 , но с концентрацией H_2SO_4 больше 0,4 моль/л, возникает аммонийно-сульфатная соль никеля:



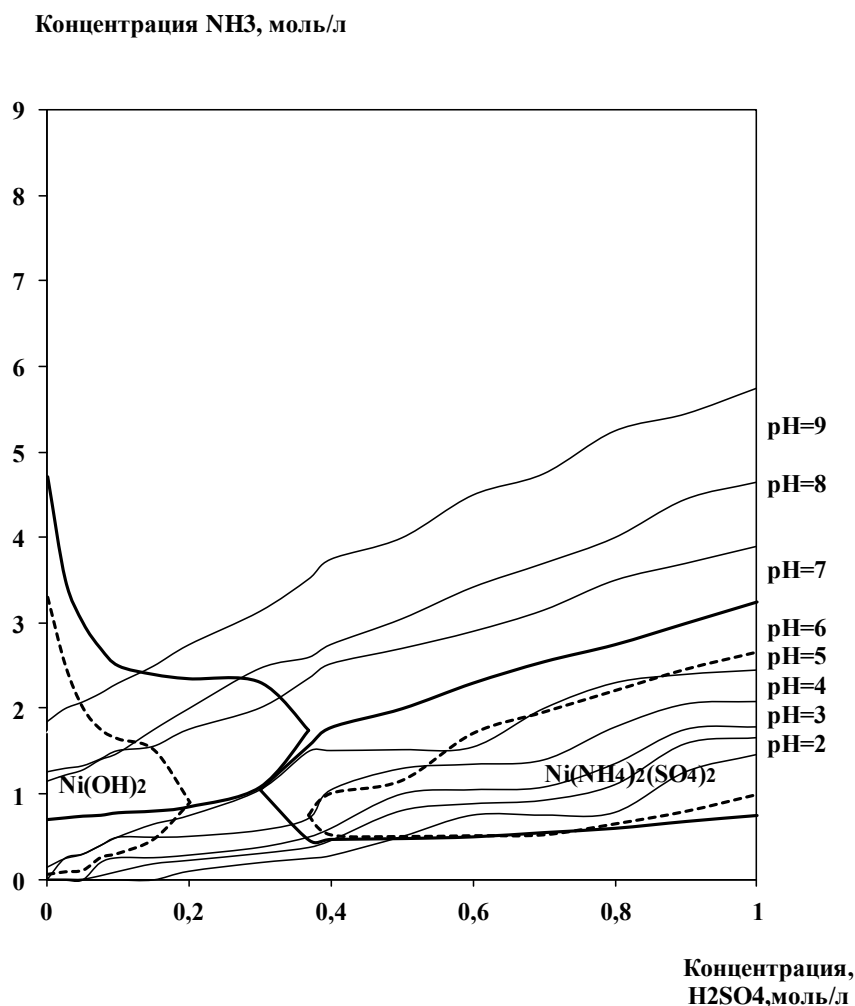


Рис. 1. Изотермическое состояние диаграммы равновесия никель-аммоний-сульфат при отсутствии лимонной кислоты – 0 моль/л; при общей концентрации никеля $\cdots\cdots\cdots$ 0,3 моль/л и — 0,5 моль/л

Увеличение концентрации сульфата заметно снижает вероятность образования гидроксида никеля. При концентрации цитрата 0,8 моль/л осадок гидроксида $\text{Ni}(\text{OH})_2$ в электролите не наблюдается. Область образования $\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ уменьшается, ей соответствует интервал $\text{pH}=2-3$. В свою очередь, повышенное содержание никеля в растворе способствует образованию гидроксида никеля, который накапливается в растворе уже при $\text{pH}=8$ (рис. 1). В этом случае введение цитрата препятствует образованию гидроксида, сокращая область образования смешанной соли ($\text{pH}=5-2$) (рис. 2).

Анализ полученных зависимостей позволил сделать заключение о том, что во избежание образования твердой фазы необходим избыток лиганда (лимонной кислоты в растворе) над общей концентрацией никеля. При нарушении данного условия в слабощелочных растворах возможно образование гидроксида никеля, а при наличии в растворе анионов сульфата в слабокислой среде происходит формирование двойных солей никеля. Растворению данных соединений, нарушающих стабильность цитратных растворов, способствует увеличение концентрации аммиака.

Область образования гидроксида никеля расширяется с увеличением концентрации NiSO_4 (рис. 2). Введение лиганда устраняет образование $\text{Ni}(\text{OH})_2$, увеличивая область формирования двойных солей никеля $\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ (рис. 2), что является менее негативным явлением для цитратных растворов, так как они по полученной системе равновесий обладают достаточной растворимостью, увеличивающейся, очевидно, при рабочих температурах электролитов никелирования (40-50 $^{\circ}\text{C}$).

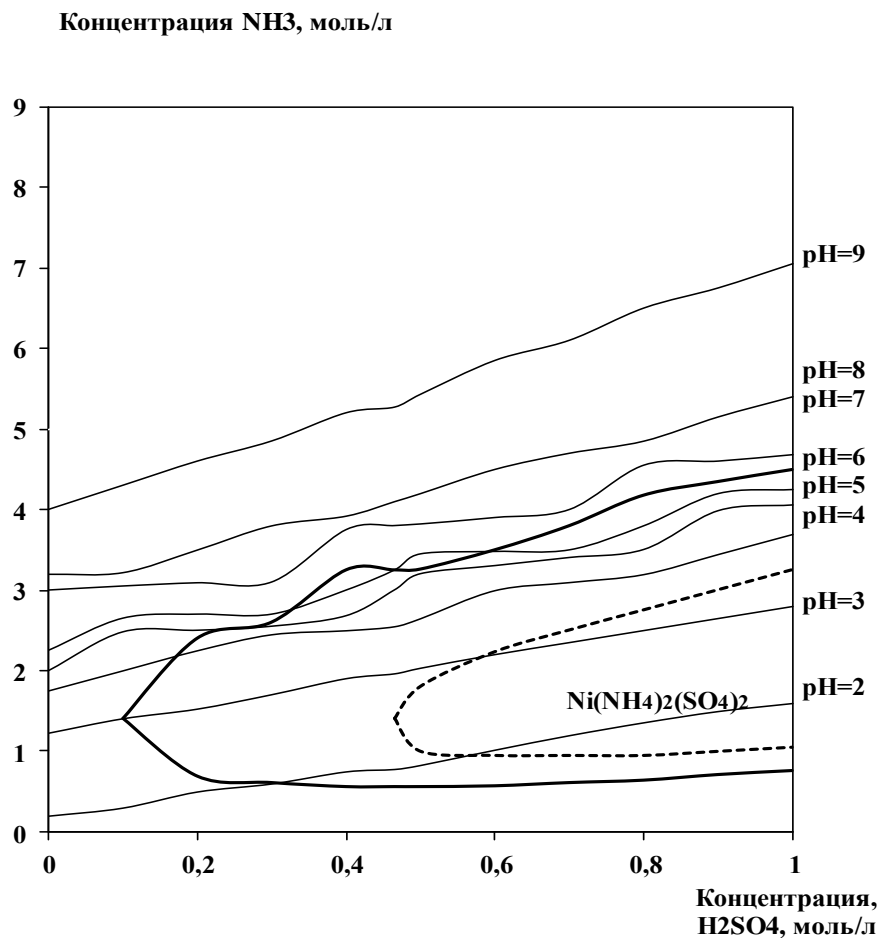


Рис. 2. Изотермическое состояние диаграммы равновесия никель-аммоний-сульфат при концентрации лимонной кислоты – 0,8 моль/л; при общей концентрации никеля 0,3 моль/л и — 0,5 моль/л

На основании рассмотренных систем можно предложить ряд рекомендаций для работы с цитратными электролитами для осаждения никеля и его сплавов.

Так, необходимо поддерживать концентрацию аммиачного компонента и цитрата в строго определенных пределах, вследствие того, что в процессе работы электролита при температуре порядка 50°C из раствора будет выделяться аммиак с распадом аммиачного комплекса никеля, а цитратный комплекс никеля с отрицательным зарядом и относительно малой активностью будет разряжаться с большими затруднениями. Как следствие может снижаться катодный выход по току. Анодный выход по току остается в пределах 100%, поэтому возможно накопление в растворе избыточного количества ионов никеля, что увеличивает возможность образования труднорастворимых осадков.

Возможно, более рациональным будет использование цитратных растворов, разбавленных по соли никеля, так как в этом случае уменьшается вероятность образования двойных солей гидроксида никеля [9].

Для повышения стабильности работы цитратного электролита необходимо поддерживать pH раствора в строго определенном интервале (оптимальным является интервал $7,2 \div 7,8$).

В результате проведенных исследований, на основе использования областей образования труднорастворимых соединений, была реализована возможность приведения электролита с выпавшим труднорастворимым осадком в рабочее состояние.

Образовавшиеся при хранении осадки растворялись избытком аммиака либо кислота-

ми с дальнейшим доведением рН электролита до рабочего значения (рН = 7,2). Для этого были рекомендованы корректирующие смеси, представленные в табл. 1.

Объемы компонентов корректирующей смеси приведены для 50 мл электролита.

Таблица 1

Корректирующие смеси для цитратного электролита никелирования

Состав корректирующей смеси	рН	Возможные превращения
NH ₄ OH(25%) - 8мл HCl(1:1) - 14мл	рН=10,2 до рН=4,75	комплекс(4)→комплекс(5)
H ₂ SO ₄ (1:1) - 5мл NaOH(КОН) _{разб.} - 7,5мл	рН=1,5 до рН=7,15	комплекс(3)→комплекс(5) комплекс(4)→комплекс(5)
HCl(1:1) - 10мл NaOH(КОН) - 9,5мл	рН=0,95 до рН=7,4	комплекс(4)→комплекс(5) комплекс(3)→комплекс(5)

Библиографический список

1. **Пурин, В.А.** Электроосаждение ряда металлов из комплексных (нецианистых) электролитов / В.А. Пурин. – Л.: ЛДНТП, 1968. – 32 с.
2. **Ясконене, С.И.** Исследование процессов электроосаждения никеля из цитратных растворов. Кандидатская диссертация/ Вильнюс, 1979. – 102 с.
3. **Грилихес, С.Я.** Электролитические и химические покрытия / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.
4. **Кудрявцев, В.Н.** Электроосаждение никеля и сплава никель-бор из аммиачно-цитратного электролита / В. Н. Кудрявцев [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т.4. №4. С. 25–30.
5. **Плохов, В.А.** Гальваническое осаждение никель-борных покрытий с низким содержанием бора из электролитов с добавкой дикарбаундекаборат-иона / В.А. Плохов, В.Н. Флеров, В.А.Дягилев // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1988. Т. 31. № 1. С. 77–80.
6. **Ананьева, Е.Ю.** Особенности электроосаждения покрытий никель-бор из электролитов с добавкой диметиламинборана (ДМАБ)/ Е.Ю. Ананьева, В.В. Рогожин // Гальванотехника и обработка поверхности. 2005. №1. С. 23–27.
7. **Грибанова, Ю.Н.** Гальваническое осаждение никель-борных покрытий из электролитов с добавкой декагидродекабората натрия.: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / Грибанова Юлия Николаевна. – Нижний Новгород, 1999. – 16 с.
8. **Бенсон, В.В.** Превращения в комплексных электролитах некоторых электрохимических систем и их математическое моделирование: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.03 / Бенсон Валерий Вильнисович. – Нижний Новгород, 1999. – 18 с.
9. Пат. 2329337/С1 РФ МКИ8 С25Д3/56. Электролит для электрохимического осаждения покрытий никель-бор / Е.Ю. Ананьева, В.В. Рогожин.

Дата поступления
в редакцию 16.10.2012

V.V. Rogozhin, E.Y. Ananieva, V.V.Benson, M.G.Mikhailenko

IMPROVING THE EFFICIENCY CITRIC ELECTROLYTE NICKEL PLATING

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

On the basis of a potentiometric method, pH-measurement and computer data processing, the areas of formation nonsoluble salt in nickel citric electrolytes are determined in conditions of their preparation and operation.

The recommendations for increase of stability and methods of reduction of spent electrolytes in a serviceable condition are given.

Key words: electroplating, nickel-boron coatings

К 541.12.13 8: 621.357

К.М. Элькинд, И.Г. Трунова

СВЯЗЬ ГИДРАТАЦИИ С ЯВЛЕНИЯМИ ПЕРЕНОСА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена связь электропроводности, диффузии и вязкого течения с величиной энергии гидратации в водных растворах электролитов. Показано, что сопротивление движению, как ионов, так и растворов в целом находится в обратной зависимости от энергии гидратации. Найдены количественные соотношения между этими параметрами.

Ключевые слова: гидратация, растворы электролитов, электропроводность, диффузия, вязкое течение.

Явления переноса в водных растворах электролитов (электропроводность, диффузия и вязкое течение) представляют значительный интерес, как в теоретическом плане, так и с точки зрения реализации химических, электрохимических, биологических и многих других процессов. Изучению явлений переноса посвящен целый ряд экспериментальных и теоретических работ, детальный обзор которых дан в работах многих авторов [1,2]. Однако следует отметить, что влияние на процессы переноса такого важного фактора, как гидратация недостаточно полно освещено в существующих теориях и методах расчёта.

При рассмотрении явлений переноса в растворах электролитов часто используют закон Стокса, связывающий скорость V , с которой сфера радиуса r двигается в среде с вязкостью η под действием приложенной силы f [1,2]:

$$V = f/6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r. \quad (1)$$

Это уравнение хорошо выполняется, когда радиус движущихся частиц велик по сравнению с радиусом частиц среды. Применение этого уравнения для расчёта эквивалентной электропроводности в бесконечно разбавленных растворах λ_i^0 приводит к уравнению [1,2]:

$$\lambda_i^0 = q_i \cdot F/6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r, \quad (2)$$

где F - число Фарадея, q_i - заряд иона, η - вязкость жидкости.

Эквивалентная электропроводность λ^0 служит основой для вывода уравнений, применимых для растворов с конечной концентрацией электролитов [1,2]:

$$\lambda = \lambda^0 - \lambda_p - \lambda_s, \quad (3)$$

где λ_p и λ_s - члены, учитывающие влияние релаксационного и электрофоретического эффектов [1].

Аналогичные выражения, в основе которых используют параметры, характеризующие бесконечно разбавленные растворы, существуют для вязкого течения (уравнение Джонса – Дола) [1]:

$$\eta_r = \eta/\eta_0 = 1 + A\sqrt{c} + Bc, \quad (4)$$

где η_r – относительная вязкость; η и η_0 – соответственно вязкости раствора электролита и чистого растворителя; A и B – коэффициенты; c – концентрация.

Для процесса диффузии используют уравнение Онзагера – Фуосса [1]:

$$D = (D_0 + \Delta_1 + \Delta_2) \cdot \left[1 + \frac{\partial \ln y^{\pm}}{\partial \ln c} \right], \quad (5)$$

где Δ_1 и Δ_2 - электрофоретические поправки, которые являются сложными функциями температуры, концентрации c , ионной силы раствора, валентности, чисел переноса анионов t_a и катионов t_c и других величин, характеризующих перенос ионов, D и D_0 – коэффициенты диффузии и самодиффузии, соответственно, γ – коэффициент активности.

Целью настоящей работы является на основе имеющегося фактического и справочного материалов уточнить влияние энергии гидратации на протекание явлений переноса. С целью исключения влияния других факторов на процессы переноса в настоящем сообщении рассматриваются только бесконечно разбавленные растворы.

Использование в уравнении 2 значений кристаллографических радиусов приводит к величинам λ_i^0 , существенно отличающихся от экспериментальных значений. Чтобы это уравнение оказалось применимым к растворам электролитов, радиусам ионов приписывают значения r_{st} , которые носят название «стоксовских» или гидродинамических радиусов r_{st} , и значительно отличаются по величине от кристаллографических радиусов r_{cr} (табл. 1).

Наименьшие значения электропроводности и коэффициента диффузии отмечаются для ионов с большой энергией гидратации (таблица 2). К таким ионам относятся Li^+ , Na^+ , F^- и ряд других ионов. Все они имеют r_{st} больше r_{cr} , что обычно объясняют наличием значительной гидратной оболочки. Но к ионам Cs^+ , Rb^+ , Cl^- и др., у которых r_{st} меньше r_{cr} такое объяснение не подходит. Поэтому «стоксовские» радиусы следует рассматривать не в качестве реального физического параметра, а всего лишь как своего рода гидродинамические эквиваленты, и что именно такими радиусами должны обладать ионы, чтобы к их движению можно было применить уравнение Стокса.

Таблица 1

Гидродинамические и кристаллографические радиусы некоторых ионов

Ион	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	F^-	Cl^-	Br^-	J^-
$r_{st} \times 10^{10} \text{М}[1]$	2,36	1,80	1,21	1,16	1,15	1,68	1,20	1,16	1,15
$r_{cr} \times 10^{10} \text{М}[2]$	0,68	0,97	1,33	1,48	1,69	1,36	1,81	1,96	2,20
Ион	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Sr^{2+}	Ba^{2+}	Be^{2+}	Zn^{2+}	Cu^{2+}	Al^{3+}	La^{3+}
$r_{st} \times 10^{10} \text{М}[1]$	3,07	3,45	3,09	2,87	4,06	3,4	3,24	4,42	3,93
$r_{cr} \times 10^{10} \text{М}[2]$	1,04	0,74	1,13	1,35	0,68	0,83	0,70	0,57	1,14

Несмотря на свою неопределенность, «стоксовские» радиусы ионов используют для дифференциации ионов по степени их сольватации и наряду с кристаллографическими радиусами ионов r_{cr} , используют при рассмотрении процессов переноса в бесконечно разбавленных растворах, а также в растворах с неводными растворителями.

Косвенным образом (через λ_i^0) «стоксовский» радиус входит и в уравнение коэффициента диффузии D_i^0 для бесконечно разбавленных растворов [1, 2]:

$$D_i^0 = \frac{RT}{|z_i| F^2} \lambda_i^0. \quad (6)$$

Скорость диффузии ионов в растворе, как и в случае электропроводности, возрастает с увеличением радиуса иона (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2
Параметры гидратации и процессов переноса некоторых ионов
в бесконечно разбавленных водных растворах

Ионы	λ_i^0 , Ом ⁻¹ ·м ² ·Моль ⁻¹ [3]	$D_0 \times 10^9$, м ² /с [3]	$-\Delta H_h$ кДж/моль [4,5]	$-\Delta H_h/r_{st}$ $\times 10^{10}$, Н	$-\Delta H_h/lz$ $\times 10^{10}$, Н
Li ⁺	38,68	1,033	531	37	42,8
Na ⁺	50,28	1,338	423	38	30,1
K ⁺	73,5	1,962	339	45	21,7
Rb ⁺	77,5	2,00	314	43,9	18,4
Cs ⁺	77,2	2,06	280	39	15,2
F ⁻	55,4	1,48	485	47	29,6
Cl ⁻	76,3	2,04	361	49	18,9
Br ⁻	78,4	2,05	330	45,6	18,0
I ⁻	76,9	2,09	289,9	45,8	13,5
1/2Ca ²⁺	59,5	0,79	1616	87	112
1/2Mg ²⁺	53,06	0,71	1959	94,5	154
1/2Sr ²⁺	59,5	0,79	1503	80,7	100
1/2Ba ²⁺	63,64	0,86	1339	78	82
1/2Be ²⁺	45,0	0,65	2514	102	204
1/2Zn ²⁺	53,5	0,71	2075	98	164
1/2Ni ²⁺	54,0	0,72	2138	104,5	165
1/2Cu ²⁺	56,6	0,75	2130	109,2	171
1/2Pb ²⁺	70,0	0,93	1515	96,4	132
1/3Al ³⁺	63,0	0,56	4707	173	404
1/3La ³⁺	69,7	0,62	3332	143,5	221,3
1/3In ³⁺	53,6	0,48	4159	136	377
1/3Fe ³⁺	68,0	0,60	4420	182	389

В условиях, когда на ион действует постоянное внешнее электрическое поле, скорость движения ионов как при электромиграции, так и при диффузии (при одинаковом заряде ионов) должна бы уменьшаться не только с ростом радиуса, но и с увеличением массы ионов. Однако, измерения показывают, что электропроводность и коэффициент диффузии существенно больше именно для ионов с большими размерами и массой (рис. 1).

Массы ионов рубидия и цезия (85,4 и 132,9 соответственно) значительно превышают массу лития (6,9), но электропроводность этих ионов практически в два раза больше. В таком случае следовало бы предположить, что литий переносит количество молекул воды в 1,5-2 раза больше его числа гидратации равное 5-8 [5], включая первичную и вторичную гидратные оболочки. К аналогичным выводам приводит и рассмотрение зависимости λ_i^0 от кристаллографического радиуса для двухвалентных катионов (рис. 1).

Ионы с большой молекулярной массой должны иметь соответственно и большие размеры. Если принять, что движение ионов происходит по вакансиям или т.н. «дыркам» [6], то для перемещения ионов большего размера потребуется не только «дырка» соответствующих размеров, но и значительная энергия для её образования. Эти, а также и другие факты одно-

значно указывают на то, что разница в скоростях перемещения ионов определяется другими параметрами и уравнение Стокса не может объяснить все особенности движения ионов в водных растворах, электролитов.

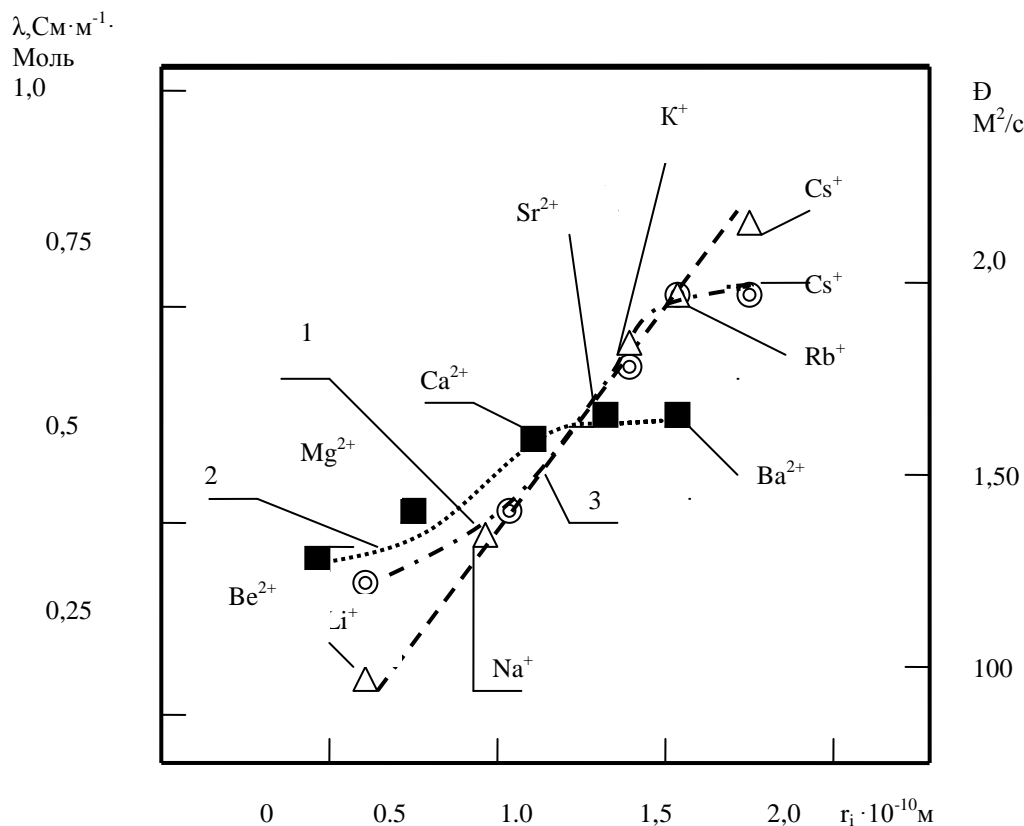


Рис. 1. Зависимость эквивалентной электропроводности (кривая 1 для одновалентных ионов, кривая 2 - для двухвалентных ионов) и коэффициента диффузии (кривая 3) от кристаллографического радиуса ионов

Энтальпия гидратации характеризует все изменения в растворе, связанные с растворением ионогенных веществ, в том числе, и величину силу связи иона с молекулами растворителя. Из данных табл. 2 следует, что зависимость ионной электропроводности и коэффициента диффузии от энтальпии гидратации носит обратный характер и близка к прямолинейной. При наложении внешнего силового поля движение ионов происходит в соответствии с величиной и направлением этого поля и сопровождается разрывом связей между ионами и молекулами растворителя. Это позволяет заключить, что сила сопротивления движению ионов связана с гидратацией.

Из данных таблицы 2 следует, что ионам с большей энергией гидратации соответствуют и большие значения «стоксовских» радиусов. При этом изменение этих величин, как в ряду щелочных металлов, так и в ряду галогенов носит практически одинаковый характер.

Увеличение заряда иона ведёт к пропорциональному увеличению отношения $\Delta H_h/r_{st}$ (в пересчете на один ион) имеющего размерность силы, и которое по своему физическому смыслу должно характеризовать сопротивление движению иона. Отношение $\Delta H_h/r_s$ для однозарядных ионов составляет $\sim (36-50) \cdot 10^{-10}$ Н. Для двухвалентных ионов величина отношения $\Delta H_h/r_{st}$ примерно в два раза больше, чем для одновалентных ионов и находится в интервале $(80-105) \cdot 10^{-10}$ Н. Для трехвалентных ионов значение $-\Delta H_h/r_{st}$ находится в пределах $(140-180) \cdot 10^{-10}$ Н, то есть практически в три раза больше, чем для одновалентных. Частное от деления энергии гидратации на валентность и радиус иона $-\Delta H_h/zr_{st}$ по своему физическому

смыслу представляет силу сопротивления движению частиц единичного заряда и имеет постоянное значение в пределах $37 \div 50 \cdot 10^{-10}$ м.

Постоянство $\Delta H_h / z r_{st}$ вполне естественно, так как соответствует уравнению Стокса, согласно которому сопротивление движению иона определяется только вязкостью раствора (она постоянна в данном случае и равна вязкости чистого растворителя), и радиусом иона, в качестве которого принимается гидродинамический радиус. Это также подтверждает представление о «стоксовском» радиусе как о гидродинамическом эквиваленте.

Однако, если рассмотреть отношение ΔH_h к реальным физическим величинам, например, к l - длине связи ион – молекула воды, в качестве которой можно в первом приближении сумму кристаллографического радиуса иона r_{cr} и радиуса молекулы воды то можно получить некоторое представление об истинной величине силы сопротивления, которая находится в соответствии с величиной энергии гидратации. В этом случае, например, отношение $\Delta H_h / l$ для лития более чем в два раза больше чем для рубидия и цезия ($42,8 \cdot 10^{-10}$ Н и $18,4 \cdot 10^{-10}$ Н, для цезия – $15,4 \cdot 10^{-10}$ Н соответственно). Это приблизительно соответствует разнице между величинами эквивалентной электропроводности для этих ионов. Аналогичный результат отмечается и в случае коэффициента диффузии. Эти данные следует рассматривать всего лишь как качественную оценку силы сопротивления, так как $-\Delta H_h$ включает в себя энергетические параметры всех процессов, протекающих при гидратации, а не только взаимодействие ион – молекулы воды.

Таким образом, уменьшение сопротивления движению при постоянной движущей силе, обусловленное меньшей ΔH_h , приводит к увеличению скорости перемещения ионов. Именно этим обстоятельством и можно объяснить увеличение подвижности таких ионов как Cs^+ , Rb^+ , Cl^- и др. в водных растворах электролитов.

Отличие «стоксовских» радиусов от кристаллографических можно объяснить соотношением энергии связи молекул воды с ионом непосредственно в гидратной оболочке и связи между молекулами воды за её пределами (7).

Таблица 3

Значения энтальпии кластеризации $\Delta H_{кл}$ ($\text{Дж} \cdot 10^{-19}$) некоторых ионов [7-9] *

N	Ионы									
	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	F^-	Cl^-	J^-	Br^-	OH^-
0	2,4	1,66	1,25	1,1	0,89	1,62	0,9	0,7	0,88	1,87
1	1,79	1,38	1,12	0,95	0,83	1,15	0,88	0,67	0,85	1,14
2	1,44	1,09	0,91	0,85	0,73	0,94	0,82	0,66	0,8	1,04
3	1,14	0,96	0,82	0,77	0,73	0,93	0,77	-	0,75	0,99
4	0,96	0,83	0,73	-	-	0,9	-	-	-	-
5	0,83	0,73	0,69	-	-	-	-	-	-	-

Примечание: * для сравнения – энергия диссоциации для чистой воды $E_{дис}$ по реакции $n\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + (n-1)\text{H}_2\text{O}$ равна $0,71 \cdot 10^{-19}$ Дж.

На это указывают и спектроскопические исследования гидратации ионов в газовой фазе, проведенные Кебарле [7-9]. Эта реакция протекает по уравнению:



Некоторые результаты исследований Кебарле представлены в табл. 3 и на рис. 2. Из этих данных следует, что энергия взаимодействия между ионом и молекулой воды уменьша-

ется с увеличением количества $-n-$ и во всех случаях стремится к величине, характерной для энергии связи между молекулами в «чистой» воде.

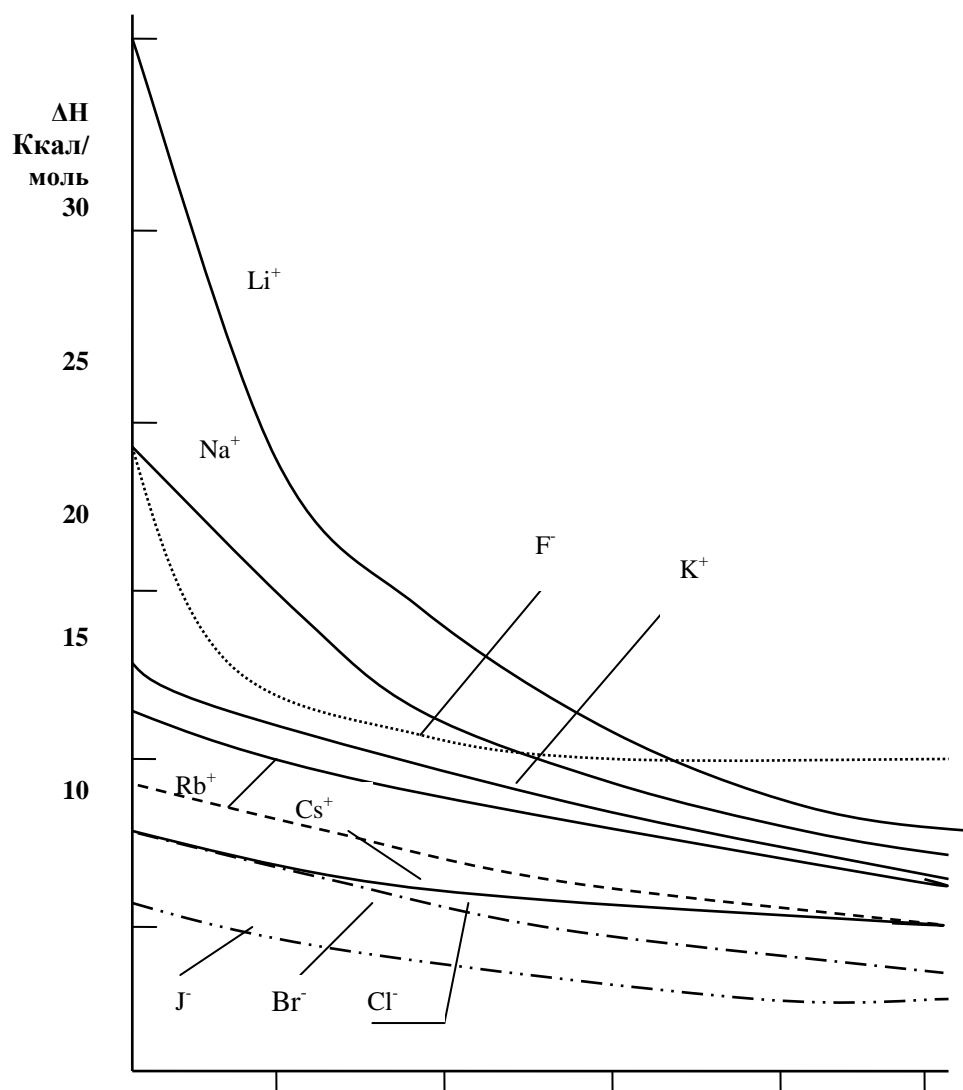


Рис. 2. Зависимость энтальпии газовой гидратации одновалентных ионов от количества присоединенных молекул воды [8-10]

По мере приближения к этой величине будут облегчаться и процессы обмена воды между гидратной оболочкой иона и молекулами воды в объеме раствора, что и обеспечивает уменьшение сопротивления движению ионов. В конечном итоге это и является причиной большей электропроводности ионов с малой энергией гидратации.

Связь вязкого течения с параметрами гидратации проявляется главным образом косвенно, так как вязкость входит в основные уравнения электропроводности и диффузии в водных растворах электролитов.

А непосредственно связь вязкости с гидратацией проявляется, например, в явлении отрицательной вязкости (рис. 3), которая характерна для электролитов, содержащих ионы с малой энтальпией гидратации (KCl , $RbCl$, $-KJ$, $CsCl$).

Кроме того, как было показано в работах [10-12], энтальпия гидратации использовалась и при расчетах вязкости водных растворов электролитов с помощью модифицированного уравнения Андраде.

Таким образом, проведенный анализ опытных и литературных данных показал, что в бесконечно разбавленных и малоconцентрированных растворах основное влияние на про-

цессы переноса оказывает энергия гидратации. В отличие от модели переноса в непрерывной среде, согласно которой сопротивление движению зависит от вязкости и размера частиц, сами вязкость и гидродинамический радиус являются производными от степени гидратации ионов.

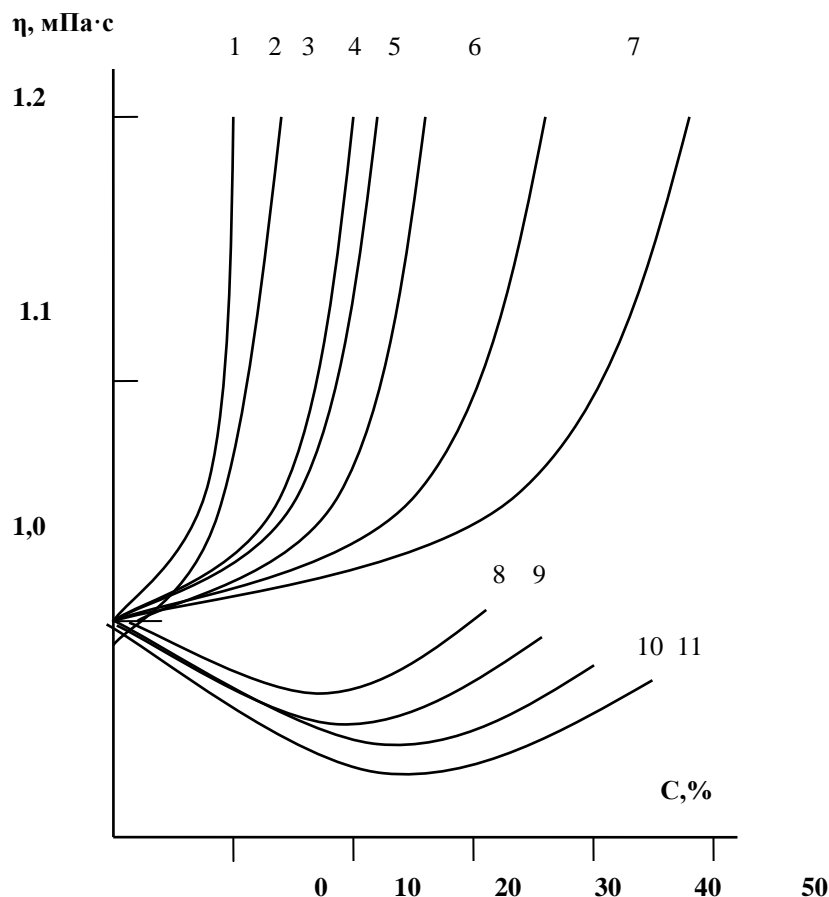


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамической вязкости η (мПа·с) от концентрации электролитов при 293 К:
1-LiCl, 2-NaCl, 3-KF, 4-LiBr, 5-NaBr, 6-LiJ, 7-NaJ, 8-KCl, 9-RbCl, 10-KJ, 11-CsCl

Библиографический список

1. Эрдей-Груз, Т. Явления переноса в водных растворах / Т. Эрдей-Груз. – М.: Мир, 1976. – 595 с.
2. Методы измерения в электрохимии / под ред. Э. Егера, Залкинда А. – М.: Мир, 1977. Т. 2. С. 10–127 с.
3. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.
4. Васильев, В.П. Термодинамические свойства растворов электролитов / В.П. Васильев. – М. Высшая школа, 1982. – 320 с.
5. Гордон, Дж. Органическая химия растворов электролитов / Дж. Гордон. – М.: Мир, 1979. – 712 с.
6. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Изд-во АН УССР 1956.
7. Džidič J., Kebarle P., J. Phys. Chem., 74, 1468, (1970)
8. Arshadi M., Yamdagni R., Kebarle P., J. Phys. Chem., 74, 1483, (1970).
9. Каберле П. Ионы и их взаимодействие в газовой фазе // Ионы и ионные пары в органической химии. – М.: Мир, 1975.
10. Элькин К.М. Метод расчета вязкости водных растворов электролитов // Электронная техника, Сер. 7. 1991. Вып. 4(167). С. 69–72.

11. Элькинд, К.М. Метод расчета ионной удельной электропроводности с учетом микровязкости // Электронная техника. Сер.7. 1992. Вып. 6(175). С. 37–39.
12. Элькинд, К.М. Гидратация и явления переноса. Методы расчёта / К.М. Элькинд, Т.К. Элькинд. – Н. Новгород. Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2009. – 170 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

К.М. Elkind, I.G. Trunova

**COMMUNICATION HYDRATION OF TRANSPORT PHENOMENA IN AQUEOUS
ELECTROLYTE SOLUTION**

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Examined the Association of electrical conductivity, diffusion and viscous flow with the value of the energy of hydration in aqueous solutions of electrolytes. It is shown that the resistance movement, as ions, and solutions as a whole is in inverse proportion to the energy of hydration. Found the quantitative ratio between these parameters.

Key words: hydration, solutions of electrolytes, electrical conductivity, diffusion, viscous flow.

УДК 66.081

В.В. Волков¹, А.В. Бильдюкевич², А.Н. Филиппов³, И.В. Воротынцев⁴,
Г.А. Дибров¹, В.В. Усоский², В.В. Касперчик², В.П. Василевский¹, Э.Г. Новицкий³

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛОВОЛОКОННЫЕ МЕМБРАНЫ С ДИФфуЗИОННЫМИ СЛОЯМИ ИЗ ПОЛИТРИМЕТИЛСИЛИЛПРОПИНА

Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза
им. А.В. Топчиева РАН¹,

Институт физико-органической химии НАН Беларуси²,

Российский государственный Университет нефти и газа им. профессора И.М. Губкина³,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева⁴

Одним из актуальных направлений технологий регенерации абсорбентов, насыщенных диоксидом углерода является применение мембранных контакторов газ-жидкость. Основным элементом, определяющим эффективность этих аппаратов, служат разделительные мембраны, в первую очередь, полволоконные, поскольку они позволяют создать аппараты с наиболее развитой удельной поверхностью ($\geq 10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ объема аппарата). В статье представлены результаты работы по созданию полволоконных композиционных мембран. В качестве подложки использованы асимметричные ультрафильтрационные мембраны из полисульфона, а диффузионного разделительного слоя – поли[1- (триметилсилил)-1- пропин].

Ключевые слова: диоксид углерода, мембранный контактор-десорбер, полимерные мембраны, асимметричные и композиционные мембраны.

Введение

В настоящее время наиболее распространенным промышленным способом очистки дымовых газов от диоксида углерода является абсорбция с использованием хемосорбентов, главным образом, водных растворов алканоламинов [1–3]. Эти процессы и аппаратура для их осуществления уже практически исчерпали возможность оптимизации, поэтому ведутся интенсивные поиски новых технологических решений. Одно из направлений – разработка мембранных контакторов газ-жидкость. Применительно к рассматриваемой проблеме речь идет о контакторах – абсорберах (для стадии извлечения CO_2 из очищаемой газовой смеси) и контакторах – десорберах (для стадии регенерации абсорбентов с выделением чистого CO_2).

Мембранный контактор газ-жидкость – это разделительное устройство, в котором реализуется селективный массоперенос компонентов между двумя фазами, разделенными мембраной [4]. В контакторах – абсорберах возможно применение пористых мембран, а в десорберах – только мембран с диффузионным разделительным слоем, которые исключают попадание жидкой фазы в газовую [4–7]. И в последнем случае требования к мембранам возрастают, а именно, мембрана должна быть высокопроизводительной по диоксиду углерода, устойчива к воздействию высоких давлений и температур. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют композиционные мембраны на основе поли[1- (триметилсилил)-1- пропин]а (ПТМСП), имеющего наивысшие из всех известных полимеров коэффициенты газопроницаемости (для CO_2 – 30000 Баррер) и $T_{ст} > 300 \text{ }^\circ\text{C}$ [8–10]. Высокая газопроницаемость ПТМСП определяются, прежде всего, структурной организацией свободного объема этого полимерного стекла – рекордно высокая доля неравновесного (неотрелаксированного) свободного объема на уровне 20–26%, образуемого системой сообщающихся «нанопустот» размером около 1 нм. На основе ПТМСП созданы плоские мембраны с производительностью по $\text{CO}_2 \sim 30 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм}$ [11]. Однако, для создания контакторов – десорберов, конкурентных известным аппаратам, необходимо применение не плоских, а полволоконных (капиллярных) мембран, чтобы развивать высокую удельную поверхность контакта разделения газ – жидкость

($\geq 10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ объема аппарата). Поэтому задача настоящей работы состояла в исследовании возможности получения композиционных мембран с диффузионным слоем из ПТМСП, сочетающем высокую проницаемость по диоксиду углерода с высокой термостойкостью и барьерными свойствами по отношению к компонентам адсорбционных растворов (алканоламины, вода). В патенте США [10] описана композиционная полуволоконная мембрана на основе ПТМСП. Мембрана состоит из пористой подложки в виде полипропиленовых или керамических полых волокон, на которые нанесена асимметричная мембрана методом погружения исходной полуволоконной пористой мембраны в раствор ПТМСП в изопропиловом спирте с последующим осаждением в этаноле и сушкой. Мембрана на основе полипропиленовой подложки имеет максимальную производительность по CO_2 – 19,3 и по N_2 – 5,8 $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм.}^{-1}$ и исключает течение раствора абсорбента при давлениях жидкости до 37 атм. из жидкой фазы в газовую. Расчетная толщина разделительного слоя – около 4 мкм. Относительно невысокая проницаемость таких мембран, видимо, связана со структурой подложек. Более широко описаны композиционные мембраны на основе ПТМСП плоского формата [12, 13]. Композиционная мембрана на основе ПТМСП, предназначенная для разделения углеводородов фракций $\text{C}_1 - \text{C}_4$ [13]. Мембрана включает пористую подложку из полиэфирсульфона и селективный слой из ПТМСП. Мембрана получена методом погружения, при котором подложка протягивается, касаясь поверхности раствора ПТМСП в толуоле с концентрацией полимера 5%. Таким образом получают композиционные мембраны с одним и более слоями ПТМСП. Газопроницаемость образца мембраны с двухслойным покрытием составляла по N_2 – 2,4 по CH_4 – 5,5, по C_3H_8 – 13,0 $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм.}^{-1}$. По оценке авторов это соответствует расчетной толщине разделительного слоя ПТМСП – 7 мкм.

Высокая проницаемость ПТМСП по CO_2 (мембрана из этого полимера с толщиной диффузионного слоя 1 мкм будет иметь производительность около 80 $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм.}^{-1}$) ставит две проблемы. С одной стороны, подложка для такой мембраны должна обеспечить высокий поток газа, а значит, иметь поры размером десятки доли микрона, а с другой – размер этих пор должен иметь достаточно узкое распределение, причем верхняя граница среднего диаметра пор не должна превышать значения $\sim 0,3$ мкм, чтобы обеспечить возможность формирования ультратонкого слоя ПТМСП [11]. И, наконец, материал подложки должен быть устойчив к действию абсорбентов – водных растворов алканоламинов ($\text{pH} \geq 12$) при температурах до 120 °C и давлениях до 40 атм. [14].

В предлагаемой статье представлены результаты исследования процессов формирования композиционных мембран с использованием в качестве суппорта полуволоконных (капиллярных) мембран из полисульфона и в качестве диффузионного (разделительного слоя) – поли[1- (триметилсилил)-1- пропин]а.

Эксперимент

Материалы

В работе были использованы следующие материалы: полисульфон (ПС) марки ULTRASON (фирма BASF, ФРГ), N,N'-диметилацетамид (ДМАА) (BASF, ФРГ), полиэтиленгликоль (ПЭГ) с молекулярной массой 400 (polyglycol-400, Clariant, ФРГ), ПТМСП синтезирован в лаборатории “Синтеза селективно-проницаемых полимеров” ИХХС РАН (зав. лаб. ИХХС РАН В.С.Хотимский) по методике, описанной в работе [9], $M_w = 1,2 \cdot 10^6$, $M_w/M_n = 2,5$, $[\eta] = 6,0$ дл/г. Гексан квалификации ХЧ (фирма ХИММЕД, РФ).

Получение полуволоконной подложки из полисульфона (ПС)

Формование капиллярных мембран из прядильных растворов осуществляли на лабораторном стенде. Раствор готовили в реакторе с мешалкой, скорость перемешивания 400 об./мин. Температура приготовления раствора – 120 °C, время приготовления – 5 часов. Формование полого волокна проводили по сухо-мокрому методу, при котором волокно формируется вначале на воздухе под действием внутреннего осадителя (воды), а далее в водной осадительной ванне с температурой 12-15 °C. Предварительно отвакуумированные по-

ливочный раствор и внутренний осадитель подавались в кольцевую фильеру давлением сжатого воздуха. Режимы формования варьировались по следующим параметрам: давление раствора полимера ($P_{\text{пол}}$), давление осадителя ($P_{\text{ос}}$), температура внутреннего осадителя (T), расстояние от фильеры до зеркала воды в наружной осадительной ванне (H). При тестировании полученных волокон определяли гидравлическую проницаемость и геометрические характеристики. Результаты нескольких экспериментов представлены в табл.1. Для формования полых волокон с диффузионным слоем использованы подложки с проницаемостью по воде 150-200 (ПС-50) и 700-800 (ПС-100) л/м²ч. По результатам калибровки образцов модельными растворами поливинилпирролидона определен номинальный молекулярно-массовый предел задержания, который составил 50 и 100 кДа соответственно.

Внутренний диаметр половолоконного ультрафильтра 950-1050 мкм, средняя толщина стенок – 280 мкм. Размер пор с внутренней (селективной) стороны не более 0,02-0,05 мкм, с наружной ≥ 10 мкм. Для сохранения качества мембран в процессе последующих операций (или хранения) полые волокна импрегнировались глицерином.

Получение композиционных мембран.

Для исследования процесса формования были выбраны ультрафильтрационные мембраны с высокой водопроницаемостью – ПС-100. Первая операция формования композиционной мембраны – удаление глицерина из половолоконной подложки. Поскольку прямое удаление глицерина может привести к «схлопыванию» внутренних пор половолоконной подложки, удаление проводили методом последовательной замены растворителями с уменьшающимся поверхностным натяжением [15]. Волокна сначала вымачивали в воде для замены глицерина, затем в этиловом спирте для удаления воды и, наконец, в неполярном гексане [16]. Финишную сушку проводили при температуре 23 ± 2 °С.

Раствор ПТМСП для формования диффузионного слоя композиционной мембраны получали растворением полимера с молекулярной массой $1,2 \cdot 10^6$ в гексане. Концентрация ПТМСП $0,5 \div 0,7$ % масс. Выбор растворителя определен с учетом нерастворимости в нем полисульфона, что обеспечивает сохранение размеров и конфигурации внутренних пор половолоконной подложки. Формование композиционной мембраны осуществляли с применением напорного способа введения формовочного раствора внутрь полого волокна. Полое волокно длиной 20 см закрепляли вертикально, и во внутреннюю полость шприцом вводили формовочный раствор. После заполнения внутреннего объема раствором (появление сплошной струи на выходе) концы волокна герметизировали с помощью специальных зажимов и экспонировали волокно при комнатной температуре в течение фиксированного времени. После чего сливали остатки раствора, внутреннюю полость волокна продували воздухом и сушили до постоянной массы при температуре 23 ± 2 °С. Результаты влияния концентрации формовочного раствора и времени экспозиции на газопроницаемость (CO_2 и N_2) приведены в табл. 2. Измерение газопроницаемости: проводили при комнатной температуре на приборе, в основе работы которого лежит манометрический метод измерения расхода газа прошедшего через испытываемую мембрану. Этот метод основан на измерении времени T нарастания давления газа в предварительно откачанном калиброванном объеме V на величину $\Delta P = P_2 - P_1$. При рабочей площади мембраны S , перепаде давления на мембране P проницаемость мембраны определяется выражением:

$$P/l = \frac{V \cdot \Delta p}{S \cdot t \cdot p_{\text{вх}}}. \quad (1)$$

При проведении измерения соблюдается условие: $\Delta p \ll p_{\text{вх}}$.

Обсуждение результатов

Половолоконная ультрафильтрационная мембрана (капиллярная подложка).

Из данных табл. 1 следует, что наименьшей гидравлической проницаемостью характеризуются волокна, полученные из поливочного раствора с содержанием полимера 23%.

Однако, здесь нужно отметить, что более универсальное значение для качества полого волокна имеет соотношение компонентов прядильного раствора. С увеличением значений $C_{\text{ПС}}/C_{\text{ПЭГ}}$ наблюдается тенденция увеличения производительности по воде, а оптимальным является значение 24/25. Увеличение температуры внутреннего осадителя с 60°C до 80°C, как правило, приводит к увеличению гидравлической проницаемости волокон, а увеличение расстояния от фильеры до зеркала наружной осадительной ванны с 60 см до 80 см приводит к ее закономерному снижению. Увеличение давления внутреннего осадителя в процессе формирования, при прочих равных условиях, приводит к повышению гидравлической проницаемости волокон, поскольку внутренняя осадительная ванна глубже проникает в стенки волокна и количество пор растет. Изменение давления полимера с 1,5 атм. до 2,0 атм. оказывает не такое однозначное влияние на гидравлическую проницаемость волокон: в зависимости от режима формирования ее значение может как увеличиваться, так и уменьшаться. Геометрические характеристики волокон зависят от параметров режима формирования незначительно: диаметр внутреннего отверстия волокна изменялся от ~1 мм до ~1,1 мм, а толщина стенки – от 230 мкм до 280 мкм. Наличие на внутренней поверхности полволоконной мембраны пор, размер которых на два с лишним порядка меньше, чем у наружных, свидетельствует об асимметричной структуре стенок капилляров.

Таблица 1

Гидравлическая проницаемость полых волокон, полученных из растворов с различной концентрации полисульфона

Режим формирования			Состав прядильного раствора, ПС/ПЭГ (%) масс.			
$P_{\text{пол}}$	$P_{\text{ос}}$	H, см	23/25	24/25	25/25	26/25
Проницаемость по воде л/(м²·ч)						
Температура внутреннего осадителя 80°C						
1,5	0,35	60	240	530	420	500
1,5	0,35	80	210	450	340	415
1,5	0,5	60	350	750	590	450
1,5	0,5	80	330	650	400	550
2,0	0,35	60	185	650	630	380
2,0	0,35	80	180	540	510	390
2,0	0,5	60	260	720	700	540
2,0	0,5	80	270	750	520	450
Проницаемость по воде л/(м²·ч⁻¹)						
Температура внутреннего осадителя 60°C						
1,5	0,35	60	220	360	480	420
1,5	0,35	80	200	400	260	400
1,5	0,5	60	330	480	580	450
1,5	0,5	80	311	580	470	520
2,0	0,35	60	175	270	350	480
2,0	0,35	80	170	320	530	410
2,0	0,5	60	250	420	560	660
2,0	0,5	80	260	470	550	420

Композиционные полволоконные мембраны с диффузионным слоем из ПТМСП.

Данные по результатам изучения влияния условий формирования композиционных мембран (КМ) на основе ультрафильтрационных капиллярных мембран из ПС и ПТМСП приведены табл. 2 и 3.

Таблица 2

Газопроницаемость КМ – 1

Мембрана	Исходная мембрана ПС-100	1 слой: 0,5% масс. ПТМСП в гексане, экспозиция 1 мин.	2 слой: 0,5% масс. ПТМСП в гексане, экспозиция 15 мин.
$P/(N_2), \text{м(н.у.)}^3 \cdot$ $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})^{-1}$	27,46	3,28	0,59
$P/(CO_2), \text{м(н.у.)}^3 \cdot$ $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})^{-1}$	23,12	3,46	1,23
$\alpha(CO_2/N_2)$	0,84	1,05	2,08

Данные табл. 2 свидетельствуют, что течение газов отвечает кнудсеновской модели диффузии газов, согласно которой $D_i/D_j = (M_j/M_i)^{0,5}$. Расчетное значение этого соотношения составляет 0,79, что согласуется с экспериментальными данными табл. 2. Уже первое нанесение слоя ПТМСП резко снижает газопроницаемость КМ – 1, а кнудсеновская диффузия практически переходит в перенос газов по модели растворение – диффузия, что еще более наглядно после второго нанесения полимера. Аналогичную картину представляют данные табл. 3. Видно, что увеличение концентрации ПТМСП практически не сказывается на газопроницаемости первого слоя, а нанесение третьего слоя уже реализует газоразделительные свойства ПТМСП.

Таблица 3

Газопроницаемость КМ – 2

Мембрана	Исходная мембрана ПС-100	1 слой: 0,7% масс. ПТМСП в гексане, экспозиция 1 мин.	2 слой: 0,7% масс. ПТМСП в гексане, 2 нанесения, экспозиция по 15 мин.
$P/(N_2), \text{м(н.у.)}^3 \cdot$ $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})^{-1}$	26,90	2,98	0,07
$P/(CO_2), \text{м(н.у.)}^3 \cdot$ $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})^{-1}$	23,94	3,28	0,26
$\alpha(CO_2/N_2)$	0,89	1,10	3,5

Таким образом, созданная система представляет собой полволоконную ультрафильтрационную мембрану на внутреннюю поверхность которой нанесен слой нанопористой полимерной пленки из ПТМСП. Ввиду сравнительно небольшого количества газа и его полной растворимости в жидкости, последнюю можно считать несжимаемой. Для описания течения насыщенной газом вязкой несжимаемой жидкости в каждом отдельном полке волокна можно использовать уравнения медленного течения Стокса. Профиль скорости жидкости определяется независимо из решения краевой задачи внутри цилиндрического капилляра для системы уравнений Стокса и несжимаемости при задании граничных условий проскальзывания на внутренней поверхности цилиндра. После этого определяется подходящий тангенциальный поток газа вблизи стенки нанопористой мембраны, который является чисто конвективным в направлении течения жидкости. По длине волокна имеется постоянный градиент давления. Давление вне волокна постоянно по его длине и несколько меньше, чем давление на выходе из волокна. Система находится при повышенной температуре (до 100 °С). Первый слой (нанопористая мембрана) контактирует с жидкостью (абсорбентом на основе алканоламина, например, МЕА) с растворенным в ней газом и пропускает газ и пары жидкости, но

гидродинамическая проницаемость жидкости (проницаемость в виде жидкой фазы) отсутствует. Второй пористый слой полого волокна (УФ мембрана) служит подложкой для тонкого нанопористого слоя и тоже принимает участие в массопереносе. Таким образом, полое волокно представляет собой бислойную мембрану и поток десорбированного из несущей жидкости газа описывается уравнениями конвективной диффузии при повышенной температуре – при этом общее сопротивление системы потоку газа определяется как сумма сопротивлений этих двух слоев, для каждого из которых конвективная скорость газа пропорциональна приложенному перепаду давления на нем. Десорбированный газ отводится из системы самооттеком, или сдувается потоком того же газа, который направлен в сторону, противоположную направлению течения жидкости (в этом случае имеется градиент давления в сдуваемом потоке). Отсюда следует, что на основании уравнений Стокса, Нернста-Планка и Дарси может быть разработана математическая модель мембранной десорбции газа (регенерации жидкого абсорбента), записаны системы определяющих уравнений и граничных условий, составлена разностная схема для вычислительных экспериментов.

Выводы

Разработаны методы формирования асимметричных полуволоконных ультрафильтрационных мембран из полисульфона, изучены факторы, влияющие на их транспортные характеристики. Показано, что мембраны подобной структуры могут быть применены в качестве подложек для формирования композиционных мембран с диффузионным слоем из поли[1-(триметилсилил)-1-пропин]а. Изучены параметры формирования композиционных мембран (концентрация формовочного раствора, время экспозиции нанесенного слоя и количество слоев для получения композиционных мембран, реализующей газоразделительные свойства ПТМСП. Определены факторы, необходимые для написания модели процесса десорбции диоксида углерода из его растворов в водном моноэтанолаmine.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-90010-Бел-а

Библиографический список

1. Yang H., Xu Z., Fan M., Gupta R., Slimane R.B., Bland A.E., Wright I. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. *Journal of Environmental Sciences* **20** (2008), 14-27.
2. Figueroa J.D., Fout T., Plasynski S., McIlvried H., Srivastava R.D. Advances in CO₂ capture technology – The U.S. Department of energy's carbon sequestration program. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **2** (2008), 9-20.
3. Jassim M.S., Rochelle G.T. Innovative absorber/stripper configuration for CO₂ capture by aqueous monoethanolamine. *Industrial and Engineering Chemistry Research* **45** (2006), 2465-2472.
4. Klaassen R., Feron P.H.M., Jansen A.E. Membrane contactor applications. *Desalination* **224** (2008), 81-87.
5. Qi Z., Cussler E.L. Microporous hollow fibers for gas absorption. Part 1: mass transfer in the liquid. *Journal of Membrane Science* **23** (1985), 321-332.
6. Qi Z., Cussler E.L. Microporous hollow fibers for gas absorption. Part 2: mass transfer across the membrane. *Journal of Membrane Science* **23** (1985), 333-345.
7. deMontigny D., Tontiwachwuthikul P., Chakma A. Comparing the absorption performance of packed columns and membrane contactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research* **44** (2005), 5726-5732.
8. Masuda T., Isobe E., Higashimura T., Takada K. *Journal of American Chemical Society*. 1983; 105/7473.
9. Khotimsky V. S., Tchirkova V., Litvinova G., Rebrov I., Bondarenko N. Poly[1-(trimethylgermyl)-1-propyne] and Poly[1-(trimethylsilyl)-1-propyne] with Various Geometries: Their Synthesis and Properties. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 41, 2133–2155 (2003).

11. P.H.M. Feron, V. Volkov, V. Khotimsky, V. Teplyakov. Membrane gas separation. US Patent 7591878. Sep. 22. 2009.
12. Dibrov G., Novitskii E., Vasilevskii V., Bazhenov S., Volkov V. High-flux composite PTMSP membranes with long-term stable characteristics at elevated temperatures and pressures. Abstracts, Euromembranes, Sep. 2012.
13. Claesa S., Vandezande P., Mullens S., Leysen R., K. De Sitter, A. Andersson, F.H.J. Maurer, H. Van den Rul, R. Peetersd, M.K. Van Bael. High flux composite PTMSP-silica nanohybrid membranes for the pervaporation of ethanol/water mixtures. Journal of Membrane Science 351 (2010) 160–16.
14. Lora G. Toy. Natural gas treatment process using PTMSP membrane. US Patent № 5501722, 03.26.1996.
15. Трусов А.Н. Регенерация абсорбентов углекислого газа в мембранных контакторах высокого давления. Дисс. 2010, Москва.
16. W. MacDonald, C.-Y. Pan, Method for drying water-wet membranes / U.S. Patent 3842515, 1974.
17. Pinnau and B. D. Freeman, Formation and Modification of Polymeric Membranes Overview, In Membrane Formation and Modification // ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 1999.
18. Baker R.W. Membrane Technology and Applications // Wiley, Chichester, 2004.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2012*

**V.V. Volkov¹, A.V. Bildukevich², A.N. Filippov³, I.V. Vorotyntsev⁴, G.A. Dibrov¹,
V.V. Usoskiy², V.P. Kasperchik², V.P. Vasilevsky¹, E.G. Novitsky¹**

COMPOSITE HOLLOW FIBER MEMBRANES WITH DIFFUSION LAYERS FROM POLY[1-(TRIMETHYLSYLIL)1-PROPYLENE]

A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS, Russia¹,
Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences, Belarus²,
I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia³,
Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev, Russia⁴

The application of membrane gas-liquid contactor is one of the important ways in regeneration technology of absorbents saturated with carbon dioxide. The main element which determines the effectiveness of these devices is the membrane, hollow fiber, in the first place, as they allow to create the most advanced devices with a high surface area ($\geq 10\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ of the apparatus). In this work the results of the creation of hollow-fiber composite membranes are described. Asymmetric polysulfone ultrafiltration membranes were used as support, poly[1-(trimethylsilyl)1-propylene] as a diffusion layer.

Key words: carbon dioxide, membrane contactor-desorber, polymer membranes, asymmetric and composite membranes.

УДК 544.431.5+546.281

А.В. Воротынцев, А.В. Кодомцева

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТОГО МЕТИЛСИЛАНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТИЛТРИХЛОРСИЛАНА С ГИДРИДОМ БАРИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Разработка методики получения метилсилана по реакции гидрирования метилтрихлорсилана гидридом бария и снятие основных кинетических зависимостей.

Методология: В работе применены оригинальные методики получения и очистки гидрида бария, а также разработана методика анализа исходных веществ и продуктов реакции хромато-масс спектрометрическим методом с применением вакуумной системной системы напуска.

Результаты и область их применения: Одним из актуальных направлений Si-Ge технологий является разработка методик синтеза и получения высокочистых исходных веществ для легирования Si-Ge структур углеродом. Одним из самых распространенных веществ является метилсилан. На сегодняшний день реакция гидрирования метилтрихлорсилана является достаточно энергозатратной, поэтому актуальной является разработка менее энергозатратных методик получения метилсилана. Для решения поставленной задачи было проведено изучение взаимодействия метилтрихлорсилана с гидридом бария и получены результаты, свидетельствующие о том, что разработанный метод является одним из наиболее эффективных.

Выводы: В результате проведенных исследований было показано, что гидрид бария по сравнению с гидридом кальция является более эффективным восстановителем в процессе гидрирования метилтрихлорсилана и позволяет снизить температуру реакции в три раза.

Ключевые слова: метилтрихлорсилан, метилсилан, гидрида бария, гидрирование, водород, хромато-масс спектрометрия.

В последнее время достаточно широкое применение нашли приборы на основе Si-Ge структур, вследствие того, что транзисторы на основе этих соединений характеризуются более высоким быстродействием. Действительно SiGe-технология обеспечивает 200–300% увеличение быстродействия транзисторов при минимальном росте их себестоимости. Также на основе Si-Ge структур ведутся разработки ИС, работающих в диапазоне сверхвысоких частот, а также приборов для опто- и наноэлектроники.

Для улучшения характеристик Si-Ge структур применяется легирование углеродом по CVD-технологии. В качестве исходного компонента наиболее перспективным и более удобным является метилсилан. Метилсилан используется для стабилизации электрофизических и оптических свойств SiGe наноструктур, позволяющих еще больше миниатюризировать полупроводниковые системы за счет очень высокой интеграционной плотности и создавать однокристалльные решения для системы («системы на кристалле») в широком (до 110 ГГц) частотном диапазоне [1]. Таким образом, продукты гидрирования хлорсиланов и органохлорсиланов, а именно метилсилан, трихлорсилан, дихлорсилан и моносилан, находят применение не только в технологиях получения наноструктур SiGe, но и полупроводникового кремния для солнечной энергетики.

Особенно нужно отметить то, что в электронике и особенно наноэлектронике, к веществам предъявляются особые требования по чистоте, поэтому необходимо разработать технологию получения метилсилана высокой чистоты с уровнем содержания основного вещества не менее 99,98 %.

Представляется перспективной технология получения покрытий из SiC методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) [2], где в качестве исходного реагента применяется метилсилан [3, 4].

В работе [5] была выявлена важная особенность метилсилана. В отличие от других углеродсодержащих соединений, метилсилан обладает повышенной хемосорбцией на поверхности кремния. При этом молекула метилсилана ориентируется на поверхности Si таким образом, что атом углерода и кремния образует химическую связь с атомами поверхности подложки в местах механических напряжений и дислокаций структуры обеспечивает стабилизацию структуры.

Такая способность метилсилана позволяет повысить эффективность процесса осаждения углерода на поверхности кремния и сделать этот процесс более экологически безопасным. При этом не используется разбавление метилсилана водородом или инертными газами, что в свою очередь приводит к снижению себестоимости получаемой продукции.

Таким образом, применение относительно дешевых SiGe:C структур позволяет достичь в простых полупроводниках таких квантовых свойств, которые на данный момент были достигнуты лишь для сложных полупроводниковых структур. Однако широкому развитию этого перспективного направления препятствует отсутствие высокочистых исходных материалов (метилсилан) для CVD-технологии. В связи с этим в работе предлагается разработать новый метод получения метилсилана путем взаимодействия метилтрихлорсилана с гидридом бария. Важным аспектом является тот факт, что барий и его соли, как примесь, не являются электронноактивными примесями в кремнии и германии, что в свою очередь позволит получать достаточно чистый продукт соответствующий требованиям SEMI-стандарта.

Известны различные способы получения метилсилана, например, по реакции диспропорционирования метилдиэтоксисилана в присутствии катализатора, по реакции замещения галогена в монохлорсилане на метильный радикал с использованием литий- и цинкорганических соединений, в также путем восстановления метилхлорсиланов аланатом или гидридом лития в среде органического растворителя [6, 7].

Однако перечисленные методы синтеза, кроме последнего, предусматривают использование исходных веществ, которые промышленно не производятся. В связи с этим нашел широкое применение лишь третий метод синтеза, в котором используется пожаро- и взрывоопасный эфирный раствор аланата или гидрида лития, что снижает технологическую безопасность процесса. Кроме того, используются органические растворители, которые существенно загрязняют целевой продукт трудноудаляемыми примесями. В результате чистота продукта составляет лишь 92 %.

Поэтому интерес представляет разработка метода синтеза метилсилана без использования пожаро- и взрывоопасных веществ, а также органических растворителей. С этой точки зрения наиболее привлекательно восстановление галогенидов кремния гидридом бария до гидридов кремния [8]. Однако сведения об использовании гидрида бария для восстановления метилтрихлорсилана до метилсилана в литературе отсутствуют.

Эксперимент

Методика получения гидрида бария

В работе [9] была описана кинетика гидрирования метилтрихлорсилана гидридом кальция. Полученные результаты свидетельствуют о том что количественного выхода продукта можно добиться лишь при проведении реакции при температурах свыше 1000 °С. Исходя из этого был сделан вывод о применении более высокоактивных восстановителей, а именно гидрида бария, с целью уменьшения температуры процесса.

На первой стадии работы был проведен синтез гидрида бария по разработанной методике.

Использовали барий металлический марки "Ч" в слитках. После перегонки бария в вакууме под аргоном металл с блестящей поверхностью вносили в осушенный и очищенный

от примесей органический растворитель – гексан, марки “ОСЧ”. Далее в трубку из нержавеющей стали, вносили лодочку с металлом под слоем гексана для уменьшения корродирующего эффекта. Далее трубку с лодочкой помещали в стеклянный реактор с двумя температурными зонами и увеличивали температуру в реакторе до 100 °С, до тех пор пока весь гексан не испарился, состав ПГС выходящей из реактора анализировали на хромато-масс спектрометре Shimadzu QP-2010Plus на неполярной колонке Rtx - 1ms. После процедуры осушки реактора в него напускали тщательно очищенный сухой водород, полученный электролизом. Температуру повышали до 800 °С и до 240 °С в первой и второй зонах реактора соответственно. Таким образом после расплавления металл испарялся в первой части реактора и выпадал в виде гидрида бария во второй. Продукт представлял собой игольчатые бесцветные кристаллы. В условиях полного исключения доступа воздуха и влаги гидрид применяли в дальнейшем на стадии гидрирования метилтрихлорсилана.

Гидрирование метилтрихлорсилана гидридом бария

Реакцию гидрирования метилтрихлорсилана проводили в реакторе проточного типа с газовой системой напуска в качестве газа носителя использовался гелий марки 6.0, для чего была разработана экспериментальная лабораторная установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.

Лабораторная установка (рис. 4) состояла из реактора гетерогенного гидрирования, представляющего собой реактор фильтрующего слоя (1) обогреваемого электропечью (2), испарителя метилтрихлорсилана (6), питателя метилтрихлорсилана (8), емкости с метилтрихлорсиланом (7), системы дозирования газов (ротаметров (14-16), вентилях (19-24), баллонов с водородом (18) и аргоном (17)), конденсационной системы (конденсатор (9), охлаждаемой водой и конденсатор (10), охлаждаемый смесью спиртов и жидкого азота), хромато-масс спектрометра (25), огнепреградителя (27) и сборника конденсата (26). Реактор гетерогенного гидрирования (1) имел следующие основные размеры : внутренний диаметр цилиндрической части - 0,03 м, высота цилиндрической части - 0,4 м. Загружаемый в реактор измельченный гидрид бария (4) (массой 0,05-0,07 кг и крупностью фракций от 100 - 200 до 800 - 1000 мкм). Температура в реакционной зоне реактора определяется с помощью термопары, которая помещается в термопарный чехол (5). Термопара располагается соответственно посередине высоты цилиндрической части в непосредственном контакте с реактором для получения более достоверных результатов значения температуры. Давление определяется манометрами (11-13). Перед проведением эксперимента в течение двух часов всю систему продували аргоном из баллона (17) с расходом 20-30 нл/ч, открыв вентили (20, 24), затем загружали в реактор гидрид бария, в виде взвеси гидрида в растворе осушенного петролейного эфира и сушили его в токе аргона при температуре 200 - 250 °С еще 2 часа. Расход аргона определяется по ротаметру V (15). После окончания основной предварительной продувки установки и сушки гидрида бария от паров органического растворителя нагрузку на электропечь реактора (2) уменьшали и охлаждали реактор до температуры 100 – 150 °С, при этом поддерживая подачу аргона с расходом 3 - 5 нл/ч на продувку установки. На этом подготовительные работы к проведению эксперимента заканчивались.

Материалы для изготовления данной установки были подобраны с учетом наименьших затрат и наибольшей коррозионной стойкостью к органохлорсиланам, используемым и получающимся в ходе процесса. Исходя из приведенных ранее данных был сделан вывод, что в конструкции установки следует использовать соединительные линии, емкости (7, 14) и реактор изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, а также вакуумно-плотные вентили с фторопластовыми уплотнениями, а в местах соединения линий с кранами следует использовать фторопластовые или никелевые прокладки (в зависимости от температуры).

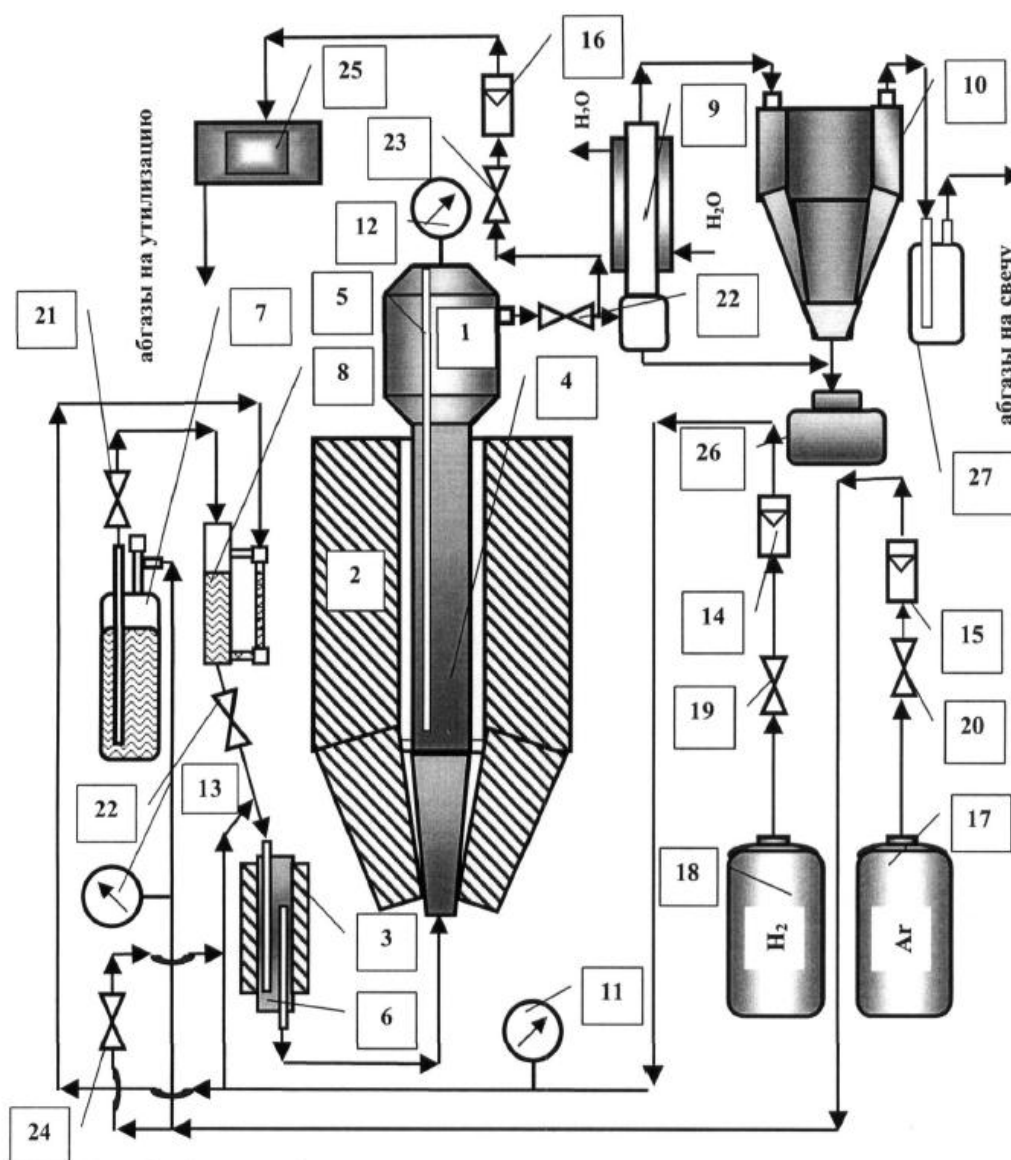


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки гидрирования метилтрихлорсилана:

1 - реактор гетерогенного гидрирования; 2, 3 – электроды; 4 - измельченный кристаллический кремний с медным катализатором; 5 - термопарный чехол; 6 - испаритель ТК; 7 - емкость с ТК; 8 - питатель ТК; 9, 10 – конденсаторы; 11-13 - манометры, 14 - 16 – ротаметры; 17 - баллон с аргоном; 18 - баллон с водородом; 19-24 – вентили; 25 – хроматограф; 26 - сборник конденсата; 27 - огнепреградитель

Обсуждение результатов

По результатам хромато-масс спектрометрического анализа газа, выходящего из реактора при времени контакта 15 с, была экспериментально определена зависимость концентрации МТХС в ПГС от температуры реактора при различных начальных концентрациях МТХС.

На основе полученных данных была получена зависимость скорости реакции от концентрации, которая описывается уравнением:

$$\ln V = (0,034 \pm 0,003) \cdot \ln C_{\text{чхк}} - (2,671 \pm 0,002), \quad (1)$$

где V – скорость химической реакции; $C_{\text{чхк}}$ – текущая концентрация тетраоксида кремния.

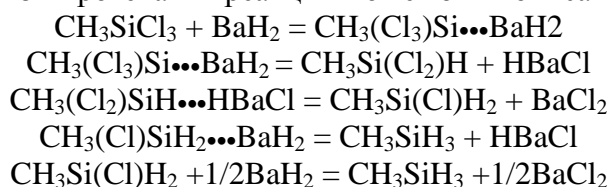
По тангенсу угла наклона был найден порядок реакции, который оказался близким к нулю, это означает что адсорбция реагирующих веществ на катализаторе велика, поэтому

скорость реакции практически не зависит от концентрации реагентов в паре. При этом скорость диффузионного поступления реагирующего компонента к активному центру гидрида бария существенно больше скорости реакции освобождения активного центра после протекания химического взаимодействия.

Полученные экспериментальные данные позволили получить зависимость константы скорости от температуры. В аррениусовских координатах зависимость имеет линейный характер. В результате обработки полученных данных методом наименьших квадратов было получено уравнение для определения константы скорости реакции в зависимости от температуры:

$$\ln k = (2,954 \pm 0,004) - (0,351 \pm 0,002) \cdot 10^3/T. \quad (2)$$

По тангенсу угла наклона прямой полученной п), была получена кажущаяся энергия активации процесса, которая составила 2,9 кДж/моль. Столь малое значение энергии активации вероятнее всего объясняется влиянием гидрида бария. В работе [10] были рассчитаны энергии активации для реакций дегалогенирования хлорсиланов атомарным хлором. Расчетное значение энергии активации составило 3,2 кДж/моль. Таким образом, вероятно, что одной из основных реакций протекающих на поверхности гидрида, является перенос атома хлора от молекулы метилтрихлорсилана к молекуле гидрида бария с образованием хлорида бария. Вероятный механизм протекания реакции может быть описан следующим образом.



На первой стадии реакции протекает образование активированного комплекса гидрида бария с метилтрихлорсиланом между атомами кремния и бария, далее происходит поэтапное замещение атомов хлора в метилтрихлорсилане на атомы водорода с образованием хлорида бария и метилсилана.

Важным аспектом является, то что реакция протекает с выходом до 90 % уже при температуре 350 °С, что свидетельствует о высокой активности гидрида бария в реакции гидрирования метилтрихлорсилана.

Выводы

В результате проведенных исследований было показано, что гидрид бария по сравнению с гидридом кальция является более эффективным восстановителем в процессе гидрирования метилтрихлорсилана. Также были сняты основные кинетические параметры процесса, по которым был определен порядок реакции. Он оказался близким к нулю, а энергия активации процесса составила 2,9 кДж/моль.

Представляет интерес изучение других гидрирующих агентов, в частности дигидриданиогидрида бария, введение которого в систему, по предварительным расчетам, может снизить температуру процесса гидрирования до 0–5°С.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. Государственный контракт № 14.132.21.1459 от 20.09.2012 г.

Библиографический список

1. **Marquez, O.** Как выглядят «искусственные атомы»/ O. Marquez, L. Geelhaar and K. Jacobi // Journal Apply Physical Letter. 2001. Т. 78. С. 2309–2310.
2. **Сыркин, В.Г.** CVD-метод. Химическая парофазная металлизация / В.Г. Сыркин. – М.: Наука, 2000. – 496 с.

3. **Lee, Moon-Sook.** Bonding and Thermal Reactivity in Thin a-SiC:H Films Grown by Methylsilane CVD/ Moon-Sook Lee // Journal Physical Chemistry. 1997. Т. 101. С. 9195–9205.
4. Пат. 5620934 США, МКИ С 04В 35/571. Получение карбида кремния из кремнийорганических соединений/ Masayola Itoh. Toats Chemicals Inc. - № 413169; заявл. 29.03.95; опубл. 15.04.97; Бюл. № 62.
5. **Tillak, B.** High-Performance, Low-Cost SiGe:C BiCMOS Technology/SiGe/SOI/Strained Si: From Growth to Device Properties/ B. Tillak, D. Knoll, B. Heineman // SEMI Technology Symposium Session, Munich. – 2001. – P. 5.
6. Стороженко, П.А., Шутова, О.Г., Кузнецова, В.Н. Способ получения метилсилана. Пат. 2177946 НА, МПК 7 С07F7/08; ФГУП ГИХТЭОС. № 2000131577/04. Заявл. 18.12.00. Опубл. 10.01.02/RU.
7. **Андрианов, К.А.** Методы элементоорганической химии / К.А. Андрианов, А.Н. Несмеянов, К.А. Кошечков // Кремний. М.: Наука. 1968. – 699 с.
8. Фадеев, Л.Л., Кварацхели, Ю.К., Жирков, М.С. Способ получения моносилана. Пат. 95106886 РФ, МПК С01В33/04. Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии. № 95106886/25. Заявл. 1995.04.28. Опубл. 1997.04.27/RU.
9. **Воротынцев, В.М.** Кинетика гидрирования метилтрихлорсилана гидридом кальция / В.М. Воротынцев, Г.М. Мочалов, С.С. Суворов, И.В. Баранова // Журнал физической химии. – 2009. Т. 83. № 7. С. 1228–1231.
10. **Воротынынцев, А.В.** Квантово-химическое моделирование реакции гидрирования тетрахло-рида кремния / А.В. Воротынынцев, С.В. Зеленцов, В.М. Воротынцев // Известия Академии наук. Серия химическая. 2011. № 8. С. 1507–1512.

*Дата поступления
в редакцию 12.11.2012*

A.V. Vorotyntsev, A.V. Kadomtceva

OBTAINING HIGH PURITY METHYLSILANE INTERACTION METHYLTRICHLOROSILANE WITH BARIUM HYDRIDE

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Obtaining high purity methylsilane interaction methyltrichlorosilane with barium hydride and removal basic kinetic dependencies.

Design/methodology/approach: In the original method used for production and purification of barium hydride, and developed a method of analysis of the raw materials and reaction products in chromato-mass spectrometry using a vacuum inject system.

Findings: The hydrogenation reaction is quite energy intensive methyltrichlorosilane, so urgent is the development of less energy-intensive methods to obtaining methylsilane. To solve the problem obtaining high purity methylsilane interaction methyltrichlorosilane with barium hydride is the one of the most effective method nowadays.

Research limitations/implications: One of the important directions of Si-Ge technology is development methods of synthesis and the production of high raw material for doping Si-Ge structures of carbon. One of the most common substances is methylsilane.

Originality/value: The studies showed that the barium hydride compared with calcium hydride is more effective in reducing hydrogenation methyltrichlorosilane and reduces the reaction temperature by 3 times.

Key words: methyltrichlorosilane, methylsilane, barium hydride, hydrogenation, hydrogen, chromato-mass spectrometry.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338

Д.А. Корнилов

ЭФФЕКТИВНОЕ СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕСОМ С УЧЕТОМ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ БИЗНЕСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Разработать методику оценки влияния уже принятых стратегических решений на стоимость бизнеса.

Методология: Методология временной ценности денег, портфельный анализ, стратегический анализ, подходы и методы к оценке стоимости бизнеса.

Результаты и область их применения: В данной статье будет рассмотрен экспресс метод для оценки бизнеса по минимальному набору общедоступных данных. Отличительными особенностями предлагаемого метода является простота и малая трудоемкость. Результатом исследования является разработка методики экспресс оценки стоимости бизнеса.

Выводы: На основании разработанной методики проведена экспресс оценка стоимости ОАО «Газпром» в динамике с 2008 года. Разработанная методика экспресс оценки бизнеса позволяет по ограниченному набору данных в кратчайшие сроки принимать решение о целесообразности вложения в бизнес инвестиций, а также позволяет формировать оптимальный портфель бизнесов.

Ключевые слова: анализ; оценка бизнеса; экспресс оценка; стратегический анализ; стоимость бизнеса; значимость показателей

Рост стоимости компании характеризует эффективность управления и правильность выбранной стратегии. Основой для выбора стратегии и частью стратегического управления является стратегический анализ.

Рассмотрим понятие «стратегический анализ». В энциклопедии «Википедия» дано следующее определение стратегического анализа (СА). СА («портфельный анализ») — является основным элементом стратегического планирования. СА выступает в качестве инструмента стратегического управления, с помощью которого руководство предприятия выявляет и оценивает свою деятельность с целью вложения средств в наиболее прибыльные и перспективные ее направления. Основным методом портфельного анализа является построение двухмерных матриц. С помощью таких матриц происходит сравнение производств, подразделений, процессов, продуктов по соответствующим критериям (<http://ru.wikipedia.org>).

Обычно предполагается, что СА должен дать реальную оценку собственных ресурсов и возможностей, применительно к состоянию (и потребностям) внешней среды, в которой работает компания. Поэтому основным инструментом регулярного стратегического управления выбирают матрицу «качественного» стратегического анализа (SWOT) [1]. Ряд авторов предлагает новые методы, например, методы применения причинно-следственной модели распределения затрат Activity-Based Cost System (ABC) для принятия обоснованных стратегических управленческих решений [2]. Но в литературе практически не приводится способов оценки эффективности проведенного SWOT-анализа и выбранной стратегии. Выбирается стратегия для компании и на этом все?! А как оценить ее эффективность?

В данной статье предлагается упрощенный способ для экспресс анализа эффективности бизнеса и выбранной стратегии, а также возможности развития теории формирования эффективных портфелей инвестиций на основе экспресс оценки стоимости бизнеса.

Оценивать бизнес можно различными подходами и методами, каждый из которых может привести к различным результатам. Поэтому оценки тех, кто покупает, могут существенно отличаться от оценок тех, кто продает. Оценочная деятельность – сложный процесс, требующий учета большого числа факторов. В данной статье будет рассмотрен экспресс метод для оценки бизнеса по минимальному набору общедоступных данных. Отличительными особенностями предлагаемого метода является простота и малая трудоемкость. Например, задача оценки бизнеса по ограниченному набору данных в кратчайшие сроки может возникнуть на первом этапе знакомства с ним и при принятии решения о целесообразности вложения в бизнес инвестиций.

При оценке бизнеса будут учитываться только финансовые показатели деятельности предприятия, отраженные в его официальной отчетности. Поэтому полученные результаты не могут быть окончательными и полными, а выступают информацией к размышлению и являются базой для принятия предварительного решения или решения о целесообразности дальнейшего более глубокого и детального изучения интересующего бизнеса [3].

В оценочной практике бизнеса (стоимости предприятия) применяются три подхода:

1) доходный подход:

- а) метод дисконтированного денежного потока;
- б) метод прямой капитализации;

2) затратный подход:

- а) метод чистых активов = рыночная стоимость активов – рыночная стоимость обязательств;
- б) метод ликвидационной стоимости;

3) сравнительный подход:

- а) метод рынка капитала;
- б) метод сделок;
- в) метод отраслевых коэффициентов (соотношений).

Каждый метод предполагает определенную последовательность расчетов. Рассмотрим на примере метода дисконтирования денежных потоков процесс оценки бизнеса.

МЕТОД ДИСКОНТИРОВАННОГО ДЕНЕЖНОГО ПОТОКА (ДДП)

Метод ДДП применяется: при оценке сравнительно новых на рынке предприятий, при оценке капиталоемких предприятий, при слиянии и поглощении компаний и т. д.

По данным бухгалтерской отчетности, на основе оптимистического и пессимистического вариантов развития бизнеса составляются прогнозы: реализации, расходов, изменения собственных оборотных средств (СОС). Рассчитывается текущая стоимость будущих денежных потоков в прогнозный и постпрогнозный периоды, составляется итоговая таблица по оптимистическому и пессимистическому варианту. Для использования данного метода необходимо наличие большого количества данных, большая часть из которых является закрытой информацией, а другая часть представляет собой прогноз, сделанный с той или иной степенью достоверности.

При этом для оценки стоимости бизнеса обычно применяется определенный порядок расчетов и прогнозов:

1. Составляется прогноз реализации на n лет для оптимистического и пессимистического вариантов.

2. Определяется структура расходов на n лет для оптимистического и пессимистического вариантов. Прогнозируются расходы на сырье и материалы, расходы на оплату прямого труда, отчисления, общепроизводственные расходы, общехозяйственные расходы, расходы на рекламу и сбыт, амортизация, погашение основного долга с учетом процентов за кредит.

3. Прогнозируется изменение СОС для оптимистического и пессимистического вариантов. рассчитываются денежные средства и краткосрочные финансовые вложения, величина дебиторской задолженности, величина производственных запасов, задолженность по оплате

труда, прочая кредиторская задолженность.

4. Рассчитывается ставка дисконтирования.

5. Составляется Прогноз денежного потока составляется на период n лет для оптимистического и пессимистического вариантов.

6. Делается расчет стоимости бизнеса для оптимистического и пессимистического вариантов для прогнозного периода и постпрогнозного периодов.

7. Определяется итоговая стоимость 100% пакета акций методом дисконтирования будущих денежных потоков

При оценке бизнеса обычно применяется несколько методов, а затем результаты, полученные по этим методам, обобщаются с учетом весов.

При обобщении результатов и определении весомости каждого метода учитываются:

- плюсы и минусы методов;
- условия (ограничения), при которых методы могут быть применимы;
- допущения, связанные с характером расчетов;
- наличие и достоверность исходных данных;
- достоверность сделанных прогнозов и т.д.

При расчете стоимости бизнеса на основе предложенного метода экспресс оценки также применяются три подхода, но расчеты делаются на основе меньшего количества данных и с применением упрощенных расчетов.

Порядок расчетов следующий:

- 1) определение стоимости бизнеса доходным подходом;
- 2) определение стоимости бизнеса затратным (имущественным) подходом;
- 3) определение стоимости бизнеса сравнительным (рыночным) подходом;
- 4) сравнение стоимости компании полученной в п. 1-3. определение средневзвешенной стоимости компании на данный момент и в динамике;
- 5) определение способов увеличения стоимости компании.

1. Определение стоимости бизнеса доходным подходом

В доходном подходе два метода: метод дисконтирования денежных потоков (ДДП) и метод капитализации прибыли.

Для упрощенного варианта расчетов можно воспользоваться методом капитализации прибыли.

Воспользуемся данными из формы №2 по ОКУД «Отчет о прибылях и убытках» за последние 3 года и данными из приложения к бухгалтерскому балансу.

Таблица 1

Расчет капитализации доходов компании на основе показателей OIBDA, Чистая прибыль и Амортизация

Наименование показателя	Строка	20__	20__	20__	На последнюю отчетную дату 20__
1. Прибыль (убыток) от продаж	050 ф.№2				
2. Чистая прибыль (нераспределенная прибыль (непокрытый убыток))	190 ф.№2				
3. Амортизация	740 Прил. к ф.№1				
4. OIBDA* (1+3)					
5. ЧП + Амортизация (2+3)					
6. Ставка капитализации**		10%	10%	10%	10%
7. Капитализация по OIBDA (4:6)					
8. Капитализация по ЧП + Амортизация (5:6)					

* **OIBDA (Operating Income Before Depreciation And Amortization)** – аналитический показатель, означающий операционный доход до вычета износа основных средств и амортизации нематериальных активов.

** ставка капитализации рассчитывается как номинальная ставка на основе значения средневзвешенной стоимости капитала или принимается равной 10%.

OIBDA = Операционная прибыль + амортизация нематериальных активов + износ основных средств

Примечание: Показатель OIBDA следует отличать от EBITDA, так как отправной точкой показателя является операционная прибыль, а не чистая прибыль. Таким образом, OIBDA не включает в себя неоперационные доходы, которые, как правило, не повторяются из года в год. Он включает только доход, полученный за счёт регулярных операций, и не подвержен влиянию единовременных начислений, например, связанных с курсовыми разницеми или налоговыми скидками.

Показатель EBITDA рассчитывается следующим образом:

Чистая прибыль

+ **Расходы по налогу на прибыль**

- **Возмещённый налог на прибыль**

(+ **Чрезвычайные расходы**)

(- **Чрезвычайные доходы**)

+ **Проценты уплаченные**

- **Проценты полученные**

= **EBIT**

+ **Амортизационные отчисления по материальным и нематериальным активам**

- **Переоценка активов**

= **EBITDA**

По мнению критиков показатели «прибыль» и «операционный поток платежей» более реалистично отражают состояние дел в компании, EBITDA это искусственный, усложнённый показатель.

2. Определение стоимости бизнеса затратным (имущественным) подходом

Если предприятие не находится в стадии банкротства, то используется метод чистых активов. Рассчитаем стоимость чистых активов (ЧА) в динамике за 3 последних года.

Расчеты делаются по данным из бухгалтерского баланса компании (ф. №1).

Таблица 2

Расчет стоимости ЧА

Расчет ЧА на дату:	Код строки	01.01.20__	01.01.20__	01.01.20__	На последнюю отчетную дату 20__
1	2	3	4	5	6
Имущество*	АКТИВ				
Валюта БАЛАНСА	300				
- Собственные акции, выкупленные у акционеров	411				
Итого Актив (300 – 411)					
Долги	ПАС-СИБ				
Валюта БАЛАНСА	700				

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
- ИТОГО по разделу III Капитал и резервы	490				
- Доходы будущих периодов	640				
Итого Долги (700 – 490 – 640)					
Чистые активы = Итого Актив - Итого долги					

* В упрощенном варианте стоимость имущества компании принимается равной стоимости указанной в активе баланса, но для более точного значения ЧА рассчитывается рыночная стоимость имущества и долгов компании.

3. Определение стоимости бизнеса сравнительным (рыночным) подходом

Если акции компании котируются на фондовой бирже, то рассчитаем капитализацию акций компании в динамике за три последних года.

Таблица 3

Капитализация акций компании

Капитализация акций компании на дату:	01.01.20__	01.01.20__	01.01.20__	На последнюю отчетную дату 20__
1. Курс обыкновенных акций*				
2. Количество обыкновенных акций				
3. Капитализация обыкновенных акций (1*2)				
4. Курс привилегированных акций*				
5. Количество привилегированных акций				
6. Капитализация привилегированных акций (4*5)				
7. Капитализация акций (3+6)				
8. Капитализация акций +20% премия за контроль (7*120%)**				
9. Капитализация акций +40% премия за контроль (7*140%)**				

* Курс акций берется на конкретную дату или как минимальное / максимальное значение за период. Если при расчетах учтены минимальные и максимальные значения курса за период, то рассчитывается диапазон изменения капитализации акций за период.

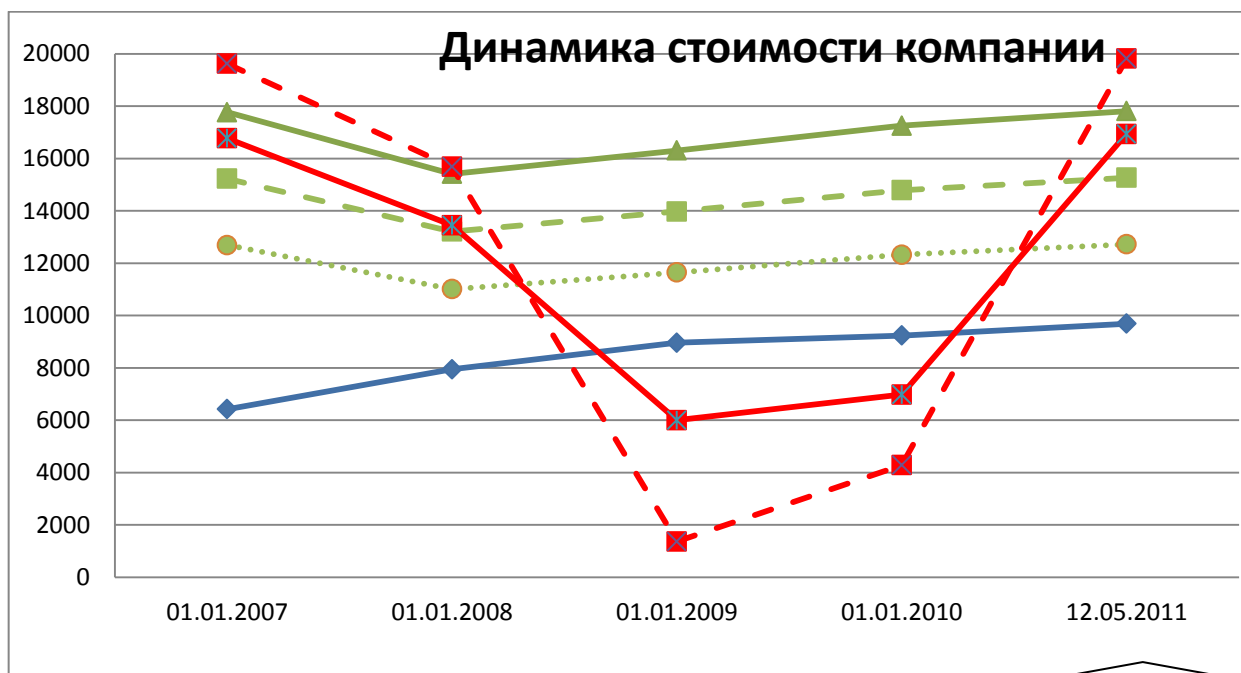
**Размер премии за контроль зависит от отрасли, характера собственников и прочего

Если акции компании не котируются или если оценивается ООО, то можно использовать один из трех методов сравнительного подхода: метод сделок, метод компании аналога, метод отраслевых коэффициентов (при наличии данных).

Если данных для этих методов нет, то данный подход не используется для оценки бизнеса при экспресс оценке.

4. Сравнение стоимости компании полученной в п. 1-3. Определение средневзвешенной стоимости компании на данный момент и в динамике

Построим график изменения стоимости компании за последние три года.



Стоимость на момент оценки

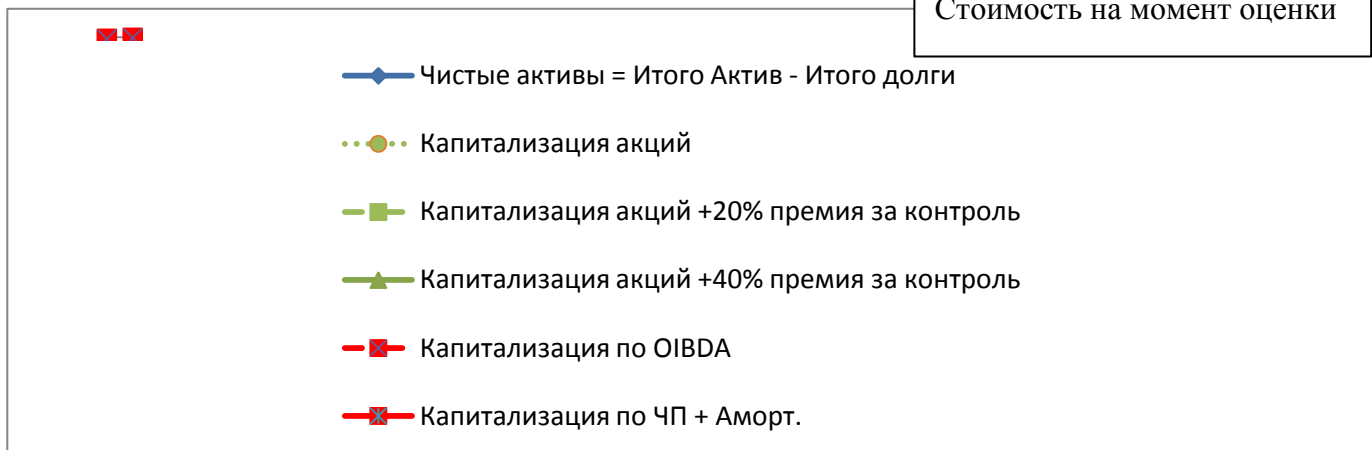


Таблица 4

Стоимость компании, полученная различными методами

Стоимость компании на дату:	01.01.20_	01.01.20_	01.01.20_	На последнюю отчетную дату 20_
1. Капитализация по OIBDA	-	-	-	
2. Капитализация по (ЧП + Амортизация)				
3. Чистые активы (ЧА)				
4. Капитализация акций				
5. Капитализация акций +20% премия за контроль				
6. Капитализация акций +40% премия за контроль				

Определим средневзвешенную стоимость компании в динамике и на данный момент.

Результаты использованных в кейсе подходов к оценке стоимости отличаются друг от друга. Для определения окончательной величины стоимости компании определяется

средневзвешенное значение. Для этого каждому из примененных подходов (методов) присваивается весовой коэффициент.

Пример расчета весовых коэффициентов и принципов расстановки рангов приведен ниже в табл. 5.

Таблица 5

Пример расчета весовых коэффициентов для различных методов оценки

Наименование метода		Характер бизнеса	Цель оценки	Размер пакета	Доступность и достоверность информации	Итог	Удельный вес, %
Дисконтированных денежных потоков	Уровень	Высокий	Высокий	Высокий	Средний		
	Ранг*	1	0	2	1	4	22,22
Чистых активов	Уровень	Высокий	средний	Высокий	Высокий		
	Ранг*	2	1	2	2	7	38,89
Рынка капитала	Уровень	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий		
	Ранг*	2	2	0	3	7	38,89

* Принцип расстановки рангов зависит от факторов указанных выше в статье.

Окончательная оценка стоимости предприятия (бизнеса) может быть определена по формуле:

$$\text{Стоимость компании} = \sum (Vi * Zi),$$

где Vi — оценка стоимости предприятия (бизнеса) рассчитанная i -м методом (все применимые методы оценки произвольно нумеруются); $i = 1, \dots, n$ — множество применимых в данном случае методов оценки; Zi — весовой коэффициент метода оценки с номер i .

Очевидно, что при этом разумное выставление коэффициентов Z является одним из главных свидетельств достаточной квалифицированности и непредвзятости оценщика бизнеса.

5. Определение способов увеличения стоимости компании

1. Пример экспресс оценки бизнеса по данным предприятия ОАО «Газпром»

Определение стоимости ОАО «Газпром» доходным подходом

Все необходимые данные взяты из формы №2 по ОКУД «Отчет о прибылях и убытках» с 2008 года и из приложения к бухгалтерскому балансу (тыс.руб). Сайт: www.gazprom.ru

Наименование показателя	Строка	2008	2009	2010	2011	за 1 полугодие 2012	прогноз за 2012
1. Прибыль (убыток) от продаж, тыс.руб	050 ф.№2	895626110	553268909	822357061	1188515429	547014680	1094029360
2. Чистая прибыль (нераспределенная прибыль (непокрытый убыток))	190 ф.№2	173021630	624613273	364577256	879601664	381591771	763183542
3. Амортизация	740 Прил. к ф.№1	284532862	295479702	345545551	359699217	-	359699217
4. OIBDA* (1+3)		1180158972	848748611	1167902612	1548214646	547014680	1453728577

5.ЧП + Амортизация (2+3)		457554492	920092975	710122807	1239300881	381591771	1122882759
6.Ставка капитализации**		10%	10%	10%	10%	10%	10%
7.Капитализация по OIBDA (4:6)		11801589720	8487486110	11679026120	15482146460	5470146800	14537285770
8.Капитализация по ЧП + Амортизация (5:6)		4575544920	9200929750	7101228070	12393008810	3815917710	11228827590

2. Определение стоимости ОАО «Газпром» затратным (имущественным) подходом

Если предприятие не находится в стадии банкротства, то используется метод чистых активов. Рассчитаем стоимость чистых активов (ЧА) в динамике с 2008 года. Расчеты делаются по данным из бухгалтерского баланса компании (ф.№1, тыс. руб).

Расчет ЧА на дату:	Код строки	01.01.08	01.01.09	01.01.10	31.12.10	31.12.11	30.06.12
Имущество*	актив						
Валюта БАЛАНСА	300	5929361713	6169537427	7433141940	7828107263	9520654856	9916960468
- Собственные акции, выкупленные у акционеров	411	-	-	-	-	-	-
Итого Актив (300 – 411)		5929361713	6169537427	7433141940	7828107263	9520654856	9916960468
Долги	пассив						
Валюта БАЛАНСА	700	7433141940	6169537427	7433141940	7828107263	9520654856	9916960468
- ИТОГО по разделу III Капитал и резервы	490	4663465990	4782598611	5881094002	6187890234	7540011643	7709186013
- Доходы будущих периодов	640	930	-	-	-	-	-
Итого Долги (700 – 490 – 640)		2769675020	1386938816	1552047938	1640217029	1980643213	2207774455
Чистые активы = Итого Актив - Итого долги		3159686693	4782598611	5881094002	6187890234	7540011643	7709186013

3. Определение стоимости ОАО «Газпром» сравнительным (рыночным) подходом

*Курс акций берется на конкретную дату или как минимальное / максимальное значение за период. Если при расчетах учтены минимальные и максимальные значения курса за период, то рассчитывается диапазон изменения капитализации акций за период.

**Размер премии за контроль зависит от отрасли, характера собственников,

Для расчёта взяты курсы акций по ММВБ с сайта <http://www.micex.ru> и www.gazprom.ru

Капитализация акций компании на дату:	11.01.2008	11.01.2009	09.01.2010	11.01.2011	03.01.2012	На последнюю отчетную дату 27.08.2012 г.
1. Курс обыкновенных акций(курс по ММВБ)*	354,51	112,44	194,77	194,15	177,5	156,26
2. Количество обыкновенных акций	23673512900	23673512900	23673512900	23673512900	23673512900	23673512900
3. Капитализация обыкновенных акций (1*2)	8392497058	2661849790	4610890108	4596212530	4202048540	3699223126
4. Курс привилегированных акций*	ВСЕ АКЦИИ ОАО "ГАЗПРОМ" ОБЫКНОВЕННЫЕ					
5. Количество привилегированных акций						
6. Капитализация привилегированных акций (4*5)						
7. Капитализация акций (3+6)	8392497058	2661849790	4610890108	4596212530	4202048540	3699223126
8. Капитализация акций +20% премия за контроль (7*120%)**	10070996470	3194219749	5533068129	5515455035	5042458248	4439067751
9. Капитализация акций +40% премия за контроль (7*140%)**	11749495881	3726589707	6455246151	6434697541	5882867956	5178912376

4. Сравнение стоимости компании полученной в п.1-3 (тыс. руб)

Стоимость компании на нач. года:	на начало года					на тек. момент
	2008	2009	2010	2011	2012	27.авг
1. Капитализация по OIBDA		11801589720	8487486110	11679026120	15482146460	14537285770
2. Капитализация по (ЧП + Амортизация)		4575544920	9200929750	7101228070	12393008810	11228827590
3. Чистые активы (ЧА)	3159686693	4782598611	5881094002	6187890234	7540011643	7709186013
4. Капитализация акций	8392497058	2661849790	4610890108	4596212530	4202048540	3699223126
5. Капитализация акций +20% премия за контроль	10070996470	3194219749	5533068129	5515455035	5042458248	4439067751
6. Капитализация акций +40% премия за контроль	11749495881	3726589707	6455246151	6434697541	5882867956	5178912376

Значения в шапке таблицы будут комбинированные, так как соединяются данные из разных таблиц. Часть данных представлена за интервал времени (год), а другая часть данных на определенный момент (начало или конец года).

Построим графики изменения стоимости компании с 2008 года. (см. рис.).

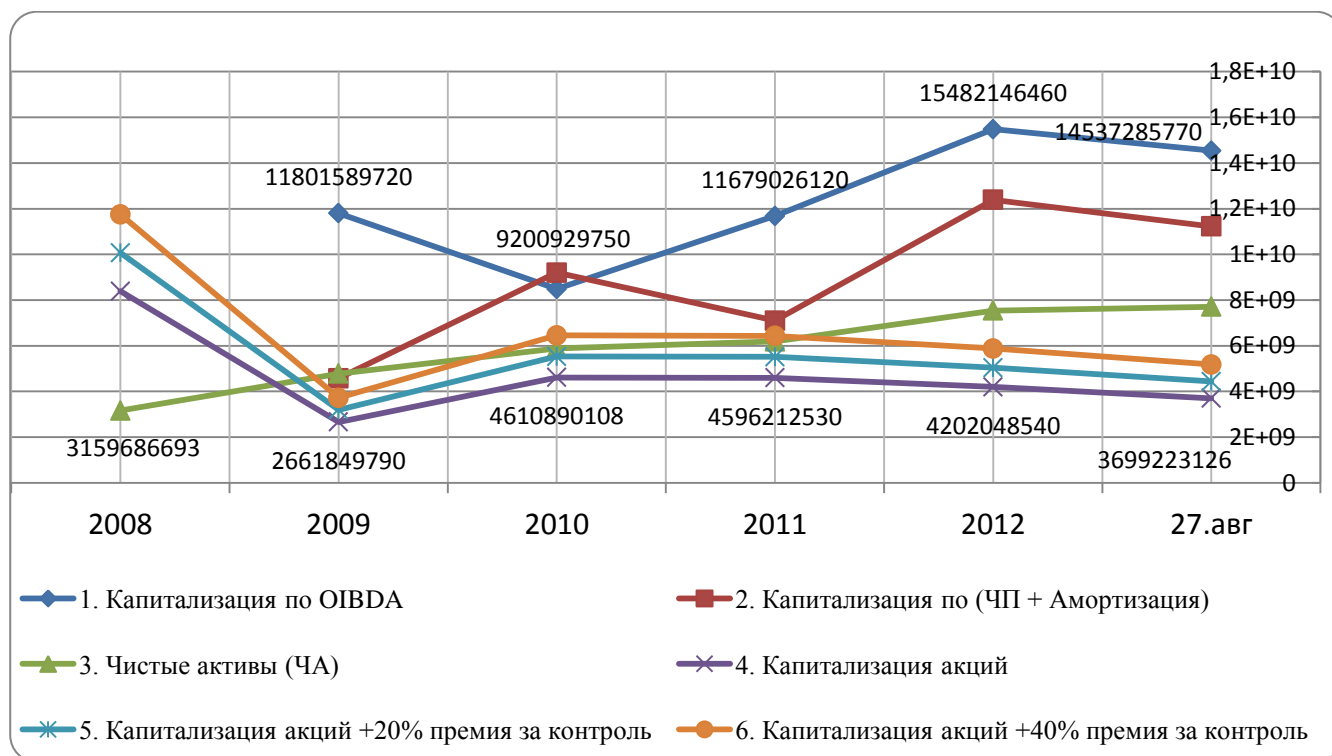


Рис. 1

На рисунке отражены значения минимальной и максимальной границы стоимости компании за период с 2008 года.

5. Определим средневзвешенную стоимость компании в динамике и на данный момент

Результаты использованных подходов к оценке стоимости отличаются друг от друга. Для определения окончательной величины стоимости компании определим средневзвешенное значение. Для этого каждому из примененных подходов (методов) присваивается весовой коэффициент [4].

Наименование метода		Характер бизнеса	Цель оценки	Размер пакета	Доступность и достоверность информации	Итог	Удельный вес, %
Капитализации доходов	Уровень	Средний	Низкий	Низкий	Средний		
	Ранг*	1	0	2	1	4	22,22
Чистых активов	Уровень	Высокий	средний	Высокий	Высокий		
	Ранг*	2	1	2	2	7	38,89
Рынка капитала (капитализация акций)	Уровень	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий		
	Ранг*	2	2	0	3	7	38,89

Окончательная оценка стоимости ОАО «Газпром» на основе экспресс метода определяется по формуле:

$$\text{Стоимость компании} = \sum (V_i * Z_i),$$

где V_i — оценка стоимости предприятия (бизнеса) рассчитанная i -м методом (все применимые методы оценки произвольно нумеруются); $i = 1, \dots, n$ — множество применимых в дан-

ном случае методов оценки; Z_i — весовой коэффициент метода оценки с номер i .

Очевидно, что при этом разумное выставление коэффициентов Z является одним из главных свидетельств достаточной квалифицированности и непредвзятости оценщика бизнеса.

Однако дать однозначную и точную оценку стоимости компании невозможно.

Поэтому упрощенно и схематично динамику стоимости компании можно представить в виде «коридора» с максимальным и минимальным уровнем (рис. 2). «Коридор» формируется на основе полученных значений стоимости бизнеса по трем подходам (методам) за определенный период времени. Положительная динамика стоимости компании одновременно по трем подходам (методам) однозначно говорит о благополучном стечении неуправляемых (внешних) и эффективном использовании управляемых (внутренних) факторов. А далее возможны различные комбинации.

Например, стоимость «goodwill» компании предлагают определять как разницу (рис. 2) между капитализацией акций компании, рассчитанную с учетом премии за контроль на развитом фондовом рынке (при условии наличия спроса на акции), и стоимостью чистых активов компании (ЧА). Соответственно стоимость «goodwill» компании растет при эффективном управлении и/или при благоприятном внешнем стечении неуправляемых факторов. Задача лидера и топ-менеджмента – увеличить «goodwill» и стоимость компании.

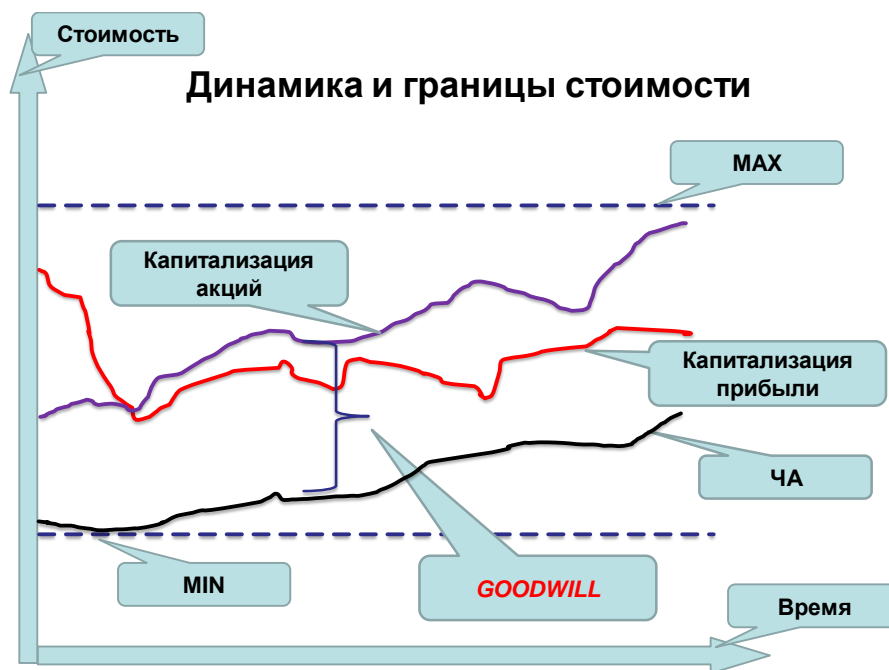


Рис. 2

На рис. 3 представлена «зона риска», т.е. зона, в которой курс акций упал настолько, что их капитализация оказалась ниже стоимости чистых активов. В этот момент компания может быть куплена на фондовом рынке за бесценок для распродажи ее активов по частям, то есть для ликвидации или для дробления.

Вопрос о целесообразности покупки или продажи акций компании предлагается решать по данным о пресечении линий капитализации прибыли и капитализации акций (рис. 3). Соотношение этих линий характеризует эффективность управления и правильность выбранной стратегии, позволяет оценить эффективность тех или иных ключевых управленческих решений повлиявших на стоимость компании, а также выявить приоритетные направления для формирования эффективных портфельных инвестиций.

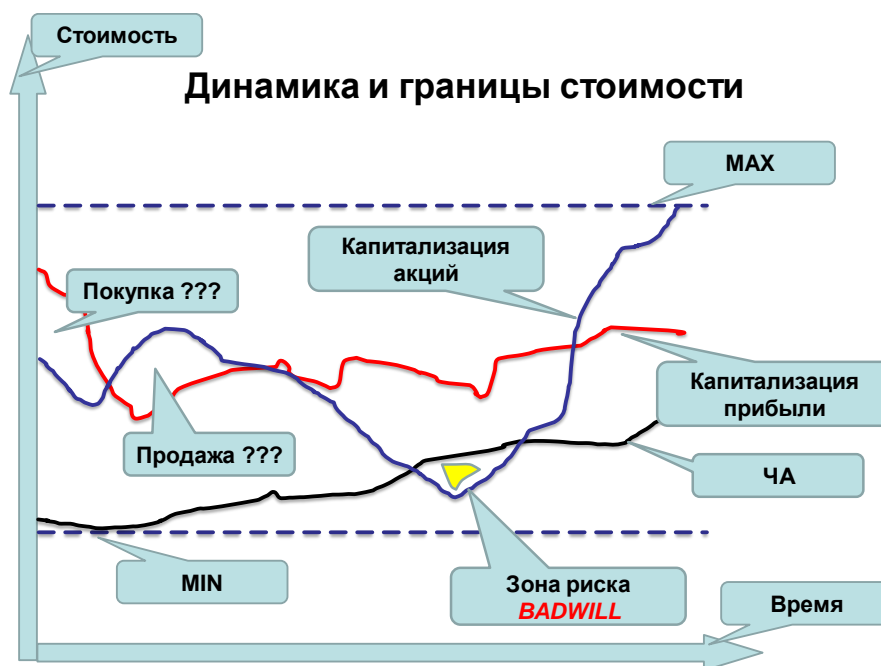


Рис. 3

Библиографический список

1. Яшин, С.Н. Некоторые аспекты методологии портфельного анализа / С.Н. Яшин, Д.А. Корнилов // Финансы и кредит. 2006. №2 (206). С. 64–73.
2. Иванов, А.А. ACTIVITY-BASED COSTING как информационно-аналитическая система принятия стратегических управленческих решений // Труды НГТУ. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-т., 2012. №3(96).
3. Корнилов, Д.А. Использование методов и подходов к оценке стоимости объектов обмена и определение на их основе эффективности принимаемых стратегий при реструктуризации компаний / Д.А. Корнилов, С.Н. Яшин // Финансы и кредит. 2004. №27(165). С. 14–22.
4. Митяков, Е.С. К вопросу о выборе весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики / Е.С. Митяков, Д.А. Корнилов // Труды НГТУ. – Н.Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-т., 2011. №3(90). С. 289–300.

Дата поступления
в редакцию 10.10.2012

D.A. Kornilov

EFFECTIVE STRATEGIC BUSINESS MANAGEMENT and ESTIMATION OF COST

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: To develop a technique of an assessment of influence of already accepted strategic decisions on business cost.

Methodology: Methodology of temporary value of money, the portfolio analysis, the strategic analysis, approaches and methods to business estimation of cost.

The results and their application area: In this article the express a method for a business assessment on the minimum set of public data will be considered. Distinctive features of an offered method is simplicity and small labor input. Result of research is development of a technique the express of estimation of cost of business.

Conclusions: JSC Gazprom estimation of cost in dynamics since 2008. The technique the express of an assessment of business on a small data. The technique allows to form an optimum portfolio of businesses and to estimate their efficiency.

Key words: analysis; business assessment; express assessment; strategic analysis; business cost; importance of indicators.

УДК 330.322.2

С.Н. Яшин¹, Ю.А. Лебедев², Е.В. Кошелев², А.В. Купцов²

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ПОСТЕПЕННОГО ОБНОВЛЕНИЯ ПАРКА ОБОРУДОВАНИЯ КОМПАНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²

Цель: Совершенствование методологических аспектов обновления парка оборудования компании.

Методология: Достижение поставленной в работе цели осуществляется за счет выбора наиболее выгодного момента периодического капитального ремонта всего оборудования и замены вышедших из строя машин.

Результаты и область их применения: Результатом исследования является разработка экономического механизма постепенного обновления парка оборудования компании.

Выводы: Экономический механизм позволяет при недостатке средств для модернизации всего парка оборудования постепенно обновлять различные его единицы с минимальными затратами.

Ключевые слова: Модернизация оборудования; капитальный ремонт; временная стоимость финансовых решений; номинальный денежный поток; учет инфляции.

В настоящее время в отечественном машиностроении не решена задача технического перевооружения производства. Средства труда основных предприятий машиностроения имеют высокий уровень как физического, так и морального износа. Очень часто использование устаревшего оборудования влечет за собой увеличение травм работников, возникновение аварий и даже техногенных катастроф. С повышением уровня износа растут затраты предприятия на содержание и эксплуатацию оборудования, то есть на техническое облуживание и ремонт. В результате продукция машиностроительных заводов не только не имеет возможности соответствовать качеству импортных товаров-субститутов, но и себестоимость ее оказывается завышенной. Поэтому остается актуальной задача совершенствования работы ремонтной службы предприятий.

С другой стороны, современные тенденции развития российской экономики, связанные с недостаточной инновационной активностью предприятий, продолжают сохраняться. Одной из ключевых проблем инновационного развития российских компаний является проблема модернизации производства. Многие предприятия продолжают работать на старом оборудовании, которое используется в технологии производства уже более 20 лет. Такая ситуация негативно влияет как на производительность и экономичность, так и на прямое отставание российских компаний в самих технологиях производства.

Как известно, качественную характеристику состояния основных средств компании можно провести, используя ряд показателей, основными из которых являются следующие [4, 9].

1. Фондоотдача основных средств:

$$\text{Фондоотдача} = \frac{\text{Объем Отгруженных Товаров, Выполненных Работ, Услуг}}{\text{Среднегодовая Стоимость Основных Средств}}. \quad (1)$$

2. Доля активной части основных средств (машин, оборудования, транспортных средств) (K_1):

$$K_1 = \frac{\text{Стоимость Активной Части Основных Средств}}{\text{Стоимость Основных Средств}}. \quad (2)$$

3. Коэффициент обновления основных средств (K_2):

$$K_2 = \frac{\text{Первоначальная Стоимость Поступивших За Год Основных Средств}}{\text{Первоначальная Стоимость Основных Средств На Конец Года}}. \quad (3)$$

4. Коэффициент выбытия основных средств (K_3):

$$K_3 = \frac{\text{Первоначальная Стоимость Выбывших За Год Основных Средств}}{\text{Первоначальная Стоимость Основных Средств На Начало Года}} \quad (4)$$

5. Коэффициент износа основных средств (K_4):

$$K_4 = \frac{\text{Износ Основных Средств}}{\text{Первоначальная Стоимость Основных Средств На Конец Года}} \quad (5)$$

Проведем краткий обзор динамики ряда перечисленных и некоторых других показателей, характеризующих общее состояние машиностроения России за период в пять лет, согласно данным Федеральной службы государственной статистики [11]. При этом обзор будем проводить по следующим основным отраслям машиностроения:

1. Metallургическое производство и производство готовых металлических изделий.
2. Производство машин и оборудования.
3. Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования.
4. Производство транспортных средств и оборудования.

На рис. 1-4 сплошной линией показаны реальные данные, а пунктиром – линейный тренд.

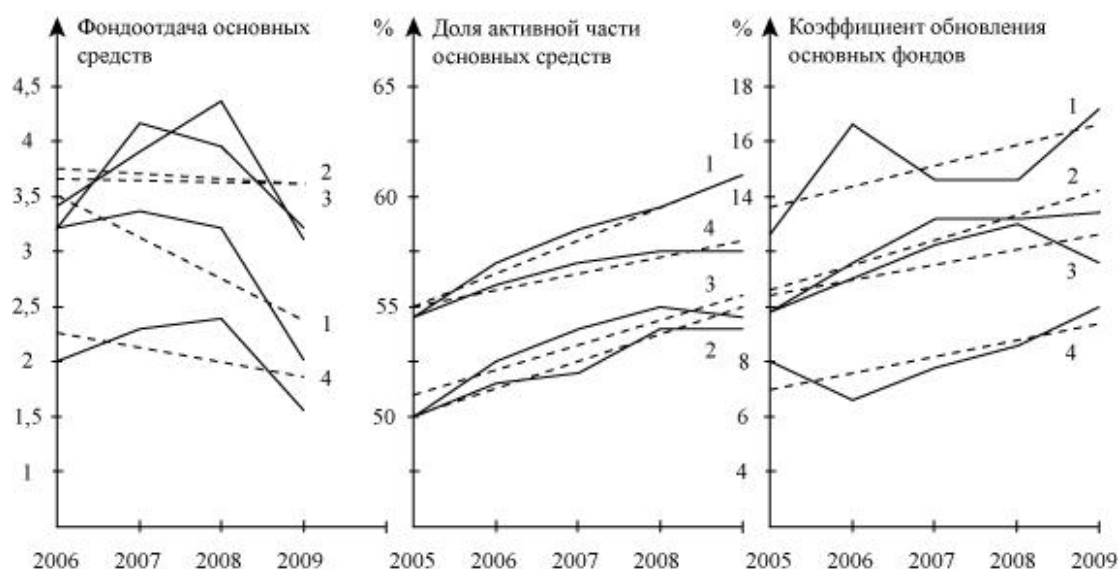


Рис. 1. Динамика состояния основных средств в машиностроении России

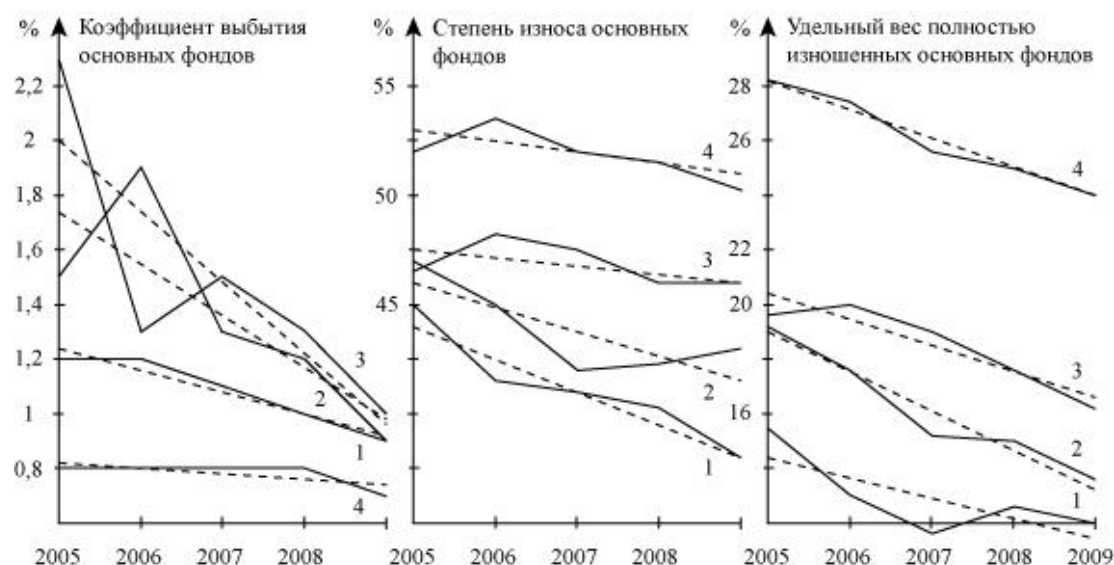


Рис. 2. Динамика состояния основных средств в машиностроении России

На рис. 1 видно, что фондоотдача по всем четырем отраслям снижается. При этом доля активной части основных средств растет, что обычно расценивается, как положительная тенденция. Однако активная часть значительно превысила 50%, что свидетельствует о серьезном износе зданий и сооружений. (Исследование влияния активной части основных средств на их фондоотдачу будет проведено позже.) Коэффициент обновления основных фондов растет, что следует оценить положительно. Наименьшая степень их обновления наблюдается в отрасли 4 – «Производство транспортных средств и оборудования».

Данные рис. 2 свидетельствуют об уменьшении выбытия и износа основных средств. (Исследование влияния коэффициента выбытия основных средств на их фондоотдачу будет проведено позже.) При этом степень износа все равно высокая, т. к. превышает рекомендуемый предел 20-25% [4, 9]. Также наблюдается слишком большой износ основных средств опять в отрасли 4 – «Производство транспортных средств и оборудования».

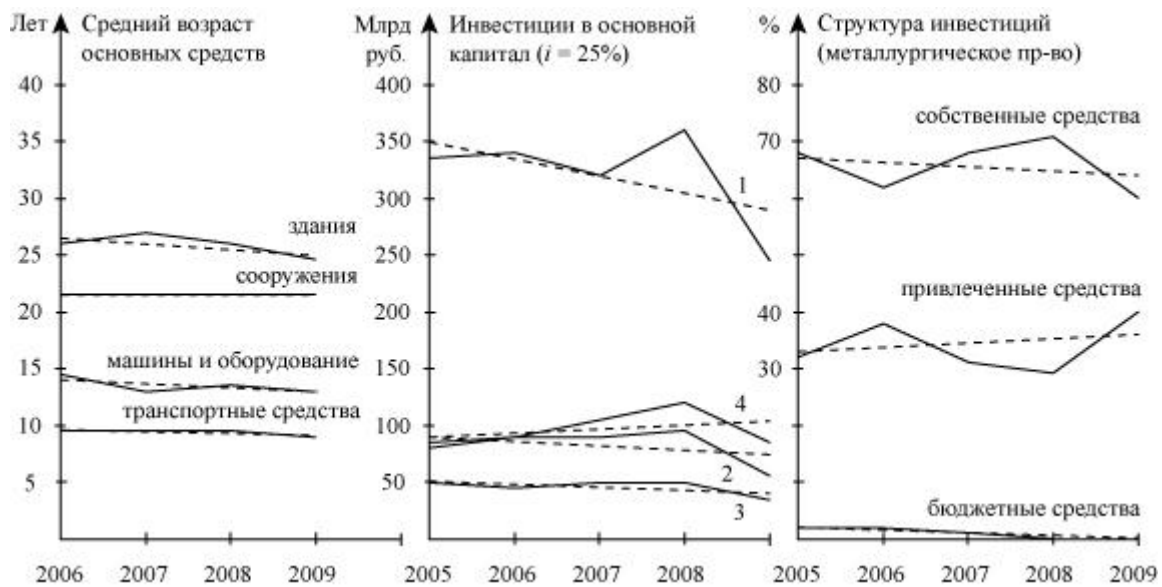


Рис. 3. Динамика состояния основных средств в машиностроении России

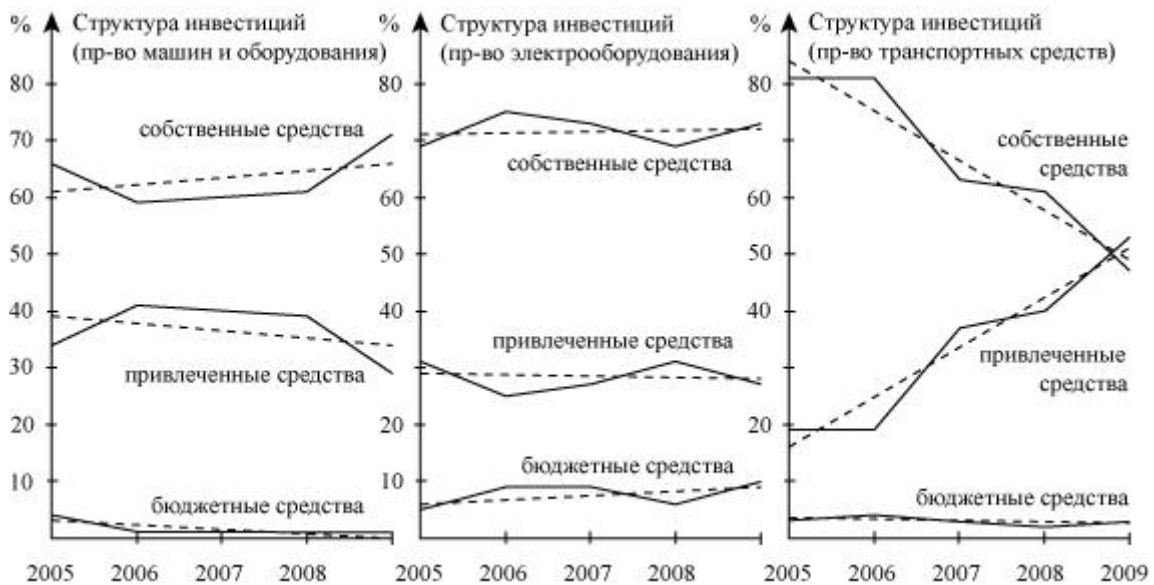


Рис. 4. Динамика состояния основных средств в машиностроении России

На рис. 3 видно, что средний возраст основных средств достаточно стабилен и при этом не критически велик. Но инвестиции в основной капитал с учетом годовой инфляции

$i = 25\%$ [6] в основном снижаются. Исключение, однако, составляет отрасль 4 – «Производство транспортных средств и оборудования». Но кризис 2008-2009 гг. серьезно понизил инвестиции во всех четырех отраслях. Наибольшие инвестиции наблюдаются в отрасли 1 – «Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий». При этом инвестирование за счет собственных средств снижается, а за счет привлеченных – повышается, что следует оценить положительно. Бюджетное инвестирование при этом почти нулевое.

Данные рис. 4 свидетельствуют об увеличении доли инвестиций в основной капитал за счет собственных средств в отрасли 2 – «Производство машин и оборудования» и в отрасли 3 – «Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования», что следует оценить отрицательно, поскольку эта доля уже слишком велика. При этом бюджетное инвестирование в отрасли 3 значительное и увеличивается. Состояние структуры инвестиций в отрасли 4 – «Производство транспортных средств и оборудования» критическое, т. к. привлеченные средства в 2009 г. превысили собственные.

Таким образом, общее состояние машиностроения в России неважное, но пока еще не критическое, за исключением, конечно, отрасли 4 – «Производство транспортных средств и оборудования».

Для более глубокого понимания процесса изменения состояния основных средств в четырех основных отраслях машиностроения России необходимо построить для него соответствующую факторную модель. В качестве упрощенной модели можно предложить линейную регрессию. На наш взгляд, наиболее важно было бы отследить изменение фондоотдачи основных средств (y) в зависимости от соответствующих факторов. В качестве таковых предлагаем следующие:

x_1 - удельный вес активной части основных средств (%);

x_2 - коэффициент обновления основных средств (%);

x_3 - коэффициент выбытия основных средств (%);

x_4 - коэффициент износа основных средств (%);

x_5 - средний возраст активной части основных средств (машин, оборудования, транспортных средств) (лет).

Программа «MATLAB» [3] позволяет получить следующую регрессию:

$$y = 12,925 - 0,1298x_1 + 0,0319x_2 + 0,9705x_3 - 0,0462x_4 - 0,1728x_5, \quad MaxErr = 0,8951.$$

Следовательно, фондоотдачу основных средств можно увеличить за счет уменьшения удельного веса их активной части, за счет роста коэффициентов обновления и выбытия, за счет уменьшения коэффициента износа и среднего возраста активной части основных средств.

Подобная модель нуждается в корректировке, поскольку в нее могут входить переменные, которые зависят от других переменных модели. Поэтому уточним регрессионную модель в программе «STATISTICA» [13]:

$$y = 12,49126 - 0,12893x_1 + 0,86901x_3 - 0,07013x_4.$$

Из табл. 1 видно, что данная регрессионная модель достаточно качественная.

Таблица 1

Оценка качества регрессии

Статистика	Значение
Множественный R	0,799558
Множественный R^2	0,639293
Уточненный R^2	0,549116
$F(3,12)$	7,089327
P	0,005366
Стандартная ошибка оценки	0,556330

Таким образом, фондоотдачу основных средств можно увеличить за счет уменьшения

удельного веса их активной части, за счет роста коэффициента выбытия и за счет снижения коэффициента износа.

Проблема замены старого оборудования на новое в современных условиях не может решаться старыми методами, которые использовались в планово-директивной экономике страны. В настоящее время необходим переход к методам, более адекватным современным рыночным условиям развивающегося российского рынка капитала. В данном случае основной акцент следует сделать на учет временной стоимости финансовых решений, которые кроме того должны учитывать инфляцию в высокорисковой экономике России.

При этом в практике ведения бизнеса достаточно часто бывают ситуации, когда для одновременной замены всего парка оборудования недостаточно средств. В таком случае необходимо создание экономического механизма, который позволял бы постепенно обновлять различные единицы оборудования с наибольшей экономической выгодой для предприятия.

Для бесперебойной работы оборудования предприятия в таком режиме следует периодически проводить капитальные ремонты всего оборудования с заменой вышедших из строя машин на новые модели. Проводить капитальный ремонт данных машин нецелесообразно, во-первых, по причине их значительного технического износа и, во-вторых, по причине их более дорого капитального ремонта по сравнению с другими. При этом заменять такие машины на новые, но уже морально устаревшие модели неразумно, т.к. это приведет к техническому отставанию производства от потребностей рынка потребителей продукции.

Чтобы решить указанную проблему можно усовершенствовать *модель предупредительного и восстановительного ремонтов оборудования*, представленную в книгах [8, 12]. Данная модель считается фундаментальной при сопоставлении стратегий предупредительного и восстановительного текущих ремонтов. Она рекомендует производить капитальный и текущий ремонты на основе календарного расписания или ждать выхода оборудования из строя. Ответ на этот вопрос, естественно, зависит от особенностей оборудования и соответствующих затрат. Опишем данную модель.

Пусть M - число одинаковых машин, используемых в определенном производственном процессе; K_1 - стоимость предупредительного ремонта одной машины; K_2 - средняя стоимость устранения одного ее отказа. (Можно считать, что $K_1 < K_2$, ибо в противном случае предупредительный ремонт производить не следует.); p_r - вероятность того, что отказ машины возникнет в месяце r после предыдущего ремонта ($r \geq 1$).

Вычислим затраты на предупредительный ремонт и устранение отказа (S_r) для случая, когда применяется такой порядок текущего ремонта, при котором предупредительный ремонт запланирован в конце каждого r -го месяца. Тогда все M машин будут обслужены в порядке предупредительного ремонта при затратах K_1 . В то же время при каждом случайном отказе машины потребуется израсходовать сумму K_2 . Следовательно, если обозначить через F_r общее среднее число отказов машины в течение r месяцев, то

$$S_r = K_1 M + K_2 F_r, \quad r \geq 1. \quad (6)$$

Величины F_1 и F_r , когда $r \geq 2$, согласно модели, представленной в книгах [8, 12] находятся по формулам

$$F_1 = M p_1, \quad (7)$$

$$F_r = (-1)^{r-1} M \begin{vmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & P_1 \\ P_1 & -1 & \dots & 0 & P_1 + P_2 \\ P_2 & P_1 & \dots & 0 & P_1 + P_2 + P_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{r-2} & P_{r-3} & \dots & -1 & P_1 + P_2 + \dots + P_{r-1} \\ P_{r-1} & P_{r-2} & \dots & P_1 & P_1 + P_2 + \dots + P_r \end{vmatrix}, \quad r \geq 2. \quad (8)$$

После нахождения величин F_r по формуле (8) могут быть найдены общие суммы затрат за r месяцев. Для вычисления суммы среднемесячных расходов рассматриваем величины S_r / r . Найдя наименьшую из них, получим оптимальную периодичность предупредительного ремонта. Например, если минимальные среднемесячные расходы составляют $S_3 / 3$, то периодичность предупредительного ремонта равна трем месяцам.

В настоящее время серьезным недостатком этой модели является то, что она не учитывает временную стоимость денег. Чтобы решить эту проблему, необходимо вычислять не среднемесячные расходы S_r / r , а современную стоимость будущих расходов S_r в настоящий момент времени ($PV(S_r)$).

Кроме того, вместо предупредительного ремонта будем рассматривать капитальный ремонт, а вместо восстановительного ремонта - приобретение машины новой модели взамен вышедшей из строя. Таким образом, K_1 - это будет стоимость капитального ремонта одной машины, а K_2 - стоимость устранения одного ее отказа, т. е. замены на новую модель.

Современную стоимость будущих затрат на капитальный ремонт и устранение отказа можно оценить для 2-х различных случаев.

1. *Капитальный ремонт и замена в году, n :*

$$PV(S_n) = (K_1 M + K_2 F_n)(1+i)^{-n}, \quad (9)$$

где i - годовая ставка дисконта (цена капитала) (%).

2. *Капитальный ремонт и замена в месяце, r :*

$$PV(S_r) = (K_1 M + K_2 F_r)(1+i)^{-r}, \quad (10)$$

где $i_r = \sqrt[r]{1+i} - 1$ - ставка дисконта (цена капитала) за месяц (%).

Проиллюстрируем представленный экономический механизм постепенного обновления парка оборудования на следующем примере. Металлообрабатывающая компания 10 лет назад купила 10 одинаковых токарных станков стоимостью 3 млн руб. каждый. В настоящее время можно купить подобный токарный станок новой модели за 4 млн руб. (включая транспортировку и установку). Однако из-за ограниченных финансовых возможностей компания рассматривает вариант постепенного обновления парка оборудования. В настоящий момент капитальный ремонт одного старого станка обойдется в 2 млн руб. Средневзвешенная цена капитала компании составляет 35% в год, а прогнозируемый годовой темп инфляции - 25%.

Поскольку в формулах (9) и (10) дисконтируется номинальный чистый денежный поток, необходимо в дальнейшем учесть темп инфляции. Это позволяет сделать формула Фишера [6]:

$$i = \frac{1+r}{1+h} - 1, \quad (11)$$

где i - реальная ставка (%); r - номинальная ставка (%); h - темп инфляции (%).

Подставляя наши данные в формулу (11), получаем, что реальная цена капитала компании

$$i = \frac{1+0,35}{1+0,25} - 1 = 0,08,$$

т. е. 8% годовых.

Из техничекй характеристик старого оборудования известно, что вероятность отказа одного станка за год составляет $p_1 = 0,01$. Тогда, полагая бесперебойную работу станка в году n как прямое событие A_n , а его отказ как противоположное событие \bar{A}_n , обозначим их вероятности как $P(A_n)$ и $P(\bar{A}_n) = p_n$. При этом в нашем случае $P(A_n) = 0,99^n$, а $P(\bar{A}_n) = p_n = 1 - 0,99^n$. Вычисляя эти вероятности за период в 7 лет, получаем данные табл. 2

Таблица 2

- Расчет вероятностей бесперебойной работы и отказа станка

Год	Вероятность бесперебойной работы, $P(A_n)$	Вероятность отказа, $p_n = P(\bar{A}_n)$
1	0,99	0,01
2	0,9801	0,0199
3	0,970299	0,029701
4	0,960596	0,039404
5	0,95099	0,04901
6	0,94148	0,05852
7	0,932065	0,067935

По формулам (7) и (8) можно найти значения F_1 и F_n , когда $n \geq 2$. Так, например, в 3-м году

$$F_3 = M \begin{vmatrix} -1 & 0 & p_1 \\ p_1 & -1 & p_1 + p_2 \\ p_2 & p_1 & p_1 + p_2 + p_3 \end{vmatrix} = 10 \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0,01 \\ 0,01 & -1 & 0,0299 \\ 0,0199 & 0,01 & 0,059601 \end{vmatrix} = 0,601.$$

Рассчитывая все значения F_n в программе “MATLAB” [7] и подставляя их в формулу затрат в n -м году

$$S_n = K_1 M + K_2 F_n, \quad (12)$$

вычисляем затем по формуле (9) современную стоимость затрат на капитальный ремонт и устранение отказа для каждого года в табл. 3.

Таблица 3

Расчет современных стоимостей затрат на капитальный ремонт и устранение отказа (млн руб.)

Год	Среднее число отказов станка, F_n	Затраты на кап. ремонт и устранение отказа, S_n	Дисконтный множитель, $(1+i)^{-n}$	Современная стоимость затрат, $PV(S_n)$
1	0,1	20,4	0,925926	18,889
2	0,3	21,2	0,857339	18,176
3	0,601	22,404	0,793832	17,785
4	1,005	24,02	0,73503	17,655
5	1,515	26,06	0,680583	17,736
6	2,135	28,54	0,63017	17,985
7	2,87	31,48	0,58349	18,368

Как показывают данные табл. 3, наименьшая современная стоимость затрат на капитальный ремонт всего парка оборудования (токарных станков) и устранение отказа одного станка, т. е. его замены на новую модель, получается в случае проведения капитального ремонта всего парка оборудования каждые четыре года. Такая стратегия постепенного обновления парка оборудования позволит получить металлообрабатывающей компании наибольшую экономическую выгоду.

Однако подобный процесс постепенного обновления может серьезно затянуться, поэтому в будущем необходимо перейти на другую, более ускоренную систему замены оборудования.

В заключение сформулируем наиболее значимые выводы:

1. Фондоотдачу основных средств в машиностроении России можно увеличить за счет уменьшения удельного веса их активной части, за счет роста коэффициентов обновления и выбытия, за счет уменьшения коэффициента износа и среднего возраста активной части основных средств.

2. При разработке экономического механизма постепенного обновления парка оборудования компании следует учитывать временную стоимость финансовых решений.

3. В денежных потоках необходимо учитывать инфляцию, характерную для современной России. Для этого необходимо сначала оценить номинальные потоки, а затем использовать формулу Фишера для вычисления реальной цены капитала компании.

4. Разработанный экономический механизм постепенного обновления парка оборудования позволяет при недостатке средств для модернизации всего парка оборудования постепенно обновлять различные его единицы с минимальными затратами.

Представленный в статье подход может быть полезен руководителям компаний в целях последовательной модернизации (технического перевооружения) производства. Это позволит российским компаниям увеличить темпы своего инновационного развития.

Библиографический список

1. **Беляев, О.Г.** Оценка инновационного потенциала экономических систем / О.Г. Беляев, Д.А. Корнилов, // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2012. №3 // <http://uecs.ru/>.
2. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
3. **Гаспарян, О.Н.** MATLAB: учеб. Пособие / О.Н. Гаспарян. – Ереван: Государственный инженерный университет Армении, 2005. – 143 с.
4. **Ковалев, А.И.** Анализ финансового состояния предприятия / А.И. Ковалев, В.П. Привалов. – 4-е изд., исправл., доп. – М.: Центр экономики и маркетинга, 2000. – 208 с.
5. **Корнилов, Д.А.** Разработка классификации видов планирования // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Экономика и финансы. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2005. Вып. 1 (7).- С. 31–37.
6. **Лимитовский, М.А.** Инвестиционные проекты и реальные опционы на развивающихся рынках: учеб.-практич. пособие / М.А. Лимитовский. – М.: «Издательство Юрайт», 2008. – 464 с.
7. **Половко, А.М.** MATLAB для студента / А.М. Половко, П.Н. Бутусов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.
8. **Старр, М.** Управление производством / М. Старр. – М., 1968. – 398 с.
9. **Шеремет, А.Д.** Методика финансового анализа / А.Д. Шеремет, Р.С. Сайфулин, Е.В. Негашев. – М.: ИНФРА-М, 2000. – 208 с.
10. **Яшин, С.Н.** Анализ эффективности инновационной деятельности: учеб. пособие / С.Н. Яшин, Е.В. Кошелев, С.А. Макаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 288 с.
11. Промышленность России. 2010. Стат. сб. / Росстат. – М., 2010. – 453 с. // <http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/rosstatsite/main/>.

12. Экономико-математические модели в организации и планировании промышленного предприятия: учеб. пособие / Б.И. Кузини [и др.]. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. – 336 с.
13. STATISTICA – фирменное руководство. – М.: StatSoft Russia, 1999. – 3782 с. // <http://www.statsoft.ru>.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

S.N. Yashin¹, Yu.A. Lebedev², E.V. Koshelev², A.V. Kuptsov²

FORMATION OF THE ECONOMIC MECHANISM OF GRADUAL UPDATING OF COMPANY'S EQUIPMENT PARK

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeyev¹,
Nizhny Novgorod State University n.a N.I. Lobachevsky

Purpose: Improvement of the methodological aspects of the equipment upgrade of the company.

Methodology: Achievement of the objectives is to work through the choice of the most favorable time of the periodic overhaul of all equipment and replacement of defective vehicles.

The results and their application area: The result of research is the development of the economic mechanism of gradual renewal of the company's equipment.

Conclusions: Economic mechanism allows the shortage of funds to upgrade the entire fleet of equipment gradually upgrade its various units with minimal effort.

Key words: Equipment upgrades; repair; time value of financial solutions; nominal cash flows; inflation accounting.

УДК 338

А.А. Иванов, Н.Д. Иванова

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ACTIVITY-BASED COST SYSTEM И BALANCED SCORECARD НА РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

ООО «Премьер-Продукт»

Цель: Поиск путей разрешения проблем применения Activity-Based Cost System (ABC System) и Сбалансированной системы показателей (ССП) на российских предприятиях, что будет способствовать повышению интереса менеджмента компаний к системам контроллинга затрат.

Методология: Достижение поставленной в работе цели предполагает создание классификации причин малого распространения Activity-Based Costing и СПП как систем управления затратами и персоналом среди российских компаний.

Результаты и область их применения: Результатом исследования является выявление основных факторов, определяющих возникновение научных и практических проблем применения ABC System и СПП; предложены пути их разрешения.

Выводы: Распространение ABC System и СПП возможно при наличии законодательного обеспечения их применения, заинтересованности менеджмента компаний в предоставлении достоверной экономической информации заинтересованным лицам, а также наличии нормативно-справочной информации и программных продуктов отечественного производства.

Ключевые слова: Activity-Based Cost System, Сбалансированная система показателей, контроллинг затрат, проблемы применения ABC System

Осуществление хозяйственно-экономической деятельности субъектов предпринимательства происходит путем принятия стратегических и оперативных решений менеджментом. В свою очередь, принятие решения любого уровня основывается на наличии достоверных сведений относительно принимаемых решений. На современном этапе развития экономических дисциплин обеспечение информационно-аналитической и методической поддержки менеджмента в сфере управления затратами на предприятии осуществляет система контроллинга затрат.

Нами предлагается подход к контроллингу затрат, основанный на процессном подходе к управлению с применением Activity-Based Cost System в качестве системы калькулирования и управления затратами, а также сбалансированной системы показателей для декомпозиции целей, устанавливаемых менеджментом организации.

Однако наличие ряда недостатков данных инструментов, а также большое количество неточностей в переводах иностранных печатных изданий российскими авторами приводят к снижению интереса со стороны отечественного управленческого персонала.

К числу наиболее важных факторов, определяющих возникновение научных и практических проблем создания системы контроллинга затрат в современных условиях хозяйствования, можно отнести:

- техническую неготовность организации;
- технические сложности создания;
- сложившиеся стереотипы российского менеджмента;
- социально-психологические факторы неготовности российского менеджмента;
- отсутствие полноты в представлении о ABC System и СПП;
- недостаточное количество и качество русифицированной нормативно-справочной информации;
- отсутствие полноценного русифицированного программного обеспечения, отвечающего всем требованиям организации;

- отсутствие требований федерального уровня государственной власти к применению концепции контроллинга затрат.

Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных факторов.

1. Техническая неготовность организации

Многие менеджеры неготовы к работе со сбалансированной системой показателей (ССП): у них либо отсутствует стратегия развития, либо их стратегия не формализована.

Необходимым условием решения данной проблемы является проверка организации на наличие миссии, цели бизнеса, готовности менеджмента к постоянным совершенствованиям.

При разработке стратегии и составлении стратегических карт необходимо использовать такие инструменты, как SWOT-анализ, маркетинговый анализ, производственно-аналитические показатели, что позволяет выстраивать на их основе сбалансированную систему стратегических целей, на которую ориентируется предприятие.

2. Технические сложности создания

1. Трудности при построении стратегической карты сбалансированной системы показателей.

Ключевым этапом создания СПП является составление стратегических карт, ограничивающих размер стратегии до 10—15 основных стратегических целей. Построение стратегической карты может повлечь трансформацию исходной стратегии предприятия. Сокращение общего числа стратегий и их видения различными сотрудниками до 10-15 единиц позволяет сконцентрировать усилия именно на приоритетных направлениях, что является актуальным при ограниченном количестве ресурсов. Важными условиями устранения рассматриваемой проблемы является осуществление анализа бизнес-процессов, протекающих в организации, а также установление причинно-следственных связей между всеми стратегическими целями.

2. Трудности выбора ключевых показателей эффективности для сбалансированной системы показателей.

Трудности выбора какой-либо величины из существующего набора является одной из наиболее распространенных проблем любой сферы. Сложности также могут возникать при измерении нематериальных целей. Процесс выбора ключевых показателей может упрощаться при установлении причинно-следственных связей между операциями и действиями, описанными при процессном построении организации, а также при применении ранжирования показателей.

3. Трудности установки целевых значений показателей эффективности.

Вопрос объективности оценки усложняется необходимостью соблюдения баланса между желаниями руководителей, техническими и физическими возможностями достижения устанавливаемых значений. Выбор целевых значений ключевых показателей эффективности должны является прерогативой менеджмента, отлично осведомленного в протекающих на предприятии процессах, обладающие высоким профессионализмом в сфере анализа. При таком подходе ошибка по вине «человеческого фактора» сводится к минимуму.

4. Технические сложности при сборе информации.

Системы ABC и СПП требуют ввода информации иного характера, чем при традиционных системах калькулирования или анализа эффективности деятельности предприятия – к финансовым индикаторам добавляются нефинансовые, в том числе качественные. Указанные факторы приводят к значительному увеличению потока первичной информации, что может являться причиной отказа от замены традиционных систем учета и управления современными СПП и ABC System. Для облегчения процессов сбора и обработки информации на начальных этапах целесообразно ограничиться общедоступными и недорогими программными продуктами, апробировать различные схемы ввода, хранения и извлечения информации, систему мотивации и обратной связи. На дальнейших этапах рекомендуется разрабатывать собственную систему сбора, оценки и анализа информации.

5. Влияние показателей СПП на систему вознаграждения сотрудника.

Формирование зависимости системы мотивации от ключевых показателей эффективности пробных моделей может привести к различному роду противоречий между действиями сотрудников и изменением планируемых показателей эффективности. Предлагаемое решение проблемы заключается в отказе от мотивации сотрудников на достижение вновь разработанных показателей эффективности на начальном этапе создания данных систем.

6. Трудности в определении операций для модели ABC.

Деятельность организации состоит из множества действий сотрудников, их анализ и объединение в операции представляет трудоемкий процесс. Для упрощения системы ABC и сокращения времени ее разработки рекомендуется объединять операции, затраты на осуществление которых малы. Суммарное количество операций может включать 10-30 единиц (для оценки себестоимости и обслуживания клиентов). Если поставленная задача заключается в усовершенствовании или реорганизации бизнес-процессов, то количество учитываемых операций может доходить до 100 единиц.[2]

3. Сложившиеся стереотипы российского менеджмента.

1. Привычность и простота традиционных систем калькулирования, финансовых систем оценки эффективности предприятий и функционального подхода к управлению организацией.

Системы менеджмента многих отечественных организаций были созданы еще при существовании плановой экономики. Надежность и относительная простота сложившихся подходов к управлению и принятию стратегических решений не ставится под сомнение. Решение проблемы лежит в плоскости повышения экономической образованности российского менеджмента.

2. Стремление управленческого персонала к извлечению выгоды в краткосрочной перспективе.

В современном российском сообществе прослеживается стремление менеджмента к достижению скорейших результатов, направленных на улучшение краткосрочных показателей (что связано с привязкой мотивации труда к планам по объему реализации на месяц, квартал, год), в то время как рассматриваемые инструменты контроллинга затрат ориентированы на долгосрочную перспективу. Для устранения данной проблемы необходимо включать в систему мотивации показатели долгосрочной перспективы развития предприятия.

3. Высокий срок окупаемости новой концепции.

Одним из основных критериев оценки современного бизнеса является минимально возможный срок окупаемости любого проекта. Переход на новые системы учета и управления может рассматриваться как проект по модернизации как существующих программных продуктов, так и протекающих в организации управленческих и вспомогательных бизнес-процессов. Процесс расчета выгоды от осуществления изменений, так же как и срока окупаемости, является чрезвычайно трудоемким.

Необходимо отметить, что ССП не является сугубо оценочной системой, а ABC – не только калькуляционной системой; это новый подход к управлению, иерархии, мотивации. Переход на новую концепцию должен осуществляться планомерно и окончательно. Эффективность от применения систем может не быть выражена увеличением экономических показателей (а в краткосрочной перспективе возможно даже временное ухудшение финансового результата), но в долгосрочной перспективе отразится на увеличении конкурентоспособности бизнеса в целом.

4. Значительные затраты ресурсов на разработку, внедрение и поддержание баз данных.

Разработка, внедрение и поддержание рассматриваемых систем требует значительного количества ресурсов (трудовых и финансовых), высокого профессионального уровня менеджеров.

Для решения данной проблемы требуется первоначальный анализ необходимости изменения организационной структуры бизнеса и готовности менеджмента организации к предстоящим изменениям. Необходимо отметить тот факт, что при создании ABC System,

существует возможность задать точность процессу калькулирования, таким образом выбирая оптимальное соотношение точности извлекаемой информации и затратами на поддержание такой системы.

4. Социально-психологические факторы неготовности.

1. В большинстве случаев отсутствует право на ошибку.

Потеря или отсутствие доверительного отношения со стороны сотрудников организации к руководству и необходимости преобразований на начальном этапе внедрения систем в большинстве случаев приведут к неудачному осуществлению всего проекта. Рекомендуется привлечение сторонней команды профессионалов по внедрению системы или подбор сотрудников, заинтересованных в положительных результатах осуществление проекта по внедрению новых систем.

2. Желание скрыть точную информацию.

Одним из факторов низкой заинтересованности управленческого персонала по применению данных инструментов является боязнь за то, что ССП излагает стратегию настолько чётко и полно, а ABC System раскрывает всю управленческую отчетность, так что конкуренты, получив информацию, могут разрушить все планы компании. Также можно указать на нежелание менеджеров делиться с рядовыми сотрудниками компании информацией в целях сокрытия достоверных сведений.

Разрешение данных проблем лежит в области установления жестких требований секретности, например, применение методики «светофора» - кодировка информации в виде световых обозначений достижения определенных уровней показателей, разработка системы доступа в виде паролей.

3. Страх сотрудников из-за возможности сокращения рабочих мест.

Следует учитывать, что любое изменение системы управления обязательно натолкнется на неприятие части персонала компании. В основном, предпосылками данной проблемы является страх сотрудников перед осознанием того, что повышение эффективности во многих случаях ведет к сокращениям рабочих мест. Данный факт необходимо заранее прогнозировать и управлять изменениями, вовлекая персонал компании в процессы развития – начиная с обсуждения целесообразности изменений и заканчивая их внедрением в каждом подразделении и на каждом рабочем месте. Ключевым моментом является планирование перераспределения высвобождающихся человеческих ресурсов, а не их сокращение.

4. Нежелание проводить какие-либо изменения.

Применение системы ABC подразумевает прозрачность в использовании ресурсов, следствием чего является изменение информационных систем всех уровней, что имеет значительное влияние на культуру всей организации; руководство компании может оказаться не готовым к таким серьезным преобразованиям. Необходимо заранее заручиться поддержкой менеджмента, представить в доступной форме все преимущества от совершенствования систем управления при контроллинге затрат, в том числе и для самих руководителей.

5. Нежелание изменять зоны ответственности менеджеров.

В большинстве компаний существует сложившееся распределение полномочий и ответственности между менеджерами функциональных подразделений. Процессный подход требует изменения зон влияния, что очень часто воспринимается негативно. Для успешного внедрения процессного управления, необходима поддержка изменений на уровне владельцев компании или топ-менеджеров. Только в этом случае можно будет разрушить функциональные связи, сформировать бизнес-процессы и повысить эффективность деятельности компании.

6. Отсутствие стимула к повышению эффективности системы контроллинга затрат.

Процессное управление, управление на основе ABC и ССП в совокупности являются эффективным инструментом контроллинга затрат на предприятии и тем самым инструментом повышения его конкурентоспособности. Однако, существующая в России ситуация в большинстве случаев не подразумевает конкуренцию: это касается таких отраслей как

нефтяная, газовая, автомобильная, госуправление и другие. С другой стороны, решение проблем конкуренции не всегда происходит открытым и честным способом.

Но существуют и положительные тенденции - банковская и телекоммуникационная отрасли, розничная торговля и другие уже активно идут по пути совершенствования процессов, потому что в этих отраслях уже достаточно сильная конкуренция, и предприятия вынуждены совершенствовать свои модели управления затратами. Можно отметить, что контроллинг затрат на основе совмещения ABC System и ССП - это инструмент, востребованный предприятиями, работающими на конкурентных рынках.

5. Поверхностное суждение российского менеджмента о ССП и ABC System как о новых инструментах контроллинга затрат.

При первом приближении ABC System характеризуется как более точная, но дорогая система калькулирования затрат, а ССП – лишь как инструмент декомпозиции стратегических целей. Существует также противоположная позиция: ABC System и ССП – инструменты контроллинга, способные решить все проблемы менеджмента, в том числе в сфере затрат. Такие поверхностные суждения могут привести к негативным последствиям.

Необходимо всестороннее изучение инструментов и анализ собственных возможностей.

6. Недостаточное количество и качество нормативно-справочной информации.

Данная проблема в первую очередь относится к совместному применению ABC System и BSC при контроллинге затрат. Решение проблемы явилось побудительным фактором написания данной работы.

7. Отсутствие полноценного русифицированного программного обеспечения, отвечающего всем требованиям организации.

Отсутствие полноценных русифицированных продуктов, а также их значительная стоимость снижают интерес российского менеджмента к их покупке и внедрению.

Однако возросший интерес к данным инструментам контроллинга ведет к росту количества программных продуктов, предлагаемых на российском рынке (следовательно, будет возрастать вариативность моделей), а также ведет к увеличению возможностей адаптации к конкретным условиям. На начальном этапе внедрения ABC System и ССП существует возможность применения общедоступных и недорогих программных продуктов, в результате чего могут выполняться такие задачи, как:

- построение бизнес-процессов предприятия;
- анализ экономического состояния хозяйствующего субъекта;
- выявление экономических проблем и анализ их причин;
- анализ предприятия на готовность к дальнейшим шагам внедрения;
- возникновение видения руководителей и менеджеров на требования к профессиональному программному продукту.

8. Отсутствие требований федерального уровня государственной власти к применению концепции контроллинга затрат.

Данная проблема потеряет свою актуальность при переходе отечественного учета на международные стандарты финансового учета. Уже сейчас происходит совершенствование нормативной документации, осуществляемого Министерством финансов Российской Федерации. В частности:

1) принят новый закон «О бухгалтерском учете», утвержденный Федеральным законом № 402 от 06 декабря 2011 года, вступающий в силу с 01 января 2013 года;

2) принято «Положение о признании международных стандартов финансовой отчетности и разъяснений международных стандартов финансовой отчетности для применения на территории Российской Федерации», утвержденные Постановлением Правительства РФ от 25 февраля 2011 года № 107.

Все рассмотренные факторы, определяющие возникновение научных и практических проблем применения ABC System и ССП и процессного подхода к управлению на российских предприятиях, а также пути их разрешения представим в виде рис. 1.

Таким образом, решение выявленных проблем позволит выстроить эффективную систему контроллинга затрат на предприятиях с учетом российской действительности.



Рис. 1. Факторы, определяющие возникновение научных и практических проблем применения ABC System и ССП и пути их разрешения

Библиографический список

1. Бьёрн А. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования / [пер. с англ. С.В. Ариничева] / А. Бьёрн; науч. ред. Ю.П. Адлер. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2007. – 272 с.

2. Каплан, Р. Функционально-стоимостной анализ. Практическое применение: [пер. с англ.] / Р. Каплан, Р. Купер. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. – 352 с.
3. Ковылкин, Д.Ю. Методические аспекты оценки привлекательности видов экономической деятельности / Д.Ю. Ковылкин, А.Ф. Плеханова, // Межотраслевой научно-практический журнал Интеграл. 2011. Вып. 4(60). С. 76–76.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

A.A. Ivanov, N.D. Ivanova

ACTIVITY-BASED COST SYSTEM AND BALANCED SCORECARD APPLICATION PECULIARITIES ON THE RUSSIAN ENTERPRISES

Premier-Product Ltd

Purpose: Searching the way of the Activity-Based Cost System (ABC System) and the Balanced Scorecard (BSC) application problems resolution in the Russian enterprises practice that will promote the increase of the companies' management interest to the cost controlling systems.

Methodology: Achieving the goal requires the work to build the classification of the problems of the ABC System and BSC application as the cost and staff control systems in Russian companies.

The results and their application area: The result of this study includes the main factors reveal that determine the scientific and practical ABC System and BSC application problems, and also the resolution ways.

Conclusions: The ABC System and BSC diffusion is possible only under the legislative assistance of their application, companies' management interest in providing the stakeholders with reliable economic information, and also with the reference information and software products produced domestically being in sight.

Key words: Activity-Based Cost System, Balanced Scorecard, cost controlling, ABC System application problems.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 329

А.А. Фоменков

СОВЕТСКИЕ СЛАВЯНОФИЛЫ И НАЦИОНАЛ-БОЛЬШЕВИКИ – ДВЕ ГРУППИРОВКИ «РУССКОЙ ПАРТИИ» В ПЕРИОД ЗАСТОЯ: ОБЩЕЕ И РАЗЛИЧИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Статья посвящена особенностям идеологии двух наиболее крупных группировок русистов (советских славянофилов и советских национал-большевиков) в период «застоя». Анализируются особенности идейных взглядов наиболее значимых представителей данных групп. Сделаны выводы о плюсах и минусах воззрений советских славянофилов и советских национал-большевиков. Выявлены основные точки соприкосновения в идеологии данных групп.

Ключевые слова: советские славянофилы, национал-большевики, «Молодая гвардия», «деревенщики», «просвещённое мещанство», «американизм духа», антисоциализм.

В настоящее время общепризнанным является факт существования в период «застоя» достаточно аморфного русского правого движения, которое исследователи часто именовали и именуют «новая русская правая» или «русская партия». Оба этих термина неточны, так как никакого единства среди «русистов» или «русофилов» (наиболее часто встречающиеся самоназвания) не было, кроме того, ряд деятелей этого направления никак нельзя причислить к традиционным правым. Во всяком случае, признанные правые П. Бьюкенен и Ж.-М. Ле Пен со многими их идеями никак не согласились бы. Отметим также, что обе рассматриваемые нами в статье политические группировки являлись по сути неформальными, поскольку не имели фиксированного членства и общепризнанных программных документов. Анализировать особенности их идеологических доктрин можно прежде всего по отдельным литературным и публицистическим статьям, в которых авторы выражали не только своё личное мнение, но также и взгляды своих единомышленников.

Представляется, что «русистов» 1960-х – 1985 гг. имеет смысл подразделить на несколько групп. В данной статье речь пойдёт о двух из них, являвшихся наиболее значимыми. Первую составляли по преимуществу представители творческой интеллигенции, хотя, разумеется, ими дело не ограничивалось. Определить данное направление русистов можно как советско-славянофильское.

Вторую группу можно обозначить как национал-большевистскую (к нынешней организации, возглавляемой Э.В. Лимоновым не имеет никакого отношения, да и связь с идеями Н.В. Устрялова тоже не стопроцентная). Придерживались данного направления не только представители творческих профессий, но также многие партийные и комсомольские деятели, офицеры силовых ведомств.

В числе наиболее ярких представителей советских славянофилов следует прежде всего отметить писателей-почвенников. Они, в отличие от шестидесятников-западников, старались не только разоблачать преступления партии, но и восстанавливать русские культурные традиции и даже христианские нормы нравственности: например, Ф.А. Абрамов (трилогия

«Пряслины», 1958–1973), В.И. Белов («Привычное дело», 1966; «Плотницкие рассказы», 1968; «Кануны», 1972–1976; «Лад», 1979–1981), В.А. Солоухин («Письма из Русского музея», 1966; «Чёрные доски», 1969), В.Г. Распутин («Деньги для Марии», 1967; «Последний срок», 1970; «Живи и помни», 1975; «Прощание с Матёрой», 1976), Д.М. Балашов (начавший с 1975 года печатать исторические романы под общим названием «Государи Московские»), В.А. Чивилихин (роман-эссе «Память», 1978–1984), В.В. Шукшин («Калина красная») и ряд других.

Поскольку большинство из этих литераторов болело судьбами наиболее русской части народа – деревни, сохранившей национальный характер и традиции, критики стали их называть «деревенщиками». И хотя это слово было им приклеено как пренебрежительное – со временем оно, под внутренним воздействием их искреннего талантливого творчества, потеряло этот оттенок. «Деревенщики» качественно углубили нравственный прорыв в области отхода от «соцреализма», возвращая обществу традиционные критерии добра и зла; тиражи их книг исчислялись многими миллионами, имелись в любой библиотеке и были доступны каждому. Деятельность этих писателей, начатая в период «оттепели», продолжилась и после её прекращения и стала едва ли не главным культурным достижением 1950-х – 1980-х годов. Большинство из них стали также активными участниками русского патриотического движения [1].

Разумеется, можно указать тексты, где позиция советских славянофилов выражена более рельефно. Относится это прежде всего не к книгам, а к статьям в «толстых» литературных журналах. Первым среди них следует упомянуть о «письме трёх» – статье в журнале «Молодая гвардия» (именно это печатное издание с подачи своего главного редактора А.В. Никонова стало во второй половине 1960-х годов идеологическим центром русофилов [2]) видных деятелей культуры Сергея Конёнкова, Павла Корина и Леонида Леонова. «Письмо» было озаглавлено «Берегите святыню нашу!» [3]. Художники с большим патетическим накалом, который определил стиль патриотической публицистики на три десятилетия вперед, призывали к бережному отношению к русской культуре, под которой они понимали прежде всего культуру дореволюционную. Авторы требовали покончить с разрушением памятников древности, особенно при плановой застройке городов. В статье говорилось о необходимости сохранения и реставрации церквей и монастырей, внимания к старинной русской истории. В отношении атеистического режима, не поощрявшего объективного изучения истории вообще, а дореволюционной российской истории в особенности, этот текст был дерзостью, но санкций не последовало. В результате «молодогвардейцы» (то есть, редакционная коллегия журнала «Молодая гвардия») осмелели и в 1966–1969 годах дали очередь «почвенных» статей (например, «Просвещённое мещанство», «Великие искания», «Неизбежность» [4]), из-за которых журнал пострадала уже в начале 1970-х годов.

Авторами «почвенных» статей являлись Виктор Чалмаев, Юрий Иванов, Павел Глинкин, Михаил Лобанов, Анатолий Ланщик и др. Представляется, что уместнее рассмотреть взгляды «молодогвардейцев» на примере работ В.А. Чалмаева и М.П. Лобанова, тем более что обоих авторов можно даже отнести к наиболее радикальным советским славянофилам.

В целом следует признать, что наиболее ярые советские славянофилы, с одной стороны, выступали за возвращение к русским духовным традициям (что никак нельзя оценивать отрицательно), с другой же, объективно шли против реальной действительности. В самом деле, в СССР в 1960-е годы уже всюду строилось де-факто общество потребления, в связи с чем ограничения на использование ряда товаров могло привести к бунтам. Перечень различных народных выступлений в СССР приведён, в частности, российским историком В. Козловым в его монографии об указанном явлении [5]. Как следствие, критика «американизма духа» и тому подобная очень хорошо выглядит «на бумаге», но на практике она вряд ли была актуальна. Утрируя, несовершенство подобных идей можно проиллюстрировать следующим способом. Пункт А. Дом, в котором живёт человек, должен быть построен в классическом

русском стиле или хотя бы с его элементами. Можно ли с данным положением согласиться!? Вполне. Пункт Б. Снабдить свой дом холодильником и прочими вещами, облагораживающими быт – это «просвещённое мещанство», «американизм духа» и т.п. Видимо, идея о том, что в доме, построенном в традиционном русском стиле, может находиться современная бытовая техника, не приходила в голову радикальных советских славянофилов.

Заметим также, что острые стрелы в адрес приобщающихся к западному образу жизни по большей части были направлены против самого западного образа жизни. Указанное обстоятельство не могло ни вести в тупик. В самом деле, а где была альтернатива? Это, судя по всему, понимал даже И.В. Сталин. Не случайно в СССР во многом заимствовали опыт Голливуда, яркими примерами чего могут служить киноленты «Волга – Волга», «Весёлые ребята» и многие мультипликационные фильмы. Последние по большей части параметров сходны с диснеевскими. В этой сфере СССР во многом даже обошёл своих «учителей», что объясняется огромным культурным пластом, накопленным за многовековую русскую историю. В архитектуре успехи были более скромными (имеется в виду опыт строительства сталинских высоток как ответ на небоскрёбы), однако сама тенденция была налицо и в этой сфере. Да и своя массовая культура, тоже по-своему пытавшаяся соответствовать западным стандартам, в СССР имела. При этом наличествовал в стране также массовый зритель и слушатель (одно из следствий урбанизации), которому как раз и требовались продукты масскульта по причине простоты восприятия таковых [6]. Отметим также, что отечественная массовая культура представляла собой по большей части «периферийный вариант обобщённого стандарта городской общеевропейской культуры» [7].

Отсюда вывод – альтернативный стиль советские славянофилы не предложили, а, следовательно, у них отсутствовало полноценное политическое будущее. Критические стрелы во многом были верны (хотя и далеко не во всём), в то время как их видение правильного образа жизни в СССР вряд ли было обречено на понимание большинством граждан.

Вряд ли следует согласиться с мнением о том, что советские славянофилы являлись антисемитами. Еврейский вопрос в целом интересовал их мало, так как главным вопросом, судя по всему, для них являлся русский. В то же время в отдельных случаях можно утверждать, что «еврей» для данной группы русистов был противником из категории политической (подобное выражение заимствовано нами у видных историков В.Г. Сироткина и В.В. Кожина, писавших, правда, про иную эпоху [8]), а не национальной. Прежде всего указанный тезис применим к борьбе с изменением архитектурного облика исторической части Москвы. В данном случае советские славянофилы отмечали этнический состав архитекторов (М.Я. Гинзбург, В.Г. Гельфрейх, Б.М. Иофан, В.А. Минкус, Л.З. Чериковер, З.М. Розенфельд, М.В. Посохин, Л.Б. Лунц, В.Г. Макаревич и др.), однако ни в коем случае не считали своими противниками всю еврейскую общину Москвы и, шире, СССР. И уж тем более у советских славянофилов не было планов «окончательного решения еврейского вопроса».

Наиболее слабым местом данной группы русистов можно признать пропагандируемую ими нелюбовь к «просвещённому мещанству». Означенному феномену трудно дать точное определение, однако в целом под ним следует понимать стремление к повседневному комфорту и излишне спокойной жизни. Если мерить категориями революционной ситуации или военного времени, то указанная жизненная позиция вряд ли может вызвать уважение, однако в условиях складывания в СССР общества потребления такого рода критика делала позиции советских славянофилов весьма уязвимыми. Вместе с тем, данная позиция сближала советских славянофилов с национал-большевиками, так как, несмотря на комфортность собственного быта, большинство последних активно поносили «просвещённое мещанство». Отметим также, что экономические вопросы мало занимали русистов (данные проблемы стояли в их идеологии едва ли на десятистепенном месте), но в целом они выступали за социалистическую экономику с национальной спецификой [9].

Относительно второй из обозначенных нами категорий русистов отметим, что одним из наиболее ярких её примеров являлась так называемая «группа Павлова» (имеется в виду С.П. Павлов – первый секретарь ЦК ВЛКСМ (1959–1968), а затем председателя Госкомспорта СССР (1968–1975)). Считается, что в период руководства комсомолом указанный советский государственный деятель создал своего рода группировку прежде всего из числа собственных подчинённых. Идеалы данной группы являлись весьма эклектичными. С одной стороны, С.П. Павлов и его сторонники считали необходимым прививать у молодёжи интерес к трудам классиков марксизма-ленинизма [10], при этом уделяя большое внимание роли наследия русской культуры в воспитании подрастающего поколения [11]. Разумеется, они мыслили категориями советского патриотизма, не признавали никакого иного выбора, кроме социалистического. Никакого антисемитизма в своих публичных выступлениях «павловцы» не допускали, но сионизм клеймили весьма активно. Из противников внутри СССР одним из наиболее важных для них был журнал «Юность» [12]. Судя по всему, самая радикальная составляющая их идей ими публично не афишировалась.

В целом имеет смысл утверждать, что идеи «группы Павлова» основывались на «красном патриотизме» времён Гражданской войны, романтическом милитаризме периода «десяти сталинских ударов» (именно милитаристическая компонента по замыслу «павловцев», видимо, была призвана спасти советское общество от морального разложения), антисемитизме послевоенного времени, этнонационалистических мечтаниях о подавляющем доминировании этнических русских во всех сферах государственной и общественной жизни СССР, радикальном антизападничестве [13]. Из числа самых ярких национал-большевистских текстов периода «застоя» следует выделить возникший в рамках «Университета молодого марксиста» «Устав нравов», автором которого являлся В. Скурлатов, и роман видного советского литератора И. Шевцова «Тля» [14] (последний написан ещё в период «оттепели», однако взгляды автора уже в тот период были типично национал-большевистскими).

Относительно «Устава» укажем, что он был написан в 1965 году. Первый вариант этого документа состоял всего из восьми пунктов [15], исправленный и дополненный – из десяти [16]. Отметим также, что «Устав нравов» получил известность во многом благодаря помощи, оказанной сподвижниками его автора А.М. Рогановым, А. Вельшем, Ю. Жевлюком и Ю. Самсоновым [17].

Несмотря на небольшой объём, указанный документ весьма интересен по содержанию. Несколько постулатов его можно охарактеризовать как националистические – «следует решительно отмежеваться от разумного эгоизма, а в центр поставить сердце, голос крови», «связать эту борьбу с космической миссией своего народа», «первое место в истинном «моральном кодексе» должен занимать долг перед своими предками и потомками, долг перед своим народом». Отдельные положения представляют собой гимн милитаризму, причём далеко не в лучшем его проявлении – «продумать комплекс военизации молодёжи, начиная с начальной школы», «нет более подлого занятия, чем быть «мыслителем», «интеллигентом», премудрым пескарём, и нет более благородного дела, чем быть солдатом». Не обошлось и без древнеарийского влияния – «Для страховки нравственной чистоты народа следует придумать поощрение различным видам стратификации, кастования». Некоторые фразы выглядят вполне идеологически нейтральными – например, «С ранних лет увлекаться спортом», иные же – бредово («Лучшее половое воспитание – воспитание любви к Родине»). Имелось и откровенно средневековое мракобесие – «Не останавливаться вплоть до рекламы старинных крестьянских обычаев... телесные наказания отдающимся иностранцам, клеймение и стерилизация их». Учитывая то обстоятельство, что данный текст был во многом пронизан фашистской эстетикой и вызывающе милитаристским духом, «Устав нравов» на Западе часто

именовали первым документом русского фашизма [18]. Данная трактовка, естественно, «перекочевала» на страницы русскоязычных книг по этой проблеме [19].

Такого рода оценка, хотя и выглядит спорной, но, несомненно, имеет право на существование. Вместе с тем следует признать, что документ с подобной тональностью должен был неминуемо появиться в условиях начала складывания в стране общества потребления и превращения традиционной советской идеологии в несоответствующую запросам времени. В этой связи симптоматично, что «Устав нравов» возник в рамках «Университета молодого марксиста». Да уж, «кастование», «голос крови», «космическая миссия своего народа» – понятия в высшей степени марксистские! Впрочем, иного варианта «тюнинга» марксизма-ленинизма применительно к подрастающему поколению советских граждан, кроме как смеси из солдафонских и ксенофобских идей, многие партийно-советские деятели не видели. Отметим также, что в «Уставе нравов» ничего не говорилось о межнациональных отношениях, равно как и не рассматривались русские патриотические идеалы [20].

Необходимо подчеркнуть, что крайне важной составляющей национал-большевизма периода «застоя» был антисиионизм, что было особенно очевидно по тексту упомянутого нами романа «Тля». С одной стороны, борьба с сионизмом являлась одним из наиболее значимых проявлений антиамериканизма, так как в главном противнике СССР в «холодной войне» – США – еврейское лобби обладало и обладает огромным влиянием. С другой стороны, в СССР декларировались «дружба народов» и «создание новой общности – советский народ», то есть антисемитизм (несмотря на его наличие в закамуфлированной форме) не приветствовался – пример чему наличие в уже упомянутом выше романе «Тля» положительного героя-еврея. Однако для желающих антисемитизм можно было с лёгкостью замаскировать под антисиионизм.

Кроме того, патриотизм национал-большевиков отличался значительно большей казённостью, нежели патриотизм советских славянофилов. В определённой степени имеет смысл утверждать, что в основе патриотизма национал-большевиков лежала любовь к государству, самому большому и могущественному в мире, в то время как основой советского славянофильства была любовь к русскому народу и традиционному ландшафту его обитания (как естественному, так и искусственному). В определённой степени можно даже утверждать, что советские национал-большевики в первую очередь были именно БОЛЬШЕВИКАМИ (то есть советскими коммунистами), и лишь во вторую очередь являлись сторонниками русских националистических идей.

Разумеется, в некоторых случаях провести грань между национал-большевиками и советскими славянофилами было сложно. Наиболее яркие примеры – художник И.С. Глазунов и писатель А.А. Проханов. С одной стороны, русская составляющая в их произведениях и их деятельности была несомненно сильна (вдобавок оба они ни дня не состояли в КПСС – для Советского Союза, где не существовало никакой легальной возможности сделать карьеру, не состояв в партии, эти случаи выглядят почти фантастично), а, с другой стороны, оба они воспевали Империю (символично, что А.А. Проханова часто называли «соловей Генштаба» [21], а одно из его произведений, пусть и поздних, называется «Последний солдат империи» [22]).

Приблизительно столь же неявная грань между советским славянофильством и национал-большевизмом наблюдалась и у видного литератора С.Ю. Куняева. Так, например, фрагмент в его воспоминаниях о феномене «внутренней эмиграции» вполне можно считать типичным для советских славянофилов. Никакой КПСС, никакой казёнщины, только типично русские образы (деревня староверов под Архангельском и т.п.). Можно указать, что подбор даже сверхрусский, если такое вообще возможно (староверы до революции были едва ли не самой продвинутой частью великорусского этноса; люди, сохраняющие достоинство, что, кстати, вполне объяснимо – в тех краях никогда не было крепостного права; северные пейзажи, практически нетронутые техническим прогрессом). При таком описании «внутренняя

эмиграция» [23] обозначена С.Ю. Куняевым едва ли не как бегство от имперской казённости к себе домой, на настоящую Родину. В то же время читателю доступен и совсем другой С.Ю. Куняев – ярый противник творчества В.С. Высоцкого [24] и человек, критикующий русских национально мыслящих диссидентов за их антиимперскую позицию [25]. То есть, по сути для такого С.Ю. Куняева государство первично, а русский народ – вторичен. Именно такой подход, как уже отмечалось нами, характерен для национал-большевиков.

Резюмируя, следует признать, что в период «застоя» имели место попытки создания русской национально ориентированной идеологии. При этом между различными направлениями русской националистической мысли ещё отсутствовали антагонистические противоречия. Мало того, порой даже сами различия были неочевидны для сторонних наблюдателей.

Библиографический список

1. **Назаров, М.** Вождю Третьего Рима: к познанию русской идеи в апокалипсическое время / М. Назаров. – М.: Русская идея, 2005. С. 347–348.
2. **Лебедев, С.В.** Русские идеи и русское дело. Национально-патриотическое движение в России в прошлом и настоящем / С.В. Лебедев. – СПб.: Алетейя, 2007. С. 279–280.
3. Берегите святыню нашу! // Молодая гвардия. 1965. № 5. С. 216–219.
4. **Лобанов, М.** Просвещенное мешанство // Молодая гвардия. 1968. № 4; Чалмаев, В. Великие искания // Молодая гвардия. 1968. № 3; Чалмаев, В. Неизбежность // Молодая гвардия. 1968. № 9.
5. **Козлов, В.А.** Массовые беспорядки в СССР при Хрущеве и Брежневеве / В.А. Козлов. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – 143 с.
6. См., напр.: Фролов, Д.П. Попса: упрощение институции и искусства / Д.П. Фролов // Экономическая социология. 2007. Т. 8. № 4. – С. 66.
7. **Соловей, В.** Русский миф / Валерий Соловей // Нева. 2007. № 2. С. 157.
8. **Сироткин, В.Г.** Вехи отечественной истории: Очерки и публицистика / В.Г. Сироткин. – М.: Международные отношения, 1991. – С. 52; Кожин, В.В. Черносотенцы / В.В. Кожин. – М.: Изд-во Эксмо, Изд-во Алгоритм, 2004. – С. 212.
9. **Лебедев, С.В.** Указ. соч. – С. 286.
10. Российский государственный архив социально-политической истории (РГАСПИ). – Ф.1-М. – оп. 34. – д. 17. – л. 33.
11. См., напр., РГАСПИ. – Ф. 1-М. – оп. 32. – д. 1152. – л. 96 – 102; РГАСПИ. – Ф. 1-М. – оп. 34. – д. 234. – л. 3, 25–26.
12. См., напр.: РГАСПИ. – Ф. 1-М. – оп. 34. – д. 17. – лл. 28, 58, 59.
13. **Митрохин, Н.** Русская партия: движение русских националистов в СССР. 1953–1985 годы / Н. Митрохин. – М.: Новое литературное обозрение, 2003. – С. 249.
14. **Шевцов, И.** Тля. Роман-памфлет / И. Шевцов. – М.: Советская Россия, 1964. – С. 150.
15. ЦАОПИМ. – ф. 4. – оп. 111. – д. 136. – лл. 14–16.
16. Там же. – лл. 17–19.
17. Там же. – лл. 11–12.
18. **Митрохин, Н.** Указ. соч. – С. 294.
19. См., напр.: Дейч, М. Коричневые / Марк Дейч. – М.: ТЕРРА – Книжный клуб, 2003. – С. 60.
20. **Кожевников, А.Ю.** Национально-патриотические течения в русской интеллигенции 1950-х – первой половины 80-х гг.: дисс.... канд. ист. наук: 07.00.02 / Ю.А. Кожевников. – М., 2004. – С. 69.
21. **Куклин, И.** Реакция диссоциации: легитимация ультраправого дискурса в современной российской литературе // Русский национализм: социальный и культурный контекст; сост. М. Ларюэль. – М.: Новое литературное обозрение, 2008 – С. 290.
22. **Проханов, А.** Последний солдат империи / А. Проханов. – М.: Ad Marginem, 2003. – 510 с.
23. **Куняев, С.** «Не сотвори себе кумира...» Статьи и дневники эпохи перестройки / С. Куняев. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1990. С. 57–60.
24. **Митрохин, Н.** Указ. соч. – С. 544.

25. Куняев, С. Поэзия. Судьба. Россия / С. Куняев // Наш современник. 1999. № 3. С. 176.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

A.A. Fomenkov

**SOVIET SLAVOPHILS AND NATIONAL-BOLSHEVIKS –
TWO GROUPS OF «RUSSIAN PARTY» DURING STAGNATION PERIOD:
THE GENERAL AND THE DIFFERENCE**

Nishny Novgorod state university n.a. N.I. Lobachevsky

Subject, theme, purpose of the work: The article covers the ideological peculiarities of the two largest groups of rusists (Soviet slavophils and Soviet national-bolsheviks) in stagnation period.

Methodology: The methodology is based on the historical–descriptive analysis.

The results and their range of application: There are analyzed the specifics of ideological views of the most significant representatives in the above groups.

Value: The basic points of coincidence in the ideology of the said groups are revealed herein.

Conclusions: The conclusions are made on negative and positive aspects of Soviet slavophils and Soviet national-bolsheviks' opinions.

Key words: Soviet slavophils, national-bolsheviks, «Young Guard», «country upholders», «educated petty bourgeoisie», «americanistic spirit», anti-Zionism.

УДК 100.199

Ю.В. Смирнов¹, С.В. Малов²**РЕАЛИЗМ В ФИЛОСОФИИ И МЕТОДОЛОГИИ ИСТОРИИ:
ПРОБЛЕМА РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТА**УМЦ по ГОЧС Нижегородской области¹,
Нижегородская государственная медицинская академия²

Предметом анализа в настоящей статье является реализм в философии и методологии истории, его основные проблемы, которые возникают при осмыслении вопросов реконструкции объекта исторического познания. Исследуются различные методологические подходы в рамках профессиональной историографии и философии истории, их основоположения, чтобы выявить основные проблемы, возникающие при осмыслении вопроса относительно возможности реконструкции объекта исторического познания. В ходе анализа делается попытка осмысления возможностей исторического реализма и его основных противоречий.

Ключевые слова: реализм, позитивизм, неокантианство, герменевтика, постструктурализм, история, объект, психологизм, образ прошлого, общезначимость, эффект реальности.

Принято считать, что исходными посылками исторического исследования (какой бы методологии ни придерживался историк) являются следующие методологические позиции. Во-первых, мысль о наличии специфического предмета исследования. Во-вторых, - о том, что этот предмет, каким бы специфическим он ни представлялся, подлежит такой реконструкции, которая бы не противоречила в основных своих чертах нормам нововременной рациональности. В-третьих - мысль о том, что реконструируемый объект подлежит целостному охвату (независимо от методологических проблем, которые при этом появляются) и вследствие этого обладает имманентными ему, независимыми ни от чего внешнего по отношению к нему законами, тенденциями, определяющими его существование [1, с. 5–6]. Нас интересуют две взаимосвязанные проблемы: проблема осознания историей своего объекта и вытекающая отсюда проблема его реконструкции в рамках общезначимой интерпретации. Эти вопросы могут быть рассмотрены и проблематизированы в рамках полемического сравнения разнообразных методологических подходов в философии и методологии истории, основывающихся как на реалистических, так и на конструктивистских по отношению к онтологическому статусу предмета познания положениях.

Говоря о реалистической методологии как о методе репрезентации исторической наукой своего предмета, следует заметить, что его основные черты связаны с методологией позитивизма, появившегося в XIX веке, опиравшегося на нормы научности Нового времени. Ее оформление было сопряжено с такими проблемами, как выделение части сущего в качестве особенного предмета изучения, выработка метода, позволяющего достоверно его интерпретировать в рамках норм классической рациональности. В итоге продолжительного периода формирования, сопровождавшегося становлением и кризисом философии истории, философия в союзе с профессиональной историографией выработала понятие о предмете исследования, равно как и о чертах, которые должны быть присущи методу его реконструкции.

1. Историческая наука не является метафизикой, ее предмет может быть верифицирован. Сторона сущего, изучаемая историей, не может быть редуцирована к природе, ибо ее сущность выявляется в развитии [2, с. 68–69].

2. Задачей исторической науки становится объективная (=беспристрастная, как в естественных науках) реконструкция фактов прошлого в их развитии (так, как это было на самом деле), которая достигается за счет критики источников, как полагал, к примеру, немецкий историк Леопольд Ранке. Согласно немецкому историографу, «сущность явлений

скрыта от исследователя... история, как и естественные науки, стремится проникнуть в глубокую суть явлений, а не ограничивается только сбором фактов» [3, с. 148–150].

3. Беспристрастность знания достигается за счет опоры на факты источников, методы их критики, а также – формально-логические средства мышления.

Суммируя все это, важно отметить, что, формулируя методологические основания специфики своей предметности и метода, историческая наука и философия XIX века допустили следующие исходные посылки в рамках профессиональной парадигмы. Во-первых, предметом изучения исторической науки является «прошлое» общества или факты прошлого. Данное изучение приводит к выявлению их сущности, причинно-следственных связей между ними (позитивизм), а также их имманентного смысла (неокантианская историография) [4]. Во-вторых, вышперечисленное знание выводимо из исторических фактов, получаемых из источников путем их рациональной филологической критики. Все специфически исторические методы не противоречат нововременной рациональности, опиравшейся на формальную логику. В-третьих, знание прошлого должно было привести к осознанию направленности развития общества. В то же время признается, что его проблематично осуществить вследствие социально-политической ангажированности труда историка. Получается, что метод плюс свободный от предрассудка разум ученого являются мостиком между ним и *пред-метом* его изучения. Можно выявить следующие противоречия, с которыми столкнулась классическая историография, претендующая либо на толкование прошлого как предмета изучения, либо на построение «охватывающих законов» истории, когда будущее дедуцируется из прошлого. Во-первых, сам онтологический статус **«прошлого»** как объекта (ob-jectum) (или **пред-мета**, что эквивалентно) предполагает, что прошлое *пред-лежит* субъекту познания, открываясь его тотальному господствующему взору [5, с. 70-71]. Однако прошлое не может быть дано нам как таковой объект, ибо оно есть то, «чего уже нет». Следовательно, исходя из данной трактовки, история проблематична как наука о «жизненном мире», поскольку ее предмет эмпирически непознаваем. Во-вторых, факты как предмет рациональной интерпретации не могут быть получены «как они были», поскольку историк располагает не самими фактами, а сведениями о них. В-третьих, знание о направленности развития и прогрессе не может быть получено посредством индуктивных обобщений и цепочек причинно-следственных связей. Сам историк, по замечанию Г. Г. Гадамера, является включенным в предмет своего исследования, в отличие от своего коллеги-естественника, и поэтому на всестороннее и объективное прочтение своего предмета претендовать не может [6]. А историография не является архивом, музеем или бесконечной кладовой исторической памяти, наоборот, она связана прагматическими нитями со своим предметом [7]. Причем требование подобной объективности исследования приводит, во-первых, к торжеству психологизма, как способа понять «чужую одушевленность» (перенесение категорий историка в прошлое). Во-вторых, – к абсолютизации познавательных возможностей человека, связанной со стремлением отказаться от влияния любых традиций, субъективных точек зрения ради торжества идеала объективности. «Генетический детерминизм» – одна из форм проявления этой абсолютизации, когда историк, движимый идеей понять «истоки» того или иного явления, по существу, игнорирует природу самого явления, которое может конструироваться на невыводимых ниоткуда основаниях. Подобного рода наложение идеи причинности на исторически событийный ряд является следствием естественной установки нашего мышления, конструирующего генетическую связь явлений поверхностно, не изучая самого явления, которое может покоиться на невыводимых ниоткуда основаниях. Торжество психологизма, по мнению А.Л. Юрганова приводит к подмене изучаемого феномена руководящей точкой зрения исследователя, что в свою очередь приводит к конструированию изучаемого факта исследователем. Позитивистский метод постижения истории неизбежно ведет к признанию принципа единообразия в психической деятельности человека, за счет чего он способен выйти за границы фактов, данных ему фрагментарно, однако это грозит опасностью перерастания позитивизма как типа исторического реализма в неявный конструктивизм. Так, А.Л.

Юрганов считает, что, поскольку позитивистский идеал полностью верифицированного знания прошлого недостижим, поскольку мы имеем в виду лишь разрозненные факты источников, которые суть точки зрения современников этого прошлого на описываемые события. Поэтому историк имеет дело не с самой реальностью, а с ее образом, смыслом, другими словами, «в историко-антропологическом рассмотрении истории предмет определяется как образ прошлого, который «в результате наших настойчивых усилий создается из дошедших до нас посланий исторических источников» [7].

Получается, что у истории как науки два пути: либо утверждать, что факт прошлого и его смысл уже дан в историческом источнике (в таком случае его остается лишь установить, отделив существенное от несущественного), либо признать, что его отражение заведомо неполно, поскольку далеко не всегда тот или иной памятник или документ изначально задумывался как источник. В последнем случае интерпретация прошлого подразумевает, что объект познания существует не как целостный объект, а в разрозненных и зачастую бессистемно данных нам артефактах, с чем и сталкивается историк на начальных этапах своей работы. Таковое понятие интерпретации подразумевает, что целостное знание историка о предмете изучения не дано заранее в источнике, а является результатом его исследовательской фиксации, действующей как общенаучные, специфически-исторические методы, категории, так и личный исторический и жизненный опыт историка. Искомый смысл события является результатом снятия противоречия между историком и объектом интерпретации, как своим и чуждым, доступным для непосредственного понимания и скрытым. Интерес историка делает возможным освоение разрозненных артефактов и формулирование исследовательской проблемы, структурирующей предмет исследования. Реальность предмета интерпретации есть упомянутое ранее натяжение между объектом и субъектом, поскольку предмет исследования открывается историку в той мере, в которой он способен своим разумом, личным, общекультурным опытом «высветлять» искомую сущность объекта, не данную ни в опыте, ни в артефактах.

Другими словами, данный подход предполагает диалектику тождественного и иного, когда субъект и объект познания онтологически равны друг другу, а объект познания является «иным» субъекта, его минувшим состоянием. Процесс познания представляет собой процесс погружения в реальность своего **Иного**, вводящий наличные изначально предпонятия, руководящие точки зрения в игру, цель которой истолковать феномен прошлого в процессе их различения с собственными предрассудками, когда субъект познания одновременно равен и неравен ему (осознает себя принадлежащим ему и выходящим за его пределы), фиксируя его реальность как результат различения себя настоящего и бывшего (прошлое и настоящее субъекта познания). «Приступая к исследованию, историк имеет некоторое первоначальное представление о проблеме, почерпнутое из своего или чужого опыта» [9, с. 15]. «Мыслить исторически, – писал Х.-Г. Гадамер, – значит проделать те изменения, которые претерпевают понятия прошедших эпох, когда мы сами начинаем мыслить в этих понятиях. Историческое мышление всегда и с самого начала включает в себя опосредование этих понятий с нашим собственным мышлением» [6]. Однако проблематичным в данном случае является полное и адекватное знание о прошлом в его развитии, поскольку абсолютным знанием может обладать лишь Абсолютное, трансцендентное историческому миру сознание. Выходит, что знание о прошлом не может исключать субъекта, формулирующего понятие о прошлом, исходя из ряда развития, который построен на основании некоторых онтологических допущений о связи прошлого и настоящего, ценностях и целях развития, о современной исследователю эпохе, которая информационно шире его индивидуальных познавательных возможностей.

Получается, что метод эмпирических обобщений, культивируемый в XIX веке позитивизмом, не мог быть «позитивен» для самой исторической науки и требовал в качестве дополнительного какого-то другого метода (например, герменевтического), не связанного с нормами рациональности парадигмы, принимавшей за основу исследования эмпирическую логику. Нормы научности настаивали на том, что история как позитивная наука должна вы-

водить свое знание из фактов, вступая в противоречие с интенциями самой историографии по поводу своего предмета как не поддающегося всецело такой интерпретации.

Можно отметить ряд мыслителей, пытавшихся обойти эту проблему и тем самым завершить теоретическое обоснование научности истории. Это, во-первых, баденская школа неокантианства в лице Г. Риккерта, выдвинувшего идею индивидуализирующего метода. В основе его концепции лежит положение, согласно которому «исторический мир» есть точка зрения на действительность, акцентирующая внимание на уникальное в отличие от генерализирующего метода естественных наук. Данный исторический мир состоит из коллективных индивидуальностей, которые обладают как внутренней, так и внешней в их отношении целесообразностью (например, эпоха Возрождения может познаваться и как изолированный, и как связанный с другими событиями феномен). Однако здесь возникает закономерный вопрос о том, как возможно познание этой целесообразности в рамках упомянутой выше проблемы взаимодействия субъекта и объекта исторического познания. Г. Риккерт полагал, что это достигается путем процедуры отнесения к ценности, когда субъект способен уяснять внутренние цели и идеалы той или иной эпохи и тем самым переходить к более или менее ее аутентичному описанию [10]. В рамках такого подхода у неокантианства нет слабых сторон, поскольку возможность такого подхода уже реализована, в частности, П. Бицилли и Л. Карсавиным, задействовавшими метод «среднего человека» при синхронистическом описании эпохи Средневековья. Трудности начинаются при попытке обосновать и познать взаимосвязь этих коллективных индивидуальностей в историческом времени. Проблематично построить такую телеологию, которая бы раскрывала единственно верную цель их развития и в то же время была бы связана с внутренней логикой развития исторических индивидуальностей. Неизбежным становится навязывание внешней по отношению к ним цели или ценности, которой для Г. Риккерта становится идея свободы, все более актуализировавшаяся в его современности. Поэтому теория истории неокантианцев оказывается неспособной преодолеть противоречие конечного субъекта познания и объекта познания, как бесконечной во времени и пространстве исторической реальности.

Внесение идеальной цели в развитие наличного бытия характерно и для К. Маркса, связывающего актуализацию цели исторического процесса с разрешением традиционной гегелевской дилеммы необходимости и свободы и самопознанием передового класса - пролетариата. По словам В. Асмуса, «в устах К. Маркса известный тезис Бэкона, отождествлявший знание с силой, превращается из частного принципа технологии... в совершенно универсальный принцип теории познания, в том числе познания исторического» [11, с. 190]. Это означает, что для К. Маркса характерно стремление поставить объективные законы истории на службу обществу, используя их для достижения идеалов жизнеустройства, которые бы априори разделялись всем человечеством. Однако К. Маркс неизбежно впадает в субъективизм, постулируя, что направленность истории совпадает с интересами «передового класса, представляя частное как всеобщее. Ввиду этого становится неизбежным конструирование субъективного ряда развития, вносимого в исторический процесс лидерами «авангардного класса». Налицо примат должного над сущим, и последующая достройка смысла и направленности исторического процесса. Выражаясь терминами М. Хальбвакса, К. Маркс, делая историческую науку основой социального действия (освобождения пролетариата), задает систему координат социальной памяти, в рамках которой история представляет собой лишь процесс борьбы классов, таким образом, история как процесс задается социальной памятью победившего пролетариата [12]. Таким образом, реконструкция прошлого всегда связана с проблемой социальной власти, ее классовым характером, так как именно победивший в социальной борьбе класс задает рамки социальной памяти, задавая нормы общественной традиции, которая отбирает, что достойно, а что нет общественного запоминания. Это характерно не только для страны победившего пролетариата, но и для предшествующей историографии, в рамках которой история была лишь способом созерцательного отношения к процессу развития, формой отчуждения человека от его подлинных целей и задач в истории.

Альтернативой был метод описательной психологии В. Дильтея, предполагающий, что познание прошлого выстраивается по аналогии с познанием чужого сознания. Постигая чужое сознание, историк может уяснить его суть, основываясь на объективациях последнего в общественной жизни: речи, практической и прочей деятельности. Конкретный индивид, согласно В. Дильтею, есть носитель всеобщей цели, наличие которой и конституирует культуру как единый организм, систему. По словам немецкого философа истории, «любое единичное жизнепроявление репрезентирует в царстве духа нечто общее» [13, с. 192]. Именно поэтому возможно понимание не только конкретной личности, но и целого общества, исходя из анализа массы индивидуальных проявлений той системы отношений, которая задается идеальной нормой, целью существования данного общества. Немецкий мыслитель подмечает следующие проблемы исторического метода: трудность фиксации в понятиях системного анализа исторического как постоянно становящегося, сложность постижения истории в целом, а также сложности, возникающие при попытке субъекта познания добиться совпадения личного и коллективного опытов исторической реальности. По В. Дильтею, «образование понятий в науках о духе не фундировано нормами или ценностями... оно возникает в ходе движения, господствующего над всем понятийным мышлением и направленного на выявление в изменчивом потоке устойчивого и постоянного» [13, с. 192]. Первая проблема разрешается посредством указания на то, что каждая эпоха имеет свои органические, определенные господствующей ценностью рамки, отделяющие ее от другой эпохи. Однако во втором случае возникает проблема согласования конструируемого ряда развития индивидуально-стей, который, никогда не может быть завершен, и самих культурных организмов прошлого, суть которых должна необходимо уясняться из целого как итога развития. Последнее, как было указано, недостижимо для дильтеевской методологии истории, стремящейся порвать с конструирующей историческую реальность метафизикой Гегеля. Другая трудность возникает, когда исследователь пытается обосновать познание прошлого, опираясь на герменевтический метод. Понимание прошлого только тогда приводит к результату, когда в прошлом настоящего есть тождественное нам сознание. Познавательная конструкция немецкого интеллектуала покоится, поэтому на недоказуемой посылке об общности человеческой природы, что противоречит историческому взгляду на мир. Также важен отмеченный В. Дильтеем исток исторического чувства: стремление человека познать смысл собственного существования пред лицом неожиданной смерти, постоянная близость которой и заставляет субъекта задаваться вопросами о смысле личного бытия. «Любое единичное жизнепроявление репрезентирует в царстве этого духа нечто общее» [13, с.192]. Представление об истории как биографии личности переносится на коллективный субъект и, следовательно, возникает история как наука, выполняющая функцию самопознания общества. Слабым местом теории В. Дильтея является отсутствие конкретного способа осуществления такового познания, вследствие чего подобную философию и теорию истории можно открыто назвать субъективистской.

Данные проблемы являются производными того, что термин *«реализм»*, претерпевший многовековое развитие в рамках европейской культуры, происходит от позднелатинского *«realis»* – материальный, вещественный, производного от *«res»* – вещь. Поэтому исторический реализм означает стремление не просто эксплицировать объект в рамках общих понятий и суждений, но и представить его как конкретное жизненное единство, «жизненный мир», который может быть эмпирически, как объект восприятия. Однако даже при подобной предпосылке реализм в историографии сложно реализуем, поскольку объект упомянутой интерпретации, будь то процесс или отдельная историческая эпоха, не дан непосредственно исследователю. Кроме того, с точки зрения здравого смысла и понимания термина «объект» (брошенное перед кем-то), становится проблематичным говорить о каком бы то ни было реалистическом объяснении-описании объекта, принадлежащего в основном прошлому либо данному лишь фрагментарно.

Проблема осложняется еще и тем, что историк, претендуя на определение исторической реальности в рамках исторического реализма, неявно предполагает наличие в своем ис-

следовательском сознании метапозиции. Она позволяет ему выйти за пределы изучаемого им объекта «история», сравнить этот объект с объектом «природа» и так далее, чтобы претендовать на определение того, в чем состоит специфика его предмета исследования (И почему то, что он исследует, не есть предмет естествознания и не может им полностью быть?). Это, несомненно, философско-реалистическая предпосылка конкретно-исторического исследования, которая неявно присутствует во всяком историческом исследовательском тексте. Она является метафизическим условием историко-научного исследования, позволяющим историку уяснить сущность исторического через его умозрительную достройку.

Предмет исторической науки, как бы мы его различно ни толковали, в основной своей сумме представляется как *прошлое*, то есть то, чего уже нет, но что все равно присутствует в нашей памяти как «настоящее прошлого» (если мы не придерживаемся исторических установок позитивизма), согласно определению Августина Блаженного [14, с. 45]. Поэтому предмет изучения историка не дан ему как наличное бытие и, стало быть, не представляет собой эмпирически данной конкретной реальности, в то время как сама этимология слова «реализм» требует наглядной здесь и теперь интерпретации. Можно ли говорить, исходя из этого, что историческая реальность не существует, что следует из обыденного толкования слова «существовать», либо следует полагать, что понятие о реальном в исторической науке и философии истории выходит за границы эмпирически наглядного созерцания. Поэтому оно означает также и то, что с точки зрения обыденного знания история представляет собой знание о том, что недоступно чувственному опыту, обладает как бытийным, так и небытийным статусом.

Как бытийный, так и небытийный онтологический статус истории как объекта познания приводит к возможности трактовки исторического факта как образа прошлого, конструируемого настоящим историком. В качестве сторонников трансцендентальной роли формы в историческом повествовании необходимо выделить Ролана Барта и Хейдена Уайта [15; 16]. Можно назвать следующие положения данных авторов. Во-первых, спорным является приоритет исторического факта перед последующими стадиями его формальной обработки. Это вытекает из того, что всегда перед началом интерпретации историк сталкивается с непреодолимым в индивидуальном плане и необозримым количеством фактов, значение которых, если они являются атомарными, далеко не очевидно. Во-вторых, невозможно никаким дедуктивным или индуктивным способом доказать движение истории в каком-то строго определенном направлении, поскольку исходя из фактов это сделать невозможно, а дедуктивная попытка будет заведомо противоречива. В-третьих, любая попытка построить исторический ряд, исходя из фактов, будет приводить к построению календаря, лишённого направленности, которая осуществляется через внесение сюжетной интриги. Поэтому огромную роль в построении сюжетов играет тропологическая стратегия, а именно комбинация типа построения сюжета, идеологического подтекста, доказательства, с помощью которых историк упорядочивает массив исторических фактов. Формулируя понятие о причинно-следственной связи событий, выражая это знание в концепте, например, «Французская буржуазная революция», автор текста выражает не реальное время, а условное социальное время, органично включенное в современный культурный контекст. Время выглядит как последовательность дискретных пунктов (событий), с постоянной отсылкой читателя к референту (условной, означаемой реальности), на который автор ориентируется и по отношению к которому он располагает все события. Сложившийся нарратив имеет начало (общую ориентацию), середину (постановку проблемы, ее оценку и разрешение), конец (кodu и возвращение к настоящему). Таким образом утверждается мысль об объективности повествования, включенности читателя в условную историю, в создаваемую реальность (темпоральность есть структура исторического повествования основанная на построении вокруг нее сюжетной интриги с завязкой, кульминацией и развязкой). Таким образом то, что историки представляют как объективную историческую реальность есть эффект реальности – речевая конструкция. Так или иначе, творчество такого рода порождает то, что Р. Барт называет «эффектом реальности» в глазах наивного читателя [15, с. 427–441].

Он отмечает, что этот эффект достигается за счет того, что «субъект высказывания стремится отсутствовать в своем дискурсе, то есть когда дискурс систематически не содержит знаков, отсылающих к отправителю историографического сообщения; история рассказывается как бы сама собой. На самом деле в этом случае отправитель дискурса исключает из него свою эмоциональную личность, зато подменяет ее другой, «объективной» личностью; субъект вполне сохраняется, но как объективный субъект». Таким образом, «на уровне дискурса объективность – отсутствие знаков субъекта высказывания – предстает как особая форма воображаемого, продукт так называемой референциальной иллюзии, поскольку историк здесь делает вид, будто предоставляет говорить самому референту». В итоге получается, что «референт отделяется от дискурса, становится для него чем-то внеположно-фундаментальным, считается, что он всем заправляет; это фаза истории как *res gestae*, а дискурс выдает себя просто за *historia rerum gestarum*; но во второй фазе уже само означаемое вытесняется и сливается с референтом, а референт вступает в прямое отношение с означаемым» [13, с. 427-441].

Если предоставить слово профессиональным историкам и философам, то онтологический статус исторической реальности можно фиксировать либо на уровне остатков прошлого, его артефактов, следов, по определению М. Блока, либо на уровне преданий, функционирующих в современном исследователю обществе текстов – носителей информации о прошлом культуры [14, с. 45]. Историческое прошлое, как полагает исторический реализм, имеет тенденцию сохраняться как подлежащая дешифровке-декодированию информация, несущая знание не только о состояниях и изменениях объекта интерпретации в прошлом, но и о том, что представляет собой объект в данный момент своего исторического бытия и даже, возможно, о том, каков он будет в будущем. По словам А. В. Гулыги, «диалектика позволяет различать понятия «бытие» и «существование»: первое значительно шире второго» [9, с.12]. По его мнению, «реально не только настоящее, реально также и прошлое, реально будущее... минувшее живет в созданных человеком производительных силах, общественных связях, политическом строе, традициях» [9, с.12]. В общем, согласно классификации, прошлое способно сохранять себя в собственных артефактах, либо источниках, то есть в исторической памяти.

Возникают следующие проблемы, которые должны быть разрешимы в рамках методологии истории, претендующей на объективное знание. Если существует внеязыковая историческая реальность, то должны существовать и соответствующие инвариантные формы и механизмы мысли, с помощью которых возможно ее познание. Таковые могут быть только трансцендентальными (=неизменными), ибо историческая реальность в ее познании провозглашается неизменной, могущей быть завешенной. Каковы же модели этой исторической мысли? Если историческая реальность – реальность внеязыковая, то, как будет соотноситься язык познания и его предмет, если предмет, таким образом, по своей природе внеположен языку. Получается, что историческая реальность не может не быть реальностью символического, невещественного, идеального характера. Факты истории встраиваются в текущую жизнь, связаны с общезначимыми и индивидуальными ценностями. Все эти доводы позволяют считать, что даже при реалистическом подходе к историческому познанию существует опасность его перерастания в конструктивизм, полагающим прошлое лишь в качестве образа, являющегося либо риторическим, либо категориальным конструктом.

Библиографический список

1. Карсавин, Л.П. Философия истории / Л. П. Карсавин. – М.: Хранитель. 2007. – 543 с.
2. Дройзен, И. Г. Историка: [пер. с нем. Федоровой Г. И.] / И. Г. Дройзен. – Санкт-Петербург: Владимир Даль, 2004. – 583 с.
3. Смоленский, Н. И. Теория и методология истории / Н. И. Смоленский. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 478 с.

4. Лаппо-Данилевский, М. А. Методология истории / М. А. Лаппо-Данилевский. – М.: Издательский дом «Территория будущего», 2006. – 622 с.
5. Хайдеггер, М. Время картины мира / М. Хайдеггер // Хайдеггер М. Время и бытие. Статьи и выступления. – СПб.: Наука, 2007. – 447 с.
6. Гадамер, Г. Г. Истина и метод. Основы философской герменевтики: [пер. с нем.] / Г. Г. Гадамер; общ. ред. и вступ. ст. Б. Н. Бессонова. – М.: Прогресс, 1988. – 704 с.
7. Февр, Ж. Бои за историю. – М.: Наука, 1991. – 519 с.
8. Каравашкин, А.В. Опыт исторической феноменологии: Трудный путь к очевидности / А.В. Каравашкин, А.Л. Юрганов. – М.: РГГУ, 2003. – 385 с.
9. Гулыга, А. В. Искусство истории / А. В. Гулыга. – М.: Современник, 1980. – 288 с.
10. Риккерт, Г. Границы естественнонаучного образования понятий / Г. Риккерт. – СПб.: Наука, 1997. – 532 с.
11. Асмус, В. Ф. Маркс и буржуазный историзм / В. Ф. Асмус. – М.: Гос. соц.-эконом. Издательство, 1933. – 512 с.
12. Хаттон, П. История как искусство памяти / П. Хаттон. – М.: Изд-во Владимир Даль, 2004. – 424 с.
13. Дильтей, В. Построение исторического мира в науках о духе: [пер. с нем. В. А. Куренного]. Собрание сочинений в 6 т. / Вильгельм Дильтей. – М.: Три квадрата, 2004. – 367 с.
14. Блок, Марк. Апология истории / Марк Блок. – М.: Наука, 1973. – 263 с.
15. Барт, Ролан. Дискурс истории / Р. Барт // Система моды. Статьи по семиотике культуры. – М.: АГРАФ, 2003. – 412 с.
16. Уайт, Хейден. Метаистория: [пер. с англ. Е. Г. Трубиной, В. В. Харитонова] / Хейден Уайт. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2002. – 528 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

Y.V. Smirnov¹, S.V. Malov²

REALISM IN PHILOSOPHY AND METHODOLOGY OF HISTORY: PROBLEM OF OBJECT RECONSTRUCTION

The training center for civil defense and emergencies of Nizhny Novgorod region¹,
Nizhny Novgorod State Medical Academy²

Subject, theme, purpose of the work: The set of realistic methods for describing the social and historical existence, the possibility of constructing a realistic methodology for stories based on them. Purpose - to identify the main features of realism in the philosophy of history and historiography, its main problem in comparison with the constructivist approach to historiography.

Methodology: The methodology is based on the dialectic paradigm of acts, supplemented by hermeneutic approaches.

The results and their range of application: In this paper we analyzed the concept of «realism» which is important for philosophical knowledge and methodology of science, namely:

Value: Content of the article can be used in the preparation of lectures, seminars and tutorials at the rate of general philosophy, epistemology, philosophy and methodology of science.

Conclusions: A realistic method does not deny the existence of a priori (prior to a particular philosophical and historical experience) meaning of life, but not limited to, obliging the knowing subject to produce a conceptual completion of consideration of reality. Recognition of a priori meanings, with their mandatory completion is especially true for a realistic description of the changing time of the historical existence. The notion of historical realism means not simply the desire to explicate the object within the general concepts and judgments, and present it as a concrete unity of life, "life-world." The line between realism and constructivism is quite mobile, which is determined by the degree of completion of the described conceptual reality. The higher this degree, the more prone to develop into a realistic constructivism.

Key words: realism, positivism, Kantianism, hermeneutics, constructivism, history, object, psychology, the image of the past, validity, effect of reality.

УДК 316(075.8)

А.В. Багаев

ОРГАНИЗАЦИЯ ЖИЗНИ ОБЩЕСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена определению направлений исследования управления обществом. Исследование также описывает влияние управления на общество. Фактически объектом научного исследования является взаимосвязь между управлением и обществом как необходимых элементов развития системы «общество – культура – природа». Важно обладать знаниями о возможных проблемах организации жизни общества и уметь управлять ими с целью создания и внедрения эффективной программы организации в современных условиях. Предложена комбинация вариантов программы организации стратегического и оперативного направлений. Представлены основные пути решения проблем организации жизни общества.

Ключевые слова: общество, управление, личность, культура, направления исследований, население, жизнь, организация.

Предметом социологического знания является вся совокупность связей и отношений, которые носят название социальных (групповые взаимодействия, социальные отношения, социальные организации, системы социального действия, социальные группы, формы человеческих общностей, социальные процессы, социальная жизнь). Социальное есть результат совместной деятельности различных индивидов, проявляющийся в их общении и взаимодействии. Методологические, эмпирические и теоретические исследования общества служат не только его объяснению, но и преобразованию. Существуют различные классификации и типы социологических теорий, так или иначе объясняющих феномен общества, его структуру и генезис. Остановимся на организационном аспекте жизни общества, рассмотренного с философской точки зрения. Для этого исследуем основные составляющие социальной жизни (общество, культура, личность, народонаселение).

Нами не ставится задача подробного описания дефиниций социального в многообразии подходов и индивидуальных (особенно оригинальных!) точек зрения. Напротив, их интеграция позволяет глубже проникнуть в суть происходящего в обществе, чтобы эффективней им управлять. *Общество* – это определившаяся в процессе исторического развития человечества относительно устойчивая система социальных связей и отношений групп людей, поддерживаемая силой обычая, закона, социальных институтов, основывающаяся на определенном способе производства, распределения, обмена и потребления материальных и духовных благ. Учитываются исторические и природные условия жизнедеятельности общества. Но не стоит концентрироваться только на демографическом, технологическом, экономическом и ином детерминизме. Анализ общества дает большую палитру аспектов его существования, но забывает о целостном взгляде на социальную реальность.

Социально-историческая теория общества под социальной деятельностью понимает совокупность социально значимых действий, осуществляемых субъектом (обществом, группой, личностью) в различных сферах и на различных уровнях социальной организации общества, удовлетворяющих его потребности экономическими, социальными, политическими и идеологическими средствами. Именно люди как субъекты деятельности структурируют и развивают общество, которое, в свою очередь, детерминирует поведение этих людей и групп. Свойство самопроизводства общества позволяет адаптироваться новым поколениям в процессе социализации.

В связи с этим закономерности существования общества лучше всего раскрываются через его понимание как социальной системы. Структура последней складывается из способа

связи взаимодействия элементов, т. е. индивидов, занимающих определенные социальные позиции (статусы) и выполняющих определенные социальные функции (роли) в соответствии с совокупностью ценностей и норм, принятой в данной системе. При этом подвижная иерархия социальных систем определяется типами и функционированием социальных связей, действующих между социальными объектами. К ним относятся: индивид, социальное взаимодействие, социальная группа, социальная организация, социальный институт и общество. Данные связи порождены взаимодействием (любое поведение индивидов и групп) и социальными отношениями (устойчивые связи в соответствии ролям и статусам). Все, вместе взятое, приводит к возникновению социальных общностей, где учитываются условия жизнедеятельности, способ взаимодействия данной совокупности индивидов, принадлежность к определенной территории, функционирование системы ценностей. Важно понять, что не только субъекты определяют общество, но и его структура, динамика, отношения с внешней средой.

Под *культурой* мы понимаем совокупность материальных и духовных ценностей общества и деятельность по их восприятию, переживанию и созданию. Культура как небиологическое явление содержит в себе механизмы самоадаптации общества к меняющейся среде обитания. Различают следующие структурные элементы культурной деятельности: коммуникативный (языки), семантический (духовные ценности, смыслы, значения, знаки, символы), нормативно-эталонный (нормы, инновации, «культурные образцы», обычаи, традиции, ритуалы, обряды), информационный (знания, картина мира). В связи с этим важную роль в обществе играют универсалии культуры, содержащие в себе общечеловеческий опыт, представленный в образно-мировоззренческих конструкциях, этимологических ценностях языка, мифологической и художественной символике того или иного народа. Существуют различные классификации культуры, выделяющие ее составные части по разным основаниям. Так, моделями строения культуры являются: материальная и духовная; народная, элитарная и массовая; субкультура, контркультура и сверхкультура; территориальная и временная и т. д. Кроме того, анализ феномена культуры показывает ее членение по единым критериям (исторический, функциональный, деятельностный). Это приводит к тому, что обыденная и специализированная культура содержит в своем составе сферы индустриального труда, управленческой деятельности, обслуживания, образования, профессионального искусства и др. В свою очередь, вертикальный срез культуры обнаруживает ее членение на хозяйственную, политическую, правовую, религиозную философскую, художественную, научную культуры, а также сферу рекреации (поддержание здоровья). Кроме *структурного* исследования культуры, важным показателем является ее *динамика*: возникновение, этапы и перспективы развития. Действительно, среди факторов культурных изменений выделяют: природно-ресурсный, пространственный, фактор взаимодействия, социальных институтов и отношений, духовно-идейный, управления. Такое нагромождение классификаций подчеркивает многообразие организационных форм жизни общества, позволяет своевременно предвидеть и преодолевать кризисные явления, строить и реализовывать гармоничные модели его развития.

Личностный аспект жизни общества исходит из того, что выделяются те или иные стороны существования человека. Биологическая, социальная, рациональная, трудовая, техническая, религиозная, символическая, играющая принадлежность человека определяется в рамках общества его институциональными (и деинституциональными) связями с другими людьми. Кроме того, если под личностью понимать носителя общественно-исторических отношений и высших ценностей, активно и ответственно познающего и преобразующего мир, то с точки зрения организационных форм социума важны ее институциональные связи, реализованные в семье, школе, трудовых коллективах и других группах. Действительно, соотношение человека, индивида и личности рассматривается в науке с точки зрения четырех основных подходов: субстанциальный, формально-логический, структурно-функциональный и реляционный.

Например, в последнем подходе выделяют следующие признаки: внешняя соотнесенность (референтность), внутренняя соотнесенность (самореферентность); привнесенность (внешняя детерминированность), привносимость (внутренняя детерминированность) [1].

Таким образом, системные свойства человека выражают соответственно ту или иную комбинацию его признаков. В свою очередь общими чертами личности являются социальное качество, системность и субъектность. Е.Б. Весна определяет личность как «внутреннюю и внешнюю соотнесенность с социумом. При этом «внутренняя» соотнесенность позволяет ее рассматривать как сумму диспозиций – субъективного выражения «внешней» соотнесенности, т. е. объективных позиций (статусов), которые занимает личность в конкретном обществе» [1, с. 280]. Обобщением вышеизложенного в соответствии с темой исследования является то, что способ организации жизни связан с такими свойствами человека как: 1) жизненный путь как естественно-искусственный процесс («родовой человек»), 2) образ жизни как типические модели – социальное в индивидуальном (индивид), 3) стиль жизни как индивидуальный путь – индивидуальное в социальном (индивидуальность), 4) жизненная практика как путь сознательного преобразования жизни (личность). Кроме того, для управления и организации социума с точки зрения личностного аспекта важны следующие параметры: уровень организации, форма активности, вид субъекта, формальные связи, характер реляционных связей с миром, тип детерминации, способ социальной регуляции и механизмы социализации [2].

Личность, как и человек, в организации жизни общества находится в определенной иерархии. Кроме того, социальная иерархия должна базироваться на следующих принципах: четкое разделение труда, иерархичность управления, наличие формальных правил и норм, дух формальной обезличенности, квалификационные требования к должности. Законы иерархии учитывают ограниченность вакансий, расположенных наверху пирамиды управления. Так, Зеленев Л.А. выделяет следующие законы социального управления [3]:

1. Стабильности управленческой деятельности.
2. Обращаемости управления на все сферы общественной жизни.
3. Исторической трансформации управления в самоуправление.
4. Полноты функционирования управления.
5. Минимизации затрат при достижении максимального результата.
6. Информационного обеспечения планирования.
7. Полнокомпонентного обеспечения организации.
8. Приведения субъекта управления в изоморфное состояние с объектом управления.
9. Соответствия уровней управления (стратегическое, тактическое, оперативное).
10. Алгоритма управления (идея, концепция, программа, механизм реализации, деятельность).

Таким образом, не только структура личности (статусы, роли, диспозиции), социальная динамика личности (социализация, активность) и социальная типология личности определяют организационные формы жизни общества, но и законы его управления.

Еще одной составляющей социальной жизни является *народонаселение*. Под последним мы понимаем исторически сложившуюся совокупность людей, которая пространственно локализовано, включено в территориальную иерархию и связано с конкретным временем (моментно, интервально). Существенным для целей исследования является выделение структуры народонаселения: половая, возрастная и генетическая. Но поскольку население – динамическая система, то необходимо учитывать также и демографические процессы. Не вдаваясь в социологические данные, отметим важную роль в организации общества его воспроизводство населения. В связи с этим для эффективного управления социумом на передний план выдвигаются и миграционные процессы. К последним относятся такие явления как адаптация (приспособление субъекта к объективным условиям окружающей среды), так и обустройство (перестройка объективных условий в соответствии с потребностями субъекта). Вместе взятые, эти явления присутствуют и в интеграции (приспособление и объединение).

В рамках исследования управления обществом важным феноменом выступают *социальное и организационное пространство* [4]. Социальным пространством называется совокупность точек на воображаемом континууме, имеющем заданное число осей измерения, описывающих структуру общества. Обычно координаты выражают социальную стратификацию, социальные институты и социальный состав населения. Данное пространство связано с социальной организацией, представляющей собой систему социальных групп и отношений между ними, направленную на достижение определенных целей посредством распределения функциональных обязанностей, координации усилий и соблюдения определенных правил.

Не менее существенное место в организации социума занимают *законы и модели организационного поведения (ОП)* [5]. Различают несколько типов ОП: по степени осознанности поведения (целерациональное и неосознанное), по целям (индивидуальное, групповое, общеорганизационное), по типу воздействия на субъекта-носителя (реактивное, конформное, ролевое), по последствиям поведения (конструктивное, деконструктивное), по форме протекания (кооперированное, конфликтное). Законы социального неравенства и социальной поляризации порождают у нижних слоев иерархии скрытое недовольство, психологию подполья, что отражается в ОП в виде забастовок, сознательном ограничении норм выработок и т.п.

Для ОП характерно разграничение типов управления на руководство и лидерство. Если руководство применимо больше к формальным организациям, то лидерство – к неформальным, оно является процессом, с помощью которого одно лицо оказывает влияние на членов группы. Под лидерством понимают «способность влиять на индивидуумов и группы людей, чтобы побудить их работать для достижения целей» [6]. Скорее не должностные возможности как у руководителя, а личные качества как у лидера более обеспечивают эффективное управление организацией.

В современных исследованиях все чаще обращают внимание на *управление человеческими ресурсами*, как на уровне отдельных организаций, так и общества в целом. Так, согласно Хендри и Петтигрю [7, с. 54] значение стратегического управления человеческими ресурсами определяется четырьмя факторами:

- способы планирования;
- целостный подход к выработке систем управления персоналом на основе политики в области трудовых отношений и кадровой стратегии организации;
- согласование деятельности и направлений политики по управлению человеческими ресурсами с принятой бизнес-стратегией;
- отношение к персоналу компании как к стратегическому ресурсу для достижения конкурентного преимущества.

С другой стороны, ряд разработок подчеркивают роль профессионализма и роста знаний в процессах управления организацией. Действительно, как считает С. Спесивцева «сохранение и приумножение знаний сотрудников посредством эффективного формирования рабочих групп и уместного делегирования полномочий, системы обмена информацией (внутрифирменных сетевых ресурсов, электронных библиотек), своевременности обучения и продвижения персонала позволяет одновременно сохранить команду профессионалов, соблюсти требования действующего законодательства и аудиторского сообщества, а также повысить конкурентоспособность организации на рынке аудиторских и консалтинговых услуг» [8, с. 113]. Можно экстраполировать данный вывод и на организации любого профиля, ибо рост знаний и опыта напрямую зависит от принятой стратегии управления.

На уровне общества разработано немало теорий управлений. На наш взгляд, пристального внимания заслуживает фрактальная теория корпоративного управления, ориентированная в большей степени на экономическую сферу. Так, М. Слипенчук [9, с. 103–104] выделяет следующие преимущества такого управления:

- корпоративное управление описывается не детерминированным, а стохастическим

процессом, который должен моделироваться вероятностными распределениями;

- в процессах корпоративного управления улавливаются различного рода сбои и «катастрофы», которые не обязательно вызваны изменениями внешних условий;
- достижение максимальной устойчивости корпоративного управления в изменяющихся условиях предполагает децентрализованную структуру управления.

Итак, по *организации жизни общества* можно сделать следующие выводы [10].

Управление социумом касается всех *основных составляющих социальной жизни* (общество, культура, личность, народонаселение). Организационные процессы пронизывают *социальные структуры* на всех уровнях, а именно: социальные общности и группы (их виды и структура, личностное и групповое поведение, конформизм); социально-территориальные и национальные (этнические) общности; социальная стратификация (ее сущность, основные понятия, динамика, многомерный подход к анализу расслоения); социальные институты экономики, политики, образования и науки, религии, права, семьи (их структура, функции и дисфункции); социальные организации (их возникновение, строение, функционирование, типология).

Кроме того, сфера управления учитывает *социальные взаимодействия и процессы*. Действительно, организационные формы вбирают в себя такие феномены как: социальные нормы, отклоняющееся поведение, социальный контроль (социальные ценности, дезорганизация, преступность); социальная коммуникация и информационные технологии (воздействие на индивидуальное и массовое сознание, слухи); социальная мобильность (каналы, механизмы, факторы); социальные конфликты (роль, типология).

И наконец, существование общества невозможно без *социальных изменений и развития*. Неслучайно, именно на эти явления воздействуют организационные процессы! Формы и факторы динамики социума имплицитно испытывают на себе влияние управленческих решений, как на уровне отдельной организации, так и в масштабах всего общества. С другой стороны, целостный подход к *организации жизни общества* не должен исключать конкретных социологических и управленческих исследований (фундаментальные, прикладные; теоретический и эмпирический уровни знаний; общая и отраслевая социология). В любом случае, данные исследования будут зависеть от:

- 1) политической и экономической ситуации;
- 2) положения науки в обществе;
- 3) кадровой и финансовой политики ее руководства.

Библиографический список

1. **Весна, Е.Б.** Понятия «личность» и «индивидуальность» в понятийном пространстве, описывающем человека [Текст] / Е.Б. Весна // Мир психологии. 1999. № 4. С. 279-295.
2. **Савчук, С.И.** Социальное управление: Базовые понятия: монография / С.И. Савчук. – Н. Новгород: изд. Гладкова О.В., 2001. – 92 с.
3. **Зеленов, Л.А.** Законы социального управления // Законы управленческой сферы общества: материалы VII Международной ярмарки идей, 32 Академического симпозиума. – Н.Новгород: изд. Гладкова О.В., 2004. – С. 12–15.
4. **Гибсон, Дж.Л.** Организации: поведение, структура, процессы: [пер. с англ.] / Дж.Л. Гибсон, А.М. Иванцевич, Д.Х. Доннелли-мл. – 8-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2000. – XXVI. – 662 с.
5. **Ньюстром, Дж.В.** Организационное поведение: [пер. с англ. под ред. Ю.Н. Каптуревского] / Дж.В. Ньюстром, К. Дэвис. – СПб.: Издательство «Питер», 2000. – 448 с.
6. **Мескон, М.** Основы менеджмента: [пер. с англ.] / М. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури. – М.: Дело, 1992. – С. 489.
7. **Амстранг, М.** Стратегическое управление человеческими ресурсами / М. Амстранг. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 328 с.
8. **Спесивцева, С.** Профессионализм персонала как фактор конкурентоспособности организации // Проблемы теории и практики управления. 2009. № 6. С. 108–113.

9. Слипенчук, М. Человеческий капитал и корпоративное управление в современной экономике // Проблемы теории и практики управления. 2009. № 5. С. 94–104.
10. Ковалев, А. Стратегический менеджмент, или менеджмент стратегий / А. Ковалев, О. Козлова // Проблемы теории и практики управления. 2009. № 4. С. 83–87.

*Дата поступления
в редакцию 16.10.2012*

A.V. Bagaev

THE ORGANIZATION OF LIFE SOCIETY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article presents definitions of the directions the research management of society. The research also describes the influence of management on society.

Design/methodology/approach: Dialectics is a methodology. Basic terms and principles, main purposes and directions management of society are discovered. They are described as modern department of society development orienteer.

Findings: As a result the analysis of management of society shows that the dominating of extensive way of development management of society is evident.

Research limitations/implications: In fact, the subject of scientific investigation is relation between the management and society as necessary development element of the system “society – culture – nature”.

Originality/value: It is of great importance to have knowledge about possible problems of the organization of life society and be capable to manage them to create and implement an effective program of the organization in contemporary conditions. The combination of variants program of the organization for strategic and operation direction is suggested. The main directions problems of the organization solving at life society are represented.

Key words: society, management, persona, culture, directions the research, population, life, organization.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.81.004.17

В.А. Валетов, В.В. Медунецкий

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРЕСС-ФОРМ НА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

В данной статье приводятся результаты экспериментов, которые показывают целесообразность использования непараметрического подхода в качестве критериев оценки шероховатости функциональных поверхностей конструктивных элементов приборов, в том числе и конструктивных деталей микроэлектромеханических систем (МЭМС), изготавливаемых в процессе электроэрозионной обработки на станке Form 20 фирмы Agie Charmilles. Обоснована целесообразность применения электроэрозионного оборудования для упрощения технологии изготовления функциональных поверхностей заданного уровня качества. Выявлено влияние шероховатости поверхности электрода-инструмента на длительность электроэрозионного процесса и характер микрогеометрии получаемых поверхностей деталей.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, электроэрозионные процессы и оборудование, непараметрические критерии оценки шероховатости поверхности.

В настоящее время во многих областях техники наблюдается тенденция к повышению показателей качества приборов и систем за счёт использования полимерных композиционных материалов. При этом нередко задаются достаточно сложные геометрические формы миниатюрных деталей, что приводит к необходимости использования пресс-форм (формообразующих матриц) для изготовления таких сложнопрофильных деталей. В таком случае необходимо решать комплекс задач по разработке и изготовлению формообразующей оснастки с необходимыми характеристиками их функциональных поверхностей. Поэтому для решения таких задач сейчас активно применяется электроэрозионное оборудование, которое позволяет не только обеспечить геометрическую точность формообразующей матрицы для будущего изделия, но и обеспечить надлежащее качество его поверхности по всей площади. Следует также отметить, что на современных электроэрозионных станках изготавливают как формообразующие матрицы для конструктивных элементов приборов, так и непосредственно собственно конструктивные элементы из металлов и их сплавов для приборов и МЭМС.

Особенности применения электроэрозионного оборудования

Из электроэрозионного оборудования, которое сейчас используется отечественными производителями, следует выделить, прежде всего, электроэрозионные прошивные станки, так как они реализуют практически все методы электроэрозионной обработки, такие как электроэрозионная прошивка, резка и полирование. Основной практической задачей при реализации метода электроэрозионной прошивки является расчёт, проектирование и изготовление электрода-инструмента. Под расчётом понимается определение эквидистантного «за-

нижения» электрода-инструмента относительно геометрии требуемой формы заготовки. В данном случае под «занижением» следует понимать разницу между геометрическими параметрами инструмента и требуемой геометрической формы заготовки. Данное «занижение» состоит из припуска на обработку, шероховатости требуемой поверхности и межэлектродного зазора (рис. 1).

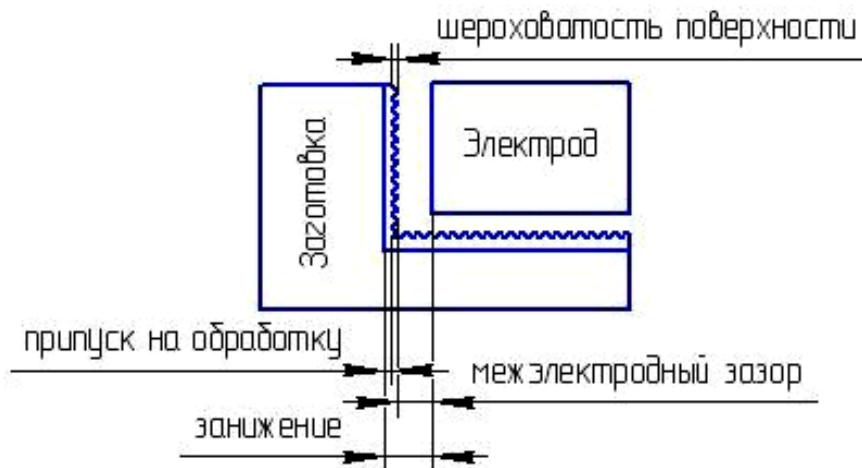


Рис. 1. Занижение электрода-инструмента

Следует отметить, что преимущество данного оборудования заключается в том, что на нём можно получить геометрическую форму практически любой сложности с заданным качеством поверхности. При обработке сложной по форме поверхности зачастую используются несколько электродов. Сложная геометрическая форма разбивается на более простые поверхности, для обработки которых изготавливаются отдельные электроды, что приводит к увеличению производительности, точности и повышению качества поверхности. В некоторых случаях данный метод обработки является единственно возможным.

Как известно, одним из важнейших преимуществ электроэрозионного способа изготовления функциональных поверхностей пресс-форм является равномерная микрогеометрия их поверхности. В настоящее время основным критерием оценки качества поверхности является параметр Ra , а в зарубежной технике используется аналог – параметр VDI. Однако достаточно давно известно, что существует так называемый непараметрический подход к оценке качества поверхности [1]. В этом направлении и сейчас ведутся исследования. Можно привести работы [2], [3] и [4], где обоснована целесообразность использования непараметрического подхода к решению задач оптимизации характеристик поверхностного слоя деталей для различных функциональных свойств поверхностей. В этих работах предложено в качестве критериев оценки шероховатости поверхности использовать графическое изображение плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля.

Экспериментальные исследования на электроэрозионном оборудовании

В теории и практике выявлено, что использование параметрического подхода к оценке шероховатости поверхностей не даёт полной и объективной картины о микрогеометрии исследуемого профиля, поэтому для обоснования преимущества непараметрического подхода в оценке шероховатости изготавливаемой поверхности был проведен ряд экспериментов на электроэрозионном оборудовании.

На электроэрозионном прошивном станке Form 20 фирмы Agie Charmilles [5] было изготовлено пять опытных образцов с одинаковой шероховатостью поверхности $Ra 1,6$. Образцы представляют собой пластины из стали ХВГ (ГОСТ 2591-88 (СТ СБ 3899-82)), обрабатываемая поверхность размером 10x10 мм с требуемой глубиной обработки в 0,05 мм в режиме

полирования. Конкретные режимы обработки исследуемых поверхностей изделий (технологические таблицы режимов обработки) рассчитаны с использованием программного продукта швейцарской фирмы Agie Charmilles. При расчете режимов была задана требуемая величина Ra 1,6 обрабатываемой поверхности. Рассчитаны геометрические параметры (включая «занижение») и изготовлен электрод-инструмент, который выполнен из бескислородной меди (ГОСТ 10988-75) с рабочей поверхностью 9,8x9,8мм. В табл. 1 приводятся основные параметры электроэрозионной обработки в данном эксперименте.

Таблица 1

Основные параметры электроэрозионной обработки для получения поверхности с шероховатостью Ra 1,6

Параметр обработки	Значение
Пиковый ток I, А	3,6
Длительность импульса T, мкс	31,6
Длительность паузы P, мкс	23,7
Напряжение U, В	180
Фронтальная площадь F_p , см ²	0,01
Износ, %	1,7
Качество поверхности по стандарту VDI 3400	24
Занижение размеров M, мм	0,077

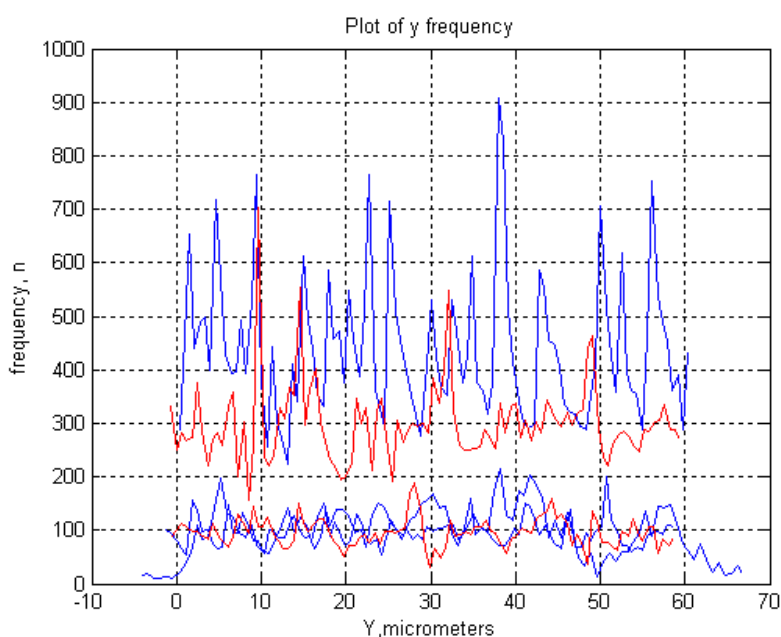


Рис. 2. Плотности распределения ординат профилей для 5 поверхностей с параметром Ra 1,6

Измерение профилей поверхностей полученных образцов производилось на профилографе HommelTester. Были получены порядка 5000 высотных значений шероховатости для каждого изменяемого профиля. Обработка численных значений микронеровностей произведена в среде MATLAB.С использованием преобразования Фурье профили отфильтрованы и получены плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей. Далее построены графические изображения исследуемых профилей. На рис. 2 приводятся плотности распределения ординат профилей для пяти поверхностей с параметром Ra 1,6. На рис. 3 приведены плотности распределения тангенсов углов наклона профилей также для 5 поверхностей с параметром Ra 1,6.

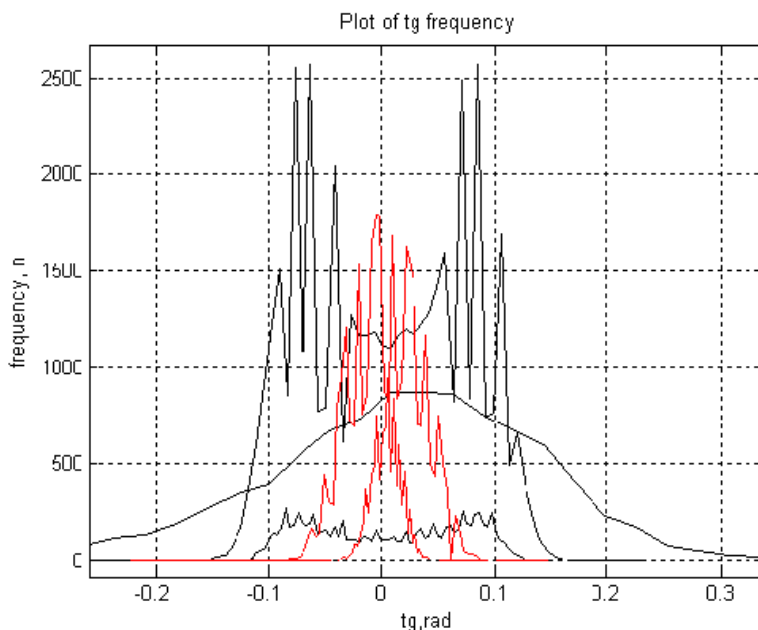


Рис. 3. Плотности распределения тангенсов углов наклона профилей для 5 поверхностей с параметром Ra 1,6

В результате выявлено, что при одинаковом параметре Ra 1,6 плотности распределения существенно отличаются от образца к образцу. Это доказывает, что параметр Ra не может служить полностью объективной оценкой шероховатости поверхности, в частности, получаемой при электроэрозионной обработке.

Также были изготовлены и исследованы 20 опытных образцов с различными значениями параметра Ra от 0,1 до 4,3. Для каждого образца построены плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей. При этом обнаружилось расхождение (несоответствие) расчётных (программных, ожидаемых) параметров Ra с их измеренными значениями на указанном профилографе.

Таблица 2

Основные параметры электроэрозионной обработки для получения полированной поверхности (Ra 0,1) площадью 1 см²

Параметр обработки	Значение
Пиковый ток I, А	1,8
Длительность импульса T, мкс	1,18
Длительность паузы P, мкс	1,18
Напряжение U, В	100
Фронтальная площадь F _p , см ²	0,01
Износ, %	25
Качество поверхности по стандарту VDI 3400	0
Занижение размеров M, мм	0,022

В процессе проведения указанных экспериментов была выдвинута гипотеза о влиянии микрогеометрии поверхности электрода-инструмента на процесс электроэрозионной обработки. Поэтому суть последующего эксперимента заключалась в том, чтобы доказать влияние микрогеометрии поверхности на различные аспекты электроэрозионной обработки. Исходя из этого, были рассчитаны и изготовлены два электрода с различной шероховатостью рабочей поверхности, у первого электрода параметр составлял Ra 0,4, у второго – Ra 2,7. Все остальные параметры электродов одинаковы. Данными электродами были отполированы одинаковые поверхности размером 10x10мм на плите изготовленной из стали ХВГ на одном и том же режиме обработки (табл. 2).

В результате этого эксперимента получены две эквивалентные поверхности с параметром Ra 0,1, но, при этом, вторая поверхность (обрабатываемая электродом с шероховатостью Ra 2,7) была получена при равных прочих условиях на 40 минут быстрее, чем первая поверхность (при продолжительности электроэрозионного процесса в 150 минут в первом варианте). Учитывая тот факт, что основным недостатком электроэрозионной обработки является низкая производительность, данный эксперимент выявил возможность уменьшения времени обработки поверхностей за счет оптимизации шероховатости поверхности электрода-инструмента. Также выявлено, что износ электрода-инструмента зависит от его начальной шероховатости поверхности. Основываясь на этих фактах, следует ввести понятие инструментальной шероховатости поверхности, с помощью которой возможно влиять на параметры электроэрозионного процесса обработки поверхностей деталей, в частности, функциональных поверхностей пресс-форм.

Выводы

Проведённые эксперименты на электроэрозионном станке Form 20 фирмы Agie Charmilles подтвердили целесообразность использования в практике непараметрического подхода к оценке микрогеометрии поверхностей деталей, получаемых (формируемых) в процессе электроэрозионной обработки. Также выявлено несоответствие расчётных (программных) параметров Ra изготавливаемых поверхностей с их измеренными значениями. Подтверждена гипотеза о влиянии шероховатости поверхности электрода-инструмента на длительность электроэрозионной обработки, что выявляет возможность оптимизации электроэрозионного процесса, в частности, реализуемом на станке Form 20 фирмы Agie Charmilles.

Библиографический список

1. Валетов, В.А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Труды ЛКИ. 1976. Вып. 108. С. 135–140.
2. Валетов, В.А. Непараметрический подход к оценке качества изделий / В.А. Валетов, А.Ю. Иванов // Металлообработка. 2010. № 6. С. 55–59.
3. Валетов, В.А. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства / В.А. Валетов, А.Ю. Иванов // Приборостроение. 2010. № 8. С. 7–12.
4. Третьяков, С.Д. О проблемах оптимизации микрогеометрии поверхностного слоя деталей приборов / С.Д. Третьяков, О.С. Юльметова // Приборостроение. 2010. № 8. С. 12–15.
5. Руководство по эксплуатации электроэрозионного станка Form 20. Charmilles Technologies SA / Beijing Agie Charmilles Industrial Electronics Co., Ltd /2007.

Дата поступления
в редакцию 26.10.2012

V.A.Valetov, V.V. Medunetskiy

SPECIAL FEATURES OF FORMING FUNCTIONAL SURFACES OF MOLDS USING ELECTRIC DISCHARGE EQUIPMENT FOR DEVICES CONSTRUCTIONAL ELEMENTS MANUFACTURING

St. Petersburg National Research University Information Technologies, Mechanics and Optics

In the following article the results of experiments are given, which show expediency of using non-parametrical approach as criterias for evaluation roughness of functional surfaces of devices constructional elements, including constructional elements of Micro-Electromechanical Systems (MEMS), manufacturing during electric discharge processing using Form 20 machine-tool made by Agie Charmilles. Expediency of using electric discharge equipment for simplification of technology for manufacturing functional surfaces with specified quality was proven. Influence of surfaces roughness of tool-electrode on duration of electric discharge processing and features of receiving microgeometry of details surfaces was found.

Key words: surfaces roughness, electric discharge processes and equipment, non-parametrical criterias for surfaces roughness evaluation.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА

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

Разработан датчик угловых перемещений на основе гигантского магниторезистивного эффекта для применений в линейных и угловых акселерометрах. Получена зависимость сопротивления тонкой полоски от ее параметров и от угла намагничивания. Полученная зависимость является не линейной. Для линейаризации характеристики на материал тонкой пленки наносят проводящие полоски-штрихи под углом 45° к оси жесткого намагничивания. Проводящие полоски-штрихи являются эквипотенциалами на поверхности тонкой ферромагнитной пленки. Перпендикулярно к эквипотенциалам направлен вектор плотности тока в свою очередь повернутый на угол 45° относительно оси x . Из всех нежелательных явлений, отрицательно влияющих на характеристики датчика перемещений является изменение температуры. Снижение этого влияния до допустимых значений осуществляется включение рабочих магниторезисторов в дифференциальный мост. Результатом применения датчиков на ГМРЭ является повышение чувствительности акселерометров и снижение погрешности нулевого сигнала.

Ключевые слова: магниторезистивный эффект, линейаризация, мостовая схема, датчик угловых перемещений.

Анизотропный магниторезистивный эффект (АМЭ) у ферромагнитных материалов, например, у пермаллоя ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) проявляется в зависимости удельного электрического сопротивления ρ от угла между вектором плотности тока \vec{i} и вектором внутренней намагниченности \vec{j} (рис. 1) На базе АМЭ могут быть построены магнитометры как прямого измерения, так и компенсационные. Магнитометры прямого измерения являются широкополосными с частотной полосой от постоянного тока до 1 ГГц, а чувствительность их лежит в диапазоне $10^3 - 5 \cdot 10^6$ нТл. Компенсационные магнитометры имеют ограниченную задаваемую параметрами полосу пропускания и минимальное значение измеряемой напряженности магнитного поля порядка 0,1 нТл. Магнитометры на основе АМЭ изготавливают по технологии МЭМС, они могут работать в диапазоне температур от 55 до 200°C .

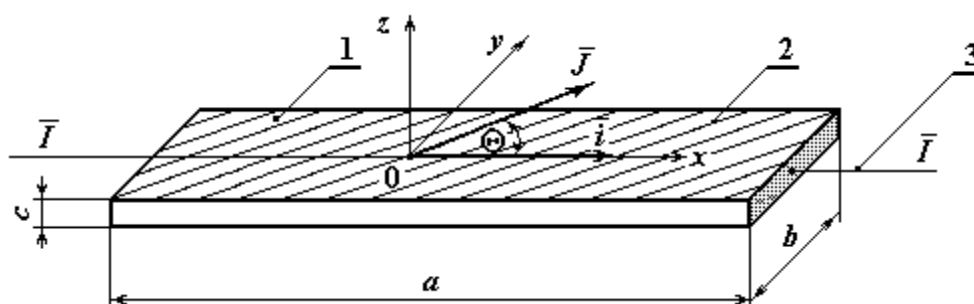


Рис. 1. Чувствительный элемент импульсного магнитометра

Рассмотрим вначале теоретические основы магниторезистивной анизотропии на примере тонкой полоски ферромагнетика (рис. 1). Образец 1 имеет анизотропию формы, выражающуюся следующим неравенством: $a \gg b \gg c$, причем толщина слоя $c < 0,1$ микронметра. На поверхности пленки нанесена металлизация вакуумным напылением в виде тонких штрихов 2 под углом 45° к оси жесткого намагничивания (ось y). На торцах образца имеются под-

воды Z для подключения внешнего питания с силой тока \vec{I} . В связи с анизотропией формы вектор внутреннего намагничивания \vec{J} лежит в плоскости пленки.

Двумерный тензор удельного сопротивления пленки можно выразить следующим образом

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{\parallel} & 0 \\ 0 & \rho_{\perp} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} - компоненты удельного сопротивления пленки, соответственно параллельно и перпендикулярно к направлению вектора намагничивания \vec{J} . Для осуществления общих поворотов тензора (1) необходимо выполнить лево- или правостороннее умножение его на матрицу вращения или ее транспоненту:

$$S = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где Θ - угол между вектором намагничивания \vec{J} и осью легкого намагничивания x (рис. 1). После умножения получим зависимость удельного тензора сопротивления угла поворота:

$$\rho(\Theta) = \begin{bmatrix} \rho_{\parallel} \cos^2 \Theta + \rho_{\perp} \sin^2 \Theta & \rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta \\ \rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta & \rho_{\parallel} \sin^2 \Theta + \rho_{\perp} \cos^2 \Theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Результирующее поле напряженности E с двумерным вектором плотности тока имеет вид:

$$\vec{E}(\Theta) = \rho(\Theta) \vec{i}, \quad (4)$$

где $\vec{i} = \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}$. В связи с тем, что вдоль оси жесткого намагничивания y отсутствует ток, напряженности поля имеет вид:

$$E(\Theta) = \begin{bmatrix} (\rho_{\parallel} \cos^2 \Theta + \rho_{\perp} \sin^2 \Theta) i_x \\ (\rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta) i_x \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Используя геометрические параметры пленки (рис. 1) a , b и c - соответственно длину, ширину и толщину, представим напряженность поля и силу тока вдоль оси легкого намагничивания в виде:

$$E(\Theta) = U/a, \quad I = i_x bc. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим зависимость сопротивления тонкой полоски от ее параметров и от угла намагничивания:

$$R(\Theta) = R_{\parallel} - (R_{\parallel} - R_{\perp}) \sin^2 \Theta = R_{\parallel} \cos^2 \Theta + R_{\perp} \sin^2 \Theta \quad (7)$$

Полученная зависимость является нелинейной. Для линейризации характеристики материал тонкой пленки наносят проводящие полоски-штрихи под углом 45° к оси жесткого намагничивания (ось y). Проводящие полоски-штрихи являются эквипотенциалами на поверхности тонкой ферромагнитной пленки. Перпендикулярно к эквипотенциалам направлен вектор плотности тока \vec{i} , в свою очередь повернутый на угол 45° относительно оси x . С учетом этого поворота, имеем:

$$\Theta = \alpha - 45^{\circ},$$

где α - угол поворота вектора намагничивания \vec{J} относительно оси x .

Далее воспользуемся тригонометрической зависимостью:

$$\sin^2 \left(\frac{\alpha - 45^{\circ}}{2} \right) = \frac{1}{2} (1 - \sin(\Theta)). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получим:

$$R(\alpha) = \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*) + \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*)\sin(\Theta). \quad (9)$$

Из работы [1] известна зависимость между вращением направления намагничивания J относительно оси легкого намагничивания и внешним магнитным полем H_y , полученная посредством минимизации суммы вызванных анизотропией энергетических плотностей энергии размагничивания и потенциальной энергии:

$$\sin \Theta = \frac{H_y}{H_k}, \quad H_y < H_k, \quad (10)$$

где H_y - компонента внешнего магнитного поля в направлении оси y жесткого намагничивания; H_k - полная напряженность поля анизотропии, представляющая собой сумму константы внутренней напряженности примененного материала и геометрической составляющей:

$$H_k = H_0 + \frac{c}{b} J_s, \quad (11)$$

H_0 - константа внутренней напряженности магнитного поля материала; J_s - намагничивание насыщения; c и b - соответственно толщина и ширина магниторезистивной полоски.

Преобразуя (10), (11) и (12) совместно, получим:

$$R(\Theta) = \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*) + \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*)\frac{H_y}{H_k}, \quad (12)$$

где * - верхний индекс у резисторов, введенный для того, чтобы подчеркнуть, что на поверхности рассматриваемой анизотропной полоски нанесена линеаризирующая металлизация.

Соотношение (12) представляет собой линейную зависимость сопротивления линеаризированной анизотропной полоски от внешней напряженности магнитного поля. Угол линеаризирующей металлизации относительно оси легкого намагничивания можно выполнить по соотношению $\Theta = \alpha + 45^\circ$, тогда при обращенном направлении плотности тока в магниторезисторе можно получить соотношение, аналогичное (12) с той лишь разницей, что знак у второго члена изменится на противоположный.

Максимальные изменения сопротивления магниторезистора имеют место, когда напряженность поля перпендикулярна к его плоскости, т.е. совпадает с осью жесткого намагничивания y . Составляющая магнитного поля, действующая по оси легкого намагничивания x , на величину сопротивления магниторезистора влияния не оказывает.

В планарной структуре выполняют две пары магниторезисторов с противоположной штриховкой и включают их в полный мост (рис. 2). Напряжение в измерительной диагонали моста определяется в виде:

$$\Delta U = \frac{U_{\Pi}}{2} \frac{\Delta R}{R_0} \sin 2\varphi, \quad (13)$$

где U_{Π} - напряжение питания моста; φ - угол между направлением намагниченности и направлением линеаризирующих металлических полосок; R_0 - сопротивление магнитной полоски без влияния магнитного поля; ΔR - изменение сопротивления магнитной полоски.

Угол φ определяется через компоненты магнитного поля H_x и H_y . Компонента H_z - перпендикулярна к плоскости магнитного поля и соответственно на угол φ влияния не оказывает:

$$\frac{H_x}{H_0} \operatorname{tg} \varphi = \frac{H_y}{H_0} - \sin \varphi. \quad (14)$$

Посредством снижения толщины металлической полоски линеаризации можно существенно повысить чувствительность магниторезистивного моста к магнитному полю. До

уровня стандартного сигнала (-5...+5В) выходной сигнал с моста доводят масштабным усилителем.

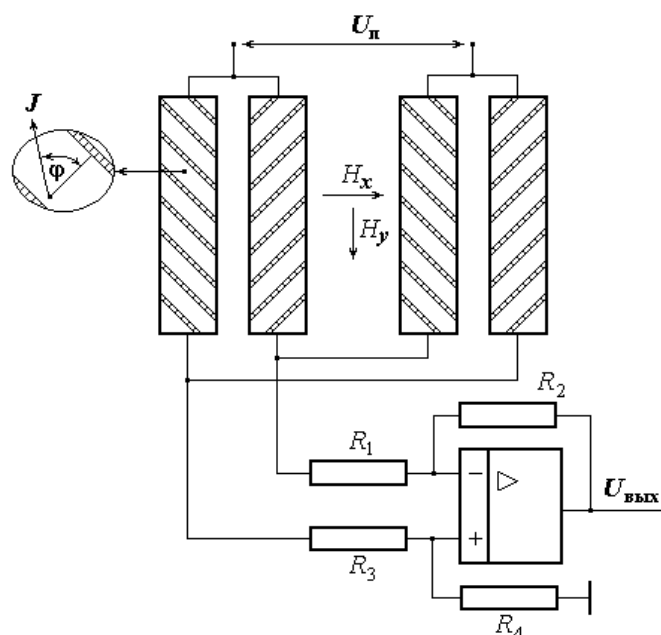


Рис. 2. Мостовая схема включения магниторезисторов

Типичные изменения сопротивления анизотропных магниторезисторов составляют порядка 2 ... 4%. Изменения более 10% были получены при использовании металлов с планарной структурой, а эффект был назван гигантским магниторезистивным эффектом (ГМРЭ). Наиболее просто ГМРЭ реализуется в виде структуры из четырех слоев толщиной менее 0,1 микронметра (рис. 3).



Рис. 3. Гигантский магниторезистивный эффект и реакция его структуры на внешнее поле

Все слои наносятся вакуумным напылением на изоляционную подложку. Первый слой – свободный ферромагнетик, материалом для него является пермаллой $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$. Следующий слой зафиксированный (жесткий) ферромагнетик из сплава кобальта и никеля CoNi . Между свободным и зафиксированным ферромагнетиками имеется тонкий разделительный слой из немагнитного проводника. Последний антиферромагнитный слой изготовлен из окиси никеля NiO и предназначен для удержания намагниченности жесткого ферромагнетика. Намагничивание жесткого ферромагнетика осуществляется при его изготовлении. Линеризующая металлизация наносится на подложку под слоем свободного ферромагнетика.

На рис. 4 приведена схема, поясняющая устройство разработанного магниторезистивного датчика перемещений. В состав схемы входят: пластина монокремния 1 , на которой как на изоляционной подложке размещены первая и вторая четырехслойные магниторезистивные структуры 2 ; дискретный источник магнитного поля 3 ; подвижный объект (маятник) 4 на упругом подвесе 5 , который может быть выполнен для работы, как на изгиб, так и на кручение. Ось качания маятника также может быть выбрана произвольно. В любом случае маятник совершает сложное движение - линейное x от прогибов и угловое α , от поворотов. Точечные источники магнитного поля воздействуют на магниторезистивные структуры в направлении максимальной чувствительности.

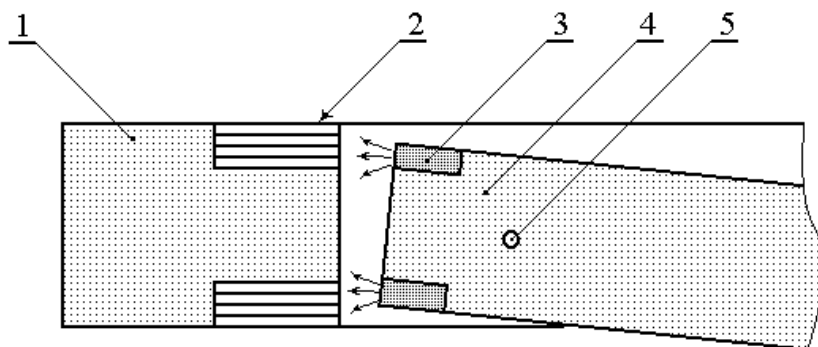


Рис. 4. Магниторезистивный датчик перемещения

В связи с тем, что магниторезисторы обладают сильной зависимостью от температуры, в измерительные цепи их включают в противоположные плечи мостовой схемы (рис. 4). Плечи моста выполняют по аналогичной четырехслойной структуре. Располагать структуры можно в один столбик одна над другой или в два столбика рядом. Рабочие линеризированные магниторезисторы 1 и 2 на схеме показаны крестиком. Для изменения направления тока в свободных магниторезисторах они включены встречно. Зафиксированные магниторезисторы 3 и 4 включены последовательно с одним направлением тока

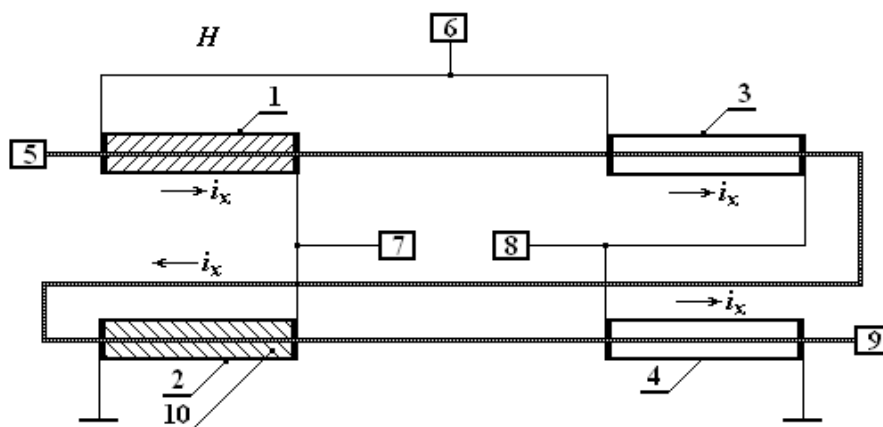


Рис. 5. Схема включения магниторезисторов и управляющей шины в четырехслойной структуре

Контактная площадка 6 предназначена для подвода внешнего питания $U_{\text{п}}$ мостовой схемы. Контактные площадки 7 и 8 являются выходными для измерительной диагонали моста. Поверх всех плеч моста проходит управляющая напыленная обмотка с контактными площадками 5 и 9. Ток в управляющей обмотке над всеми магниторезисторами имеет одинаковое направление. Управляющая обмотка имеет назначение установки и сброса для схем прямого измерения или обмотки обратной связи в компенсационных магнитометрах.

Магниторезисторы в качестве датчиков перемещений используются только для малых углов. При больших углах применение магниторезисторов теряет смысл. В соответствии со схемой включения напряжение на выходе мостовой схемы составляет:

$$U_{\text{вых}}(\Theta) = U_{\text{п}} \frac{R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*}{R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*} \frac{H_y}{H_k}. \quad (15)$$

Применяя соотношение (10) для (15), получим:

$$U_{\text{вых}}(\Theta) = U_{\text{п}} \frac{R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*}{R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*} \sin \Theta. \quad (16)$$

Магнитометры на базе ГМРЭ находят широкое применение: от считывающих головок в компьютерной технике до интегральных датчиков информации в качестве преобразователей перемещения. При слабом внешнем магнитном поле $H_y \ll H_k$ соотношение (16) является линейным.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 504 с.
2. **Дитмауер, К.** Магнитные датчики на базе анизотропного магниторезистивного эффекта // Контрольно-измерительная техника. – М.: Экспресс-информация. 2009. №9С. 13-25.

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2012*

V.D. Vavilov

SENSOR OF THE ANGULAR DISPLACEMENT ON BASE GIGANTIC MAGNITORESISTIVS EFFECT

Arzamasskiy pollytechnic institute (branch)
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The Designed sensor of the angular displacement on base gigantic magnitoresistivs effect for using in linear and angular accelerometers. Dependency of the resistance of the fine strip is Received from her(its) parameter and from corner of the magnetization. The Got dependency is not linear. For linearization of the feature on material of the fine film inflict the conducting strips- stroke under corner 45° to axis of the hard magnetization. The Conducting strips-stroke areekvipotentials on surfaces of the fine ferromagnetic film. Perpendicular to ekvipotentials is directed vector to density of the current in turn gone on to corner 45° for axis x. From all undesirable phenomenas, negativly influencing upon features of the sensor displacement thread is a change the temperature. The Reduction of this influence before possible importances it is realized cut-in a worker magnetoresistor in differential bridge. The Result use-thread sensor on GMRE is increasing to sensitivity accelerometers and reduction inaccuracy zero signal.

Key words: magnitoresistivs effect, linearization, roadway cxema, sensor of the angular displacement.

УДК 531.781.2

А.Н. Долгов

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ФИЛЬТРОВ НИЗКИХ ЧАСТОТ В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

При разработке математических моделей аналоговых фильтров электрические узлы описывают в виде передаточных функций. Матричный метод расчета базируется на известных законах Кирхгофа и отличается от других методов наглядностью и возможностью контроля получаемых результатов. Суть метода заключается в составлении матрицы проводимости для всех узлов и в решении закона Ома в матричной форме. Входные напряжения ОУ принимаются равными между собой, входные токи отсутствуют. Если необходимо учитывать неидеальность ОУ, в схему вводятся соответствующие элементы. Известно много вариантов ФНЧ, но не все они пригодны для применения в интегральных датчиках. В статье рассмотрены наиболее удачные варианты с точки зрения минимума погрешности, простоты конструкции, габаритов, энергопотребления и других характеристик.

Одним из простейших вариантов активного фильтра является ФНЧ первого порядка на инвертирующем усилителе. Его основные недостатки – слабое сглаживание, зависимость коэффициента передачи от отношения резисторов. Другой вариант ФНЧ первого порядка на основе пассивного фильтра и неинвертирующего усилителя также позволяет получить приемлемую фильтрацию при минимуме элементов, единичный коэффициент усиления, не зависящий от номиналов элементов фильтра. Рассмотренные фильтры второго порядка (структуры Рауха и Саллен-Ки) имеют примерно одинаковые характеристики, поэтому могут применяться оба варианта, однако второй предпочтительнее для точных датчиков, так как его коэффициент передачи можно сделать независимым от номиналов элементов схемы и равным единице.

Ключевые слова: фильтр низких частот, микроэлектромеханическая система, интегральный датчик.

При разработке математических моделей аналоговых фильтров электрические узлы описывают в виде передаточных функций, поскольку передаточные функции являются универсальным инструментом для анализа и синтеза всех характеристик датчиков. Рассмотрим метод расчета электронных схем на примере ФНЧ второго порядка с положительной обратной связью, применяемого во многих датчиках с аналоговым выходным сигналом (рис. 1). Положительная обратная связь в схеме образована конденсатором C_2 .

Матричный метод расчета [1] базируется на известных законах Кирхгофа и отличается от других методов наглядностью и возможностью контроля получаемых результатов. При описании электронных схем необходимо выполнять несколько типовых правил, общих для схем любой сложности:

1. Сложные схемы разделяют на ряд элементарных ячеек, включающих в свой состав один ОУ (или транзистор), охваченный цепями обратных связей из пассивных элементов: резисторов, конденсаторов и индуктивностей.

2. Пассивные элементы представляют в виде их проводимостей: для резисторов - $1/R$, для конденсаторов - Cs и для индуктивностей - $1/Ls$, где s - оператор Лапласа.

3. В выделенном участке схемы намечают узлы соединений, которые обозначают цифрами, начиная с нуля. Нулевой узел обычно совмещают с общей шиной - "землей".

4. Составляют матрицу, порядок которой равен числу намеченных в схеме узлов. Причем столбцы и строки матрицы условно обозначают номерами выделенных узлов. В действительности номера столбцов соответствуют

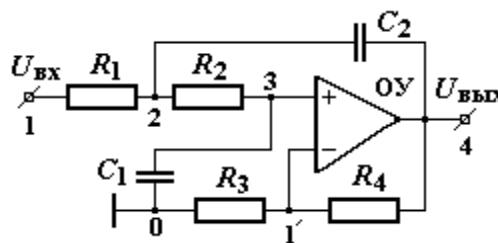


Рис. 1. Схема ФНЧ

напряжениям в узлах, а номера строк - токам; например, для нулевого столбца имеет место $0 \Leftrightarrow U_0$, а для строки $0 \Leftrightarrow J_0$. Для инвертирующего и неинвертирующего входов ОУ составляют отдельные матрицы проводимостей.

5. На пересечении строк и столбцов матрицы записывают проводимости цепей, подходящих к узлу.

6. При заполнении клеток матрицы действует следующее правило для проводимостей: если номера столбца и строки совпадают, то проводимости приписывают знак плюс (+), в противном случае - знак минус (-).

7. Если между узлами нет электрических связей, а имеет место переход через узел, то в соответствующую клетку матрицы ставят нуль.

8. После заполнения матрицы осуществляют проверку правильности ее определения. Правило здесь следующее: суммы проводимостей по каждой строке и столбцу должны равняться нулю.

9. После проверки матрицы и исправления возможных ошибок составляют уравнения Кирхгофа для характерных узлов. Здесь также используют формальные правила, заключающиеся в следующем. Нулевую строку и столбец зачеркивают, это соответствует привязке измерения напряжений относительно условного нулевого уровня, например, уровня "земли".

10. При составлении уравнений Кирхгофа для алгебраических сумм токов в характерных узлах используют совершенные свойства ОУ. Для современных ОУ можно принять, что входное сопротивление их бесконечно большое, а выходное - бесконечно малое. Таким образом, токами через входы можно пренебречь, поскольку они на несколько порядков меньше токов через цепи обратных связей. Кроме того, используется свойство ОУ с отрицательной обратной связью, которое выражается в близости потенциалов на инвертирующем и неинвертирующем входах.

11. В динамическом отношении ОУ в зависимости от соотношения его постоянной времени и постоянной времени внешних цепей может рассматриваться в виде безынерционного звена или в виде апериодического звена первого порядка. В последнем случае постоянные времени должны быть соизмеримы. Все современные ОУ имеют внутреннюю коррекцию, которая принудительно превращает их в апериодическое звено.

12. В случае описания электронных схем, выполненных на ОУ с несовершенными свойствами, например, с малым входным омическим сопротивлением или большим емкостным сопротивлением, это должно быть отражено в матрице проводимости в виде члена $1/R_{вх}$ или $C_{вх}s$.

В рассматриваемом примере на основе закона Кирхгофа для узла 2 по инвертирующему входу алгебраическая сумма токов равна нулю. В соответствии с матрицей проводимости это запишется в следующем виде:

$$\sum J_2 = 0, \quad -U_1/R_1 + (1/R_1 + 1/R_2 + C_2s)U_2 - U_3/R_2 - C_2sU_4 = 0. \quad (1)$$

Аналогично можно представить уравнение для суммы токов по неинвертирующему входу:

$$\sum J_{1'} = 0, \quad (1/R_3 + 1/R_4)U_{1'} - U_4/R_4 = 0. \quad (2)$$

Матрица для инвертирующего входа

	$0 \Leftrightarrow (U_0)$	$1 \Leftrightarrow (U_1)$	$2 \Leftrightarrow (U_2)$	$3 \Leftrightarrow (U_3)$	$4 \Leftrightarrow (U_4)$
$0 \Leftrightarrow (J_0)$	$C_1 s$	0	0	$-C_1 s$	0
$1 \Leftrightarrow (J_1)$	0	$1/R_1$	$-1/R_1$	0	0
$2 \Leftrightarrow (J_2)$	0	$-1/R_1$	$1/R_1 + 1/R_2 + C_2 s$	$-1/R_2$	$-C_2 s$
$3 \Leftrightarrow (J_3)$	$-C_1 s$	0	$-1/R_2$	$1/R_2 + C_1 s$	0
$4 \Leftrightarrow (J_4)$	0	0	$-C_2 s$	0	$C_2 s$

Матрица для неинвертирующего входа

	$0 \Leftrightarrow U_0$	$1 \Leftrightarrow U_1$	$4 \Leftrightarrow U_4$
$0 \Leftrightarrow J_0$	$1/R_3$	$-1/R_3$	0
$1 \Leftrightarrow J_1$	$-1/R_3$	$1/R_3 + 1/R_4$	$-1/R_4$
$4 \Leftrightarrow J_4$	0	$-1/R_4$	$1/R_4$

Примем для простоты $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$. Учитывая также, что $U_1 = U_{вх}$, $U_4 = U_{вых}$ и $U_1 = U_3$, из совместного решения уравнений (1) и (2) найдем передаточную функцию для рассматриваемой схемы:

$$W_{\phi}(s) = K / [(RC)^2 s^2 + RC(3 - K)s + 1]. \tag{3}$$

Коэффициент усиления фильтра равен

$$K = 1 + R_4 / R_3. \tag{4}$$

Передаточную функцию (3) можно представить в форме, используемой в качестве электрической модели колебательного звена для различных механических систем:

$$W_{\phi}(s) = K / (\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1),$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени колебательной системы, $\xi = (3 - K)/2$ - относительный коэффициент демпфирования (затухания).

Свойства фильтра определяются коэффициентом усиления (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент усиления K	Тип фильтра
1,000	С критическим затуханием
1,268	Фильтр Бесселя
1,586	Фильтр Баттерворта (оптимальное затухание)
2,234	Фильтр Чебышева с неравномерностью 3 дБ
3,000	Генератор сигналов с частотой $f = 1/2\pi RC$

Модель колебательного звена может быть также построена на инвертирующем ОУ.

Известно много вариантов ФНЧ [2–4], но не все они пригодны для применения в интегральных датчиках. Рассмотрим наиболее удачные варианты с точки зрения минимума погрешности, простоты конструкции, габаритов, энергопотребления и других характеристик.

Основными параметрами ФНЧ являются передаточная функция, несущая полную информацию как для статического состояния, так и для динамического и, в некоторых случаях, входное сопротивление. Далее для всех рассматриваемых фильтров приведены готовые передаточные функции, определенные по вышеописанной методике. Так как ФНЧ в емкостных датчиках применяются для сглаживания пульсаций выходного напряжения, то изменение динамических характеристик фильтра в широких пределах не оказывает существенного влияния на прохождение полезного сигнала. Однако следует обратить внимание на стабильность статического коэффициента передачи.

Одним из простейших вариантов активного фильтра является ФНЧ первого порядка на инвертирующем усилителе (рис. 2). Имеет следующую передаточную функцию:

$$W = - \frac{R_2 / R_1}{1 + R_2 C_1 s}.$$

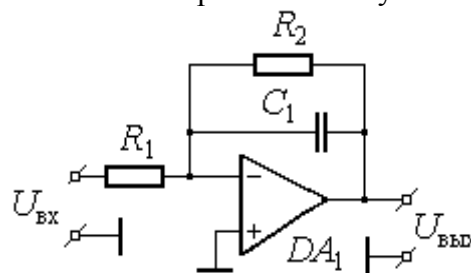


Рис. 2. Вариант ФНЧ 1-го порядка

Входное сопротивление постоянно: $R_{\text{вх}} = R_1$.

Основные недостатки – слабое сглаживание, зависимость коэффициента передачи от отношения резисторов. Может применяться в схемах с двухполупериодным детектором, имеющих настройку общего коэффициента передачи.

Другой вариант ФНЧ первого порядка на основе пассивного фильтра и неинвертирующего усилителя (рис. 3) также позволяет получить приемлемую фильтрацию при минимуме элементов.

Передаточная функция фильтра имеет вид:

$$W = \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + R_1 C_1 s}. \quad (1)$$

Из (1) видно, что его статический коэффициент передачи не может быть меньше единицы; в то же время, если убрать из схемы R_2 ($R_2 = \infty$), коэффициент передачи будет строго равен единице (не зависит от номиналов элементов).

Входное сопротивление фильтра может быть найдено в виде:

$$R_{\text{вх}} = \frac{1 + R_1 C_1 s}{C_1 s},$$

то есть для медленно меняющегося сигнала оно стремится к входному сопротивлению операционного усилителя, а для быстропеременного – превышает R_1 .

Недостатком схемы является сравнительно малый коэффициент подавления помех, достоинствами – простота конструкции, возможность получения единичного коэффициента усиления, не зависящего от номиналов элементов фильтра. Применение имеет смысл в конструкциях с двухполупериодным детектором.

В схемах на дискретных элементах обычно отдают предпочтение первому варианту ФНЧ, так как он имеет меньший фазовый сдвиг, то есть меньше вероятность самовозбуждения схемы в целом. Напротив, в интегральных схемах паразитные связи слабы, поэтому имеет смысл обратить внимание на второй вариант ФНЧ.

Рассмотрим два варианта ФНЧ второго порядка – структуру Рауха и Саллен-Ки [5]. Для структуры Рауха (4) передаточная функция имеет следующий вид:

$$W = - \frac{R_2 / R_1}{1 + C_2 (R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1) s + C_1 C_2 R_2 R_3 s^2}, \quad (2)$$

где R , C – параметры элементов схемы, s – оператор Лапласа.

Фильтры такого типа обладают простотой конструкции, хорошей селективностью, поэтому применяются очень часто, несмотря на зависимость коэффициента передачи от отношения сопротивлений.

Для структуры Саллен-Ки (рис. 5) передаточную функцию можно записать в виде

$$W = \frac{1 + R_4 / R_3}{1 + [C_2 (R_1 + R_2) - C_1 R_1 R_4 / R_3] s + C_1 C_2 R_1 R_2 s^2}.$$

Очевидно, что структура передаточной функции сложнее, чем у предыдущего фильтра, но при надлежащем выборе элементов ($R_3 = \infty$) она значительно упрощается:

$$W = \frac{1}{1 + C_2 (R_1 + R_2) s + C_1 C_2 R_1 R_2 s^2}.$$

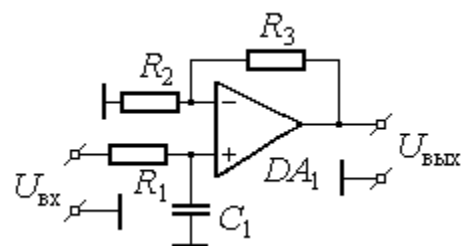


Рис. 3. Вариант ФНЧ 1-го порядка

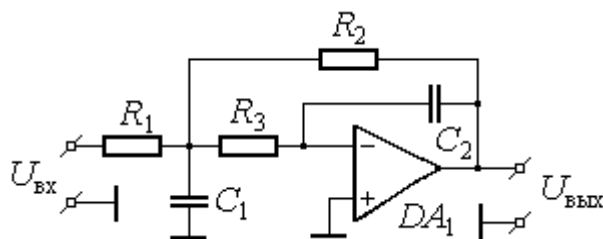


Рис. 4. Вариант ФНЧ второго порядка (структура Рауха)

Видно, что коэффициент передачи становится независимым от номиналов элементов схемы и равным единице. Фазовый сдвиг больше, чем у структуры Рауха, поэтому устойчивость несколько меньше, что при интегральном исполнении не имеет решающего значения.

Выводы

1. ФНЧ первого порядка на основе пассивного фильтра (рис. 3) позволяет получить приемлемую фильтрацию при минимуме элементов, единичный коэффициент усиления, не зависящий от номиналов элементов фильтра. Применение имеет смысл в конструкциях с двухполупериодным детектором.

2. Рассмотренные фильтры второго порядка имеют примерно одинаковые характеристики, поэтому могут применяться оба варианта, однако второй (структура Саллен-Ки, рис. 5) предпочтительнее для более точных датчиков.

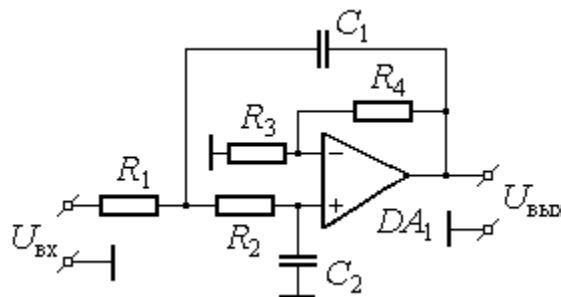


Рис. 5. Вариант ФНЧ второго порядка (структура Саллен-Ки)

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник для приборостроительных вузов В.Д. / Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород. 2002. – 500 с.
2. **Гусев, В.Г.** Электроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991.
3. **Хоровиц, П.** Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир. Т. 1. 1983. – 598 с.
4. **Шило, В.Л.** Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре / В.Л. Шило. – М.: Сов. радио, 1979. – 368 с.
5. **Гутников, В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ие, 1988.

Дата поступления
в редакцию 26.10.2012

A.N. Dolgov

APPLICATION NOTES FOR LOW-PASS FILTERS IN MEMS

Arzamassky polytechnic institute (branch)
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

In the development of mathematical models of analog filters, electrical components described as transfer functions. Matrix method of calculation is based on the known laws of Kirchhoff and differs from other methods of evidence and the ability to control the results. The method consists in a matrix of conductivity for all the nodes in the solution of Ohm's law in matrix form. Input-voltage op amp taken equal, the input currents are absent. If you need to take into account the non-ideal op amp in the scheme introduced relevant elements. Know a lot of options LPF, but not all are suitable for use in the integrated sensors. The article describes the most successful versions in terms of minimum error, simplicity of design, size, power consumption and other characteristics.

One of the simplest versions of the active filter is a first-order low-pass filter at the inverting amplifier. Its main disadvantages - weak smoothing, the dependence of the transfer from the ratio of resistors. Another variant of the first order low-pass filter based on a passive filter and non-inverting amplifier also provides a reasonable filtering with a minimum of elements, unity gain, independent of the values filter elements. Considered a second-order filters (structure Rauch and Sallen-Key) have similar characteristics, and can be used both, but the second is preferable for precise sensors, as its gain can be done regardless of the denomination of circuit elements and unity gain.

Key words: low-pass filter, MEMS, integral device.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 656.11

М. Е. Елисеев¹, Д. М. Пронин¹, А. А. Репников¹, М. Е. Сангалова²,
Т. Н. Томчинская¹

ПОДСИСТЕМА АНАЛИЗА ОЧАГОВ ИНТЕРАКТИВНОЙ КАРТЫ АВАРИЙНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Арзамасский филиал Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского²

Описываются принципы работы программного модуля анализа очагов интерактивной карты аварийности. Уточняется методика анализа очага аварийности, описанная в ранних работах авторов. Приводятся примеры проведения анализа с использованием разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: топографический анализ, ДТП, ГИС, геоинформационная система.

Необходимость разработки интерактивных карт аварийности для крупных городов очевидна [1]. Такие карты разрабатываются в ряде регионов [2], [3]. В их основе лежат два подхода: топографический анализ и ГИС-технологии. Топографический анализ ДТП – стандартный метод для выявления участков дорог с повышенной аварийностью («очагов ДТП»), ГИС-технологии подразумевают объединение пространственных и табличных данных в единое целое. Таким образом, для создания интерактивной карты необходима база данных ДТП, имеющая привязку к ГИС-карте.

Архитектура информационной системы, предназначенной для анализа ДТП, состоит из ведущей локальной подсистемы, обеспечивающей:

- 1) подготовку и сопровождение многослойной векторной карты города;
- 2) связь с базой данных ДТП;
- 3) статистический анализ причин ДТП;
- 4) экспорт в интернет подсистему (импорт данных из неё).

Интернет подсистема позволяет осуществлять обратную связь с субъектами дорожного движения, с помощью которой участники дорожного движения получают персонально ориентированную информацию о ДТП в режиме реального времени в виде тематических карт с аннотациями и рекомендуемыми путями объезда в тех случаях, когда это возможно.

Статистический анализ осуществляет специальный программный модуль – анализатор очага. Он должен для данной географической области (обычно не более 500 м²) сформулировать статистически наиболее вероятные гипотезы о причинах аварийности выявить потенциально опасные категории участников ДТП. Подразумевается, что очаг содержит достаточный объем статистической информации. На практике (по Нижнему Новгороду) рассматривались очаги размера около 100 м², в которых произошло более 100 ДТП за 2 года и 3 месяца, то есть около 50 ДТП за год. Очаги ДТП за последние годы территориально сохраняются. Сравнительный анализ числа ДТП за 2009, 2010 годы, 12 наиболее мощных очагов приведен в табл. 1. Очаги отсортированы по числу ДТП, выделены совпадающие районы (поле «nn» – число ДТП).

Таблица 1

2010 год			2009 год		
Улица	Дом	np	Улица	Дом	np
КОМИНТЕРНА	115	119	КУЗБАССКАЯ	1	86
МОСКОВСКОЕ ШОССЕ	296А	123	КАНАВИНСКИЙ МОСТ		88
ГАГАРИНА ПРОСП.	1	128	КОМСОМОЛЬСКАЯ ПЛ.	1	88
ОКСКИЙ СЪЕЗД		131	ГАГАРИНА ПРОСП.	1	91
КАНАВИНСКИЙ МОСТ		137	КОМИНТЕРНА	115	99
ЛЕНИНА ПРОСП.	33	188	ЛЕНИНА ПРОСП.	33	107
КУЗБАССКАЯ	1	192	ОКСКИЙ СЪЕЗД		118
РОДИОНОВА	187	196	ЛЕНИНА ПРОСП.	88	139
ЛЕНИНА ПРОСП.	73	236	ЛЕНИНА ПРОСП.	70	140
ЛЕНИНА ПРОСП.	70	254	ЛЕНИНА ПРОСП.	73	141
МЫЗИНСКИЙ МОСТ		272	МЫЗИНСКИЙ МОСТ		186
ЛЕНИНА ПРОСП.	75	343	ЛЕНИНА ПРОСП.	75	207

Для выявления особенностей очага использовалась теория, подробно описанная в работах [4, 5]. Напомним основные положения.

Основным маркером называется матрица следующего вида, элементами которой являются доли $\frac{n_i}{N}$, где n_i – число ДТП соответствующей категории водителей, N – общее число ДТП.

Таблица 2

Стаж\Возр.		<21	21 – 25	26 – 40	41 – 60	> 60
<1	муж.					
	жен.					
1-2	муж.					
	жен.					
3-6	муж.					
	жен.					
>6	муж.					
	жен.					

Временным маркером за промежуток времени $[t_1, t_2]$ с шагом t_0 называется матрица-строка (массив), элементами которой являются доли $\frac{n_i}{N}$, где N – прежнее, n_i – количество ДТП в интервале $[t_1 + it_0, t_1 + (i + 1)t_0]$.

Маркером причины называется матрица-строка, элементами которой являются доли $\frac{n_i}{N}$, где N – прежнее, n_i – количество ДТП, при совершении которых присутствовал i -й фактор. Список факторов – условий, сопутствующих ДТП или типов ДТП, устанавливается заранее.

Вычисляются основной и временной маркеры, маркер причины для всей базы ДТП, которая в данном случае берется в качестве генеральной совокупности. При анализе конкретного очага перечисленные маркеры вычисляются для него, вычисленные значения сравниваются со средними и выявляются особенности очага.

Приведем пример такого анализа для одного из очагов: «Комсомольская площадь, д. 1» (рис. 1).



Рис.1

Общее число ДТП – 191. Категории водителей, попадающие в ДТП в данном очаге чаще, чем в среднем приведены в табл. 3.

Таблица 3

Доля ДТП	Отношение к среднему	Пол	Возраст (лет)	Стаж (лет)
0,097	1,75	Мужчина	25-40	1-2
0,018	2,033	Женщина	40-60	1-2
0,018	3,96	Мужчина	20-25	>6
0,024	1,65	Мужчина	>60	>6

Рассматривался следующий список сопутствующих факторов и типов ДТП: «Задним ходом», «Дистанция», «Приоритет», «Скорость», «Боковой интервал», «Заснеженная дорога», «Гололедица», «Снежный накат», «Туман», «Снегопад», «Наезд на пешехода». Смысл пунктов достаточно ясен, так «Дистанция» – означает, что ДТП произошло по причине малой дистанции между авто, «Приоритет» – несоблюден приоритет при проезде перекрестка, перестроении и т. п., «Скорость» – выбран скоростной режим несоответствующий ситуации на дороге и т. д. Данный список не является окончательным и его состав – тема отдельного обсуждения, выходящего за рамки данной работы. Результаты работы программного модуля анализа причины приведены на рис. 2.

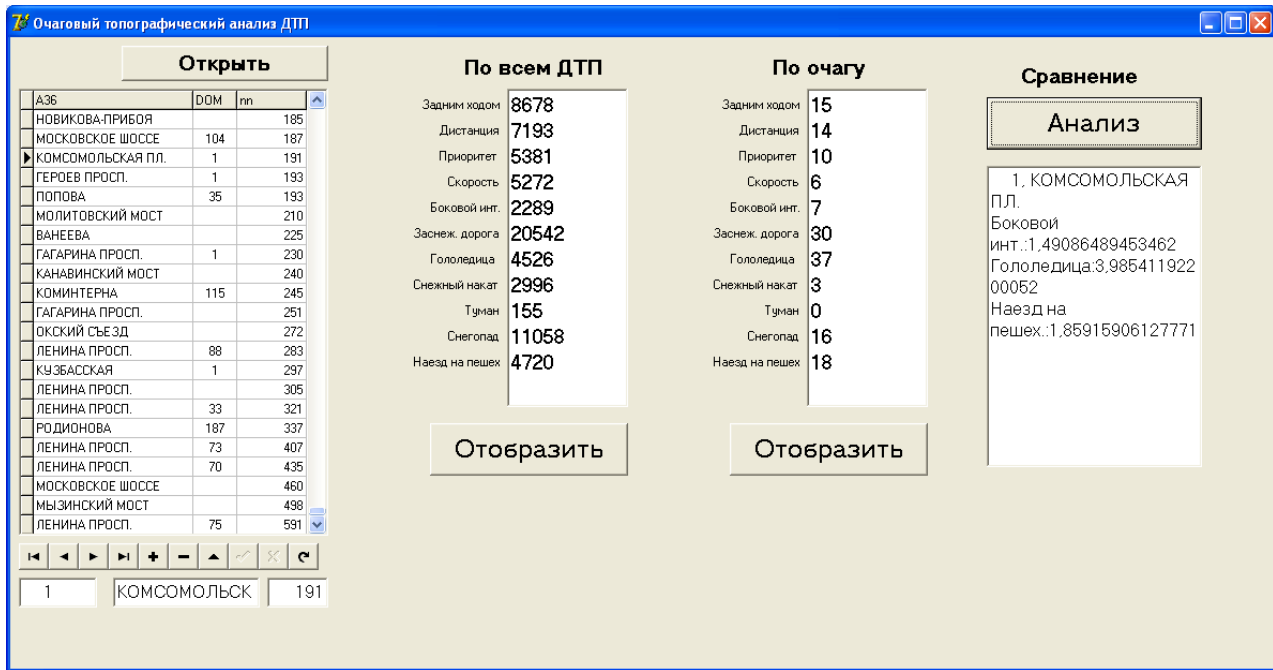


Рис. 2

Таким образом, аварий из-за недостаточного бокового интервала больше в 1,5 раза, из-за гололеда – больше в 4 раза, аварий с участием пешеходов – в 1,9 раза больше, чем в среднем.

Временной маркер был вычислен за период 01.01.2009 по 31.12.2010. В качестве шага t_0 выбран промежуток 1 месяц (различия в числе дней: 30 или 31, на наш взгляд, несущественны).

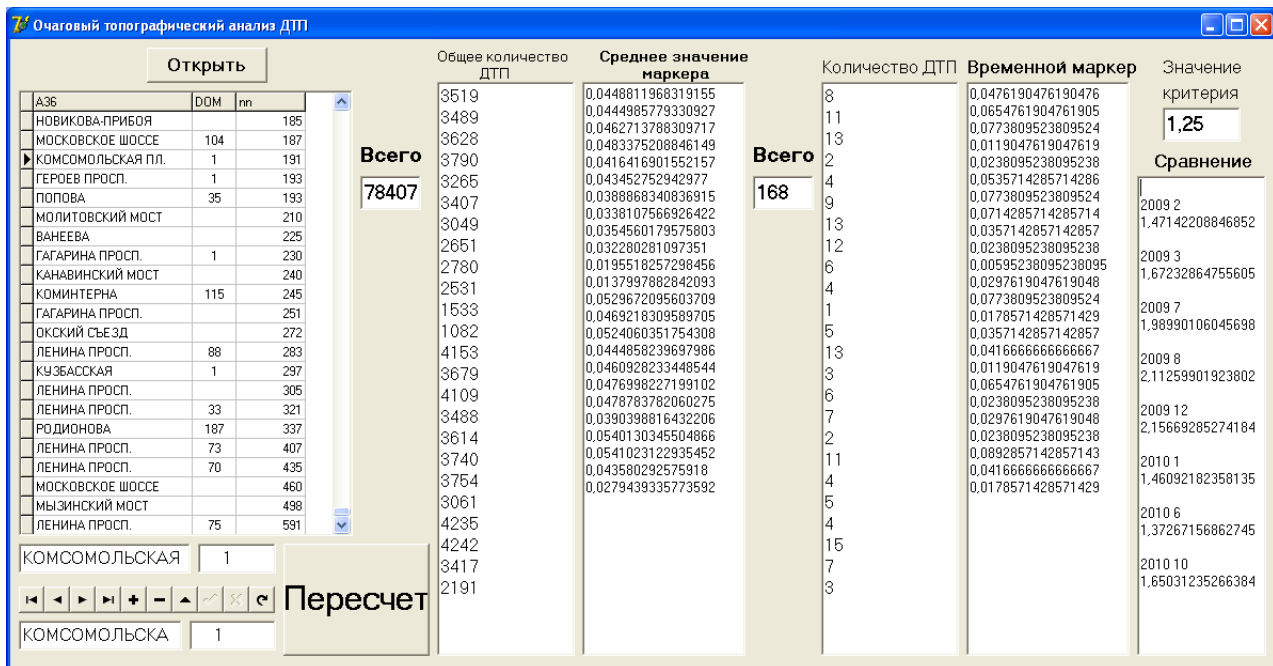


Рис. 3

Анализ (рис. 3) показывает, что превышения среднестатистических данных наблюдались как в зимние месяцы (2 2009, 12 2009, 1 2010) и близкие к ним (3 2009), так и в месяцы, когда о снеге и гололеде говорить не приходится (7 2009, 8 2009).

Комплексный анализ позволяет сделать следующие выводы. При проезде водителем данного участка дороги особое внимание необходимо уделить соблюдению бокового интервала и движению пешеходов. Непосредственный осмотр территории показывает, что на данном участке дороги имеется нерегулируемый пешеходный переход. Требуется проверка гипотезы о том, что он является одной из основных причин аварий.

Анализ категорий водителей показывает, что около 10 % ДТП приходится на мужчин 25-40 лет со стажем 1-2 года, впрочем пристального внимания заслуживают и остальные категории из табл. 3.

Аннотация данного очага может выглядеть следующим образом:

1) очаг отображается на слоях соответствующих строкам табл.3: «Мужчина, 25-40 лет, стаж 1-2 года» и т. д.;

2) текст «Обратите внимание на соблюдение бокового интервала и особое внимание к пешеходам вблизи перехода»;

3) в месяцы со снежным покровом (ноябрь – март) к аннотации добавляется «Осторожно – гололедица».

Безусловно, текст аннотации необходимо детально прорабатывать с учетом психологии категорий водителей.

Получение такого типа информации по каждому из основных 30-40 очагов крупного города с последующим нанесением ее на интерактивную карту позволит дать водителям детальную лично-ориентированную информацию.

Детальное рассмотрение изменения очага во времени, учет изменений, вносимых в дорожную инфраструктуру и визуализация этих данных в виде тематических карт с аннотациями может дать наглядную и полезную с точки зрения безопасности дорожного движения информацию о влиянии этих изменений на аварийность.

Библиографический список

1. www.edinros.ru
2. www.65.gibdd.ru
3. nick123.ru
4. **Елисеев, М. Е.** О интерактивной карте аварийности крупного города / [М. Е. Елисеев и др.] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011: сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Транспорт/Автомобильные перевозки. – Одесса: Черноморье, 2011.
5. **Елисеев, М. Е.** О статистическом анализе очагов аварийности // Автотранспортное предприятие. М., 2012. №4.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

М. Е. Eliseev¹, А. А. Repnikov¹, D. M. Pronin¹, М.Е. Sangalov², Т. N. Tomchinskaya¹

SUBSYSTEM OF THE ANALYSIS OF CENTERS OF THE INTERACTIVE MAP OF TRAFFIC ACCIDENTS

Nizhny Novgorod state university n.a N.I. Lobachevsky¹,
Nizhny Novgorod state university n.a N.I. Lobachevsky(Arzamassky branch)

The article describes the principles of working of the test module analysis of centers of interactive map of the traffic accident. The method of the analysis of the centers of the traffic accidents described in earlier works of the authors is being defined. There are given examples of the analysis using the software.

Key words: topographic analysis, traffic collision, TRC, traffic accident, GIS, geographic information system.

УДК 534.6 + 612.172.4: 57.02

А.А. Кузнецов, С.А. Пермяков

О ЕСТЕСТВЕННОЙ НОРМАЛИЗАЦИИ ДИАГРАММЫ РИТМА СЕРДЦА

Владимирский государственный университет

По данным ЭКГ весенней серии 230 регистраций проведен структурно-топологический анализ на базе ярусной технологии обработки диаграмм ритма сердца с использованием параметров энтропии. Введено понятие избыточной продукции информационной энтропии и проанализировано изменение этого параметра. По данным анализа сделан вывод о механизме естественной нормализации ритма сердца. Предложено использовать результаты работы для формирования «эталонного ритма» с реализацией в форме виртуальной диаграммы ритма сердца. Предложена физиологическая трактовка «эталонного ритма» и исследованы его характеристики.

Ключевые слова: электрокардиограмма, нормальный закон распределения, виртуальная диаграмма ритма сердца.

Разнообразное и большое количество поступающих к сердцу электрических сигналов и влияний иной природы приводит к их совместному воздействию на электрическую (возбуждение и проводимость) и сократительную функции сердца. Аддитивный и мультипликативный характер реализации текущего результирующего действия на проведение электрического сигнала по электропроводящей системе сердца и механическое сокращение миокарда создают своеобразную динамическую базу флуктуаций регистрируемых параметров электрокардиографического сигнала [1–4].

Для изолированного сердца *invitro* эта динамическая база, во-первых, сильно обеднена, а во-вторых – происходит смена управляющего сигнала со стороны центральной нервной системы на «внутреннюю» функцию автоматии сердца. В таком случае при «назначенной» частоте и амплитуде разрядов групп кардиомиоцитов активной среды, например, в синоатриальном узле, на электрокардиограмме расстояние между соседними зубцами R будет неизменным, а амплитудные значения этого зубца (или QRS комплекса) будут медленно падать за счет постепенно выходящих в раствор ионов. Сократительная функция сердца при этом также будет медленно терять выраженность, в частности, за счет выхода ионов кальция [4].

Для сердца *invivo* здоровых молодых людей флуктуации регистрируемых параметров управляющего сигнала имеют почти симметричное распределение около среднего значения. Так слабая асимметрия в норме характерна для всех распределений ритмограмм и связана с конечным размером параметрических выборок, захватывающих лишь часть периода долгопериодических медленных волн влияния [3]. Коэффициенты асимметрии и эксцесса таких распределений с ростом длины записи имеют почти периодическую затухающую динамику, определяемую структурой медленной волны [2, 5]. Ослабление корреляции сигналов внешних источников с управляющим сигналом, в частности, за счет адаптации, приводит к результирующему ослаблению их влияния, что в параметрических распределениях отражается падением вероятности проявлений этих событий при удалении от наиболее вероятного (среднего). Дальние корреляции отражены более редкими событиями. Таким образом, стандартное отклонение можно трактовать удвоенной амплитудой флуктуаций регистрируемых параметров основного сигнала, при котором влияние иных внешних источников остается статистически значимым. Но является ли это влияние функционально значимым?

Цель работы – определение механизма естественной нормализации диаграммы ритма сердца для здоровых молодых людей в состоянии покоя.

О роли эргодической гипотезы для проведения статистического анализа

Объектами статистического анализа являются ритмограммы, или диаграммы ритма сердца (ДРС) здоровых молодых людей, представленные в графическом и цифровом форматах. Первая стадия подготовки их к проведению статистического анализа включает в себя проверку

стационарности записей, или одинакового качества стохастичности реализуемых для анализа участков ритмограмм. Положительным результатом такой проверки принято считать выполнения в той или иной мере (приближении) эргодической гипотезы Больцмана. Ритмограммы могут составлять группу статистического ансамбля только по тем параметрам, значения которых, осредненные по группе и по времени, не отличаются. Мера выполнения этой гипотезы по тому или иному параметру определена величиной расхождения указанных значений. Но чаще при такой проверке исследователи занимают прагматичную позицию, оценивая по кривой экспериментального полигона форму функции распределения приборной реализации сигнала. Сравнивая, оценочные функции распределения, делают вывод об одинаковой или неодинаковой природе флуктуаций, и далее, о возможности сопоставления реализаций сигналов внутри статистического ансамбля. Оставляя в стороне критику такого подхода, заметим, что при многофакторном анализе он теряет свою привлекательность по признаку прагматичности.

Выполнение эргодической гипотезы для термодинамических систем как совокупности материальных точек составляющих статистический ансамбль, свидетельствует о состоянии равновесия. Для реальных систем выставляется необходимое требование одинаковости этих систем – «изготовления всех систем по одному рецепту». С ростом числа параметров растет и сложность выполнения этого требования. При исследовании ритмограмм разных людей можно лишь приблизиться к условиям эргодичности, выполнением некоторых и одинаковых для всех обследуемых требований. Они должны быть молодыми, одного возраста и здоровыми, одной силы и направленности мотиваций, одним распорядком дня и желательным темперамента. Все эти требования в той или иной мере удовлетворяют одной группе студентов второго курса обучения в государственном университете. Однако сильное различие может быть в темпераменте, определяющем психические и эмоциональные проявления. В состоянии психоэмоционального покоя средние значения параметров variability ритма сердца (HRV) в рамках доверительных интервалов должны быть одинаковыми и постоянными для группы и для любой одиночной серии регистраций.

Методика и результаты эксперимента

По данным регистраций электрокардиограмм (ЭКГ) студентов одной группы (24 человека) за февраль – май 2012 г., получено 230 ритмограмм в форме цифровых рядов последовательностей R-R интервалов на ЭКГ. Ритмограммы, как носители фазовой (информационной) составляющей ЭКГ, выбраны в качестве объектов исследования с использованием инструментов структурно-топологического анализа на базе ярусной технологии [2, 6].

При использовании ярусной технологии обработки диаграмм ритма сердца (ДРС) ширина столбца гистограммы становится равной шагу дискретизации записи ЭКГ по временной оси. В таком случае известная форма Шеннона расчета информационной энтропии $I = -\sum p_i \log p_i$ может быть переписана в виде $I^* = (A/n) \log \Gamma$, где A – переводной коэффициент, n – объем выборки (размер цифрового ряда), Γ – полиномиальный коэффициент, аналог термодинамической вероятности в формуле Больцмана для расчета энтропии термодинамической системы. Использование второй формулы обретает ясный физический смысл, но по сравнению с формой Шеннона имеет небольшую погрешность (2–3%), монотонно уменьшающуюся с ростом n [2, 6].

Предположение о естественной нормализации ритма сердца позволяет использовать в качестве критерия предельного состояния ритма расчетную величину энтропии $H(X) = \log[(2\pi e)^{0.5} \sigma / \Delta x]$ бесконечного ряда случайных чисел, распределенных по нормальному закону. Расчетному значению I^* определенной ритмограммы ставится в соответствие это значение, рассчитанное для стандартного отклонения ритмограммы при постоянном шаге дискретизации $\Delta x = 1$ мс. При этом всегда выполняется неравенство $I^* < H(X)$ [2].

Экспериментально доказанным фактом является функциональная зависимость I^* от стандартного отклонения σ ритмограммы в форме: $I^* = \log_2 3\sigma - i$ [2], которая и является основным аргументом для выдвинутого выше предположения. Тогда отклонение $\delta H(X) = H(X) - I^*$ должно зависеть от величины нового параметра i . На рис. 1 приведены точечные графики этой зависимости для комбинированных и серийных регистраций ЭКГ.

При комбинированных регистрациях ЭКГ группы, состоящей из 24 человек (130 регистраций), каждый обследуемый проходил 5–8 регистраций. Серийные регистрации проводились для двух студентов (по 50 регистраций) той же группы ежедневно вечером в течение двух месяцев (март – апрель).

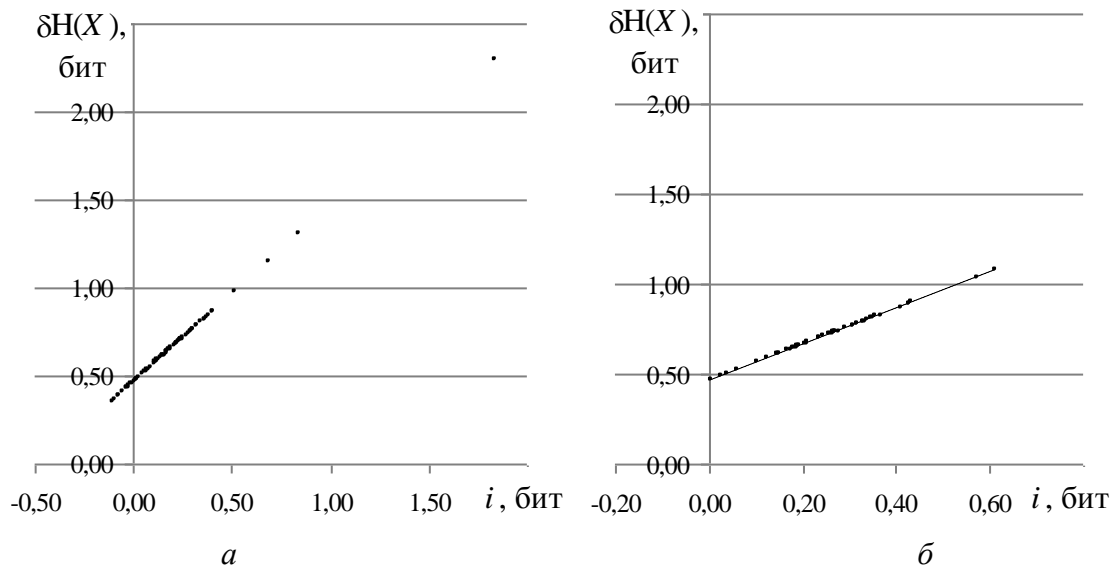


Рис. 1. Графики зависимости $\Delta H(X)(i)$ для комбинированных (а) и серийных (б) регистраций. Приведены линии тренда (штриховая линия)

Обсуждение результатов

Линии тренда на обоих графиках рис. 1 определяют прочную линейную функциональную связь между параметрами в форме: $\delta H(X) = i + 0,4612$ с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 1$. Простая подстановка приведенных ранее формул в полученную зависимость при $i = 0$ дает тот же результат с такой же точностью. Однако и при $i \neq 0$ полученная закономерность не меняется. Она остается неизменной с той же достоверностью для всех проверенных длин записей ЭКГ других людей: от 3 минут – до 4 часов. Аддитивная постоянная $\delta i = 0,4612$ бит не зависит от объема выборки в указанных пределах проверки, а, следовательно, не зависит от погрешности выбора расчетной формы информационной энтропии I^* (см. выше). Источником этой постоянной оказалась частота оцифровки данных ЭКГ, или шаг дискретизации ЭКГ. С ростом частоты и уменьшением Δx количество значащих цифр в значениях R-R интервалов растет, вызывая рост I^* .

Основные параметры $H(X)$ и I^* определены посредством функциональной связи со стандартным отклонением σ . Можно сказать, что модуль разности между ними равен постоянной величине $\delta i = 0,4612$ бит с точностью до переменной величины i , корректирующей взаимоотношения указанных функций при текущем изменении σ . В рамках такой трактовки параметрических связей исследуем поведение параметра i при текущих изменениях параметров $H(X)$ и I^* . При росте величины σ величина параметра $H(X)$ всегда функционально растет ($\Delta H(X) > 0$), но при этом величина I^* может расти ($\Delta I^* > 0$), оставаться неизменной ($\Delta I^* = 0$) и даже уменьшаться ($\Delta I^* < 0$) (табл. 1).

Как известно [2, 5–7], информационная энтропия количественно определяет степень неупорядоченности (хаотичности) распределения значений R-R интервалов на ДРС. Но как сопоставить нарастающую структуризацию ДРС ($\Delta I^* < 0$) с ростом σ , и наоборот? Для обоснования таких событий и по форме записи $I^* + i = \log_2 3\sigma$, обозначим параметр i избыточной продукцией энтропии [2]. Его реакции на разные случаи взаимоотношений основных параметров проанализированы в таблице.

Таблица 1

Изменение избыточной продукции энтропии ритма сердца

Параметры	$\Delta H(X) > 0,$ $\Delta I^* > 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* < 0$	$\Delta H(X) > 0,$ $\Delta I^* < 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* = 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* > 0$
$ \Delta H(X) > \Delta I^* $	$\Delta i > 0, i \uparrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow\uparrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$
$ \Delta H(X) < \Delta I^* $	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow\uparrow\uparrow$	–	$\Delta i < 0, i \downarrow$
Частота события, (%)	очень часто (48 %)	очень часто (48%)	редко (2 %)	очень редко (1%)	очень редко (1%)
№№ столбцов	1	2	3	4	5

Как видно, на направление и силу реакции значительное влияние оказывает относительная скорость изменения I^* . При одновременном росте основных параметров и опережении $\Delta H(X) > \Delta I^*$ предоставляемая величина стандартного отклонения превышает требуемую для структуры ритма. Величина I^* меньше необходимой, что восполняется растущей (\uparrow) величиной i .

Данные первых двух столбцов определены относительно небольшими абсолютными значениями i и малыми их изменениями. Данные трех других столбцов связаны с отходом значения i от нормы (около нуля) до значений 0,4 – 0,6. Третий столбец содержит данные о сильном росте i при противоположном изменении основных параметров. После этого обычно наступают корректирующие события, описываемые в 4 и 5 столбцах.

Причинно-следственные отношения определены в 96 % событий (табл.). Редкие события асинхронного изменения основных параметров указывают на причинную роль механизма регуляции, задающего величину стандартного отклонения. Внутри взаимоотношений основных параметров латентные изменения величины I^* – реакционные. Так рост величины I^* при $\Delta H(X) < 0$ (столбец 5) свидетельствует о быстрой релаксации регуляции ритма. Неупорядоченность ритма сердца непрерывно подстраивается под переменное влияние вегетативной нервной системы, сигнализируя о степени напряжения адаптационных механизмов и корректируя работу механизмов регуляции ритма текущей самонастройкой нормализации распределения под каждый новый задаваемый уровень стандартного отклонения.

Виртуальная диаграмма ритма сердца

До настоящего времени применение метода физических аналогий и сопоставлений для реальных диаграмм ритма сердца (ДРС) не было успешным. Отсутствие «эталона» приводило к необходимости парного сравнения ДРС. На основе проведенного исследования и в качестве эталонной ДРС, как реализации эталонного ритма сердца при ФСО в норме, предлагается виртуальная диаграмма ритма сердца. Виртуальной (воображаемой) диаграммой ритма сердца (вДРС) автор называет диаграмму, построенную генерацией случайных чисел по нормальному закону распределения около среднего значения $\langle X \rangle$ с назначенной величиной стандартного отклонения (σ) [2, 5, 6, 8].

Все основные параметры (X) варибельности сердечного ритма (ВСР) временной и частотной области, определенные по вДРС и в сравнении с ДРС здоровых людей, имеют качественно одинаковую функциональную зависимость от σ , которая практически не зависит от объема n выборки [8].

Ярусная структура вДРС с заданными первичными значениями σ и Δx наполняется однородно с учетом нормального закона распределения. При ее формировании все микропереходы между ярусами значений R-R равновероятны. При формировании ДРС предпочтение обычно (в норме) отдается соседним переходам. Это легко проверяется при построении дифференциальной ДРС [9]. Значение σ обеспечивается внешними низкочастотными процессами, проявляющихся в формах медленных волн [3]. Поэтому при формировании вДРС преобладают «процессы» диапазонов высоких (HF) и низких (LF) частот, а в случае ДРС преобладают процессы диапазонов очень низких (VLF) и ультранизких (ULF) частот [1].

Ярусная структура вДРС, определенная постоянной и не равной нулю величиной Δx , формируется без внешней регуляции, но под заданные ограничения. С ростом объема выборки величина среднего межъярусного перехода $\langle \Delta_{\text{я}} \rangle \rightarrow \Delta x$, значение информационной энтропии монотонно стремится к значению $H(X)$, а избыток продукции энтропии i также монотонно приближается к нулю (рис. 2, а).

В формировании реальной ДРС на базе собственной функции автоматии сердца участвуют два внешних механизма: детерминистский внешней регуляции ритма с частотным механизмом наполнения ярусами и самих ярусов и хаотический, связанный с шумом внешних и внутренних влияний. Проявление первого механизма приводит к структуризации ярусной диаграммы, проявление второго – к деструктуризации. В рамках такого разделения системного процесса формирования ритма вДРС представляет только хаотическую составляющую с максимальной степенью неупорядоченности значений R-R в рамках заданной величины σ и является динамической базой механизмов адаптации организма к внешним влияниям.

«Рождение» каждого нового яруса при росте n фиксируется разными параметрами поразному. Число «рабочих» ярусов прирастает на 1, если ярус «открылся» одним значением. Величина I^* на это не реагирует, и чувствуют лишь подтверждение этого открытия еще одним значением. Поэтому ход функции $I^*(n)$ всегда запаздывает относительно $k_{\text{я}}^*(n)$. Отсюда следует очевидное правило формирования диаграммы ритма: рост $k_{\text{я}}^*$ первичен по отношению к функции их неупорядоченного формирования.

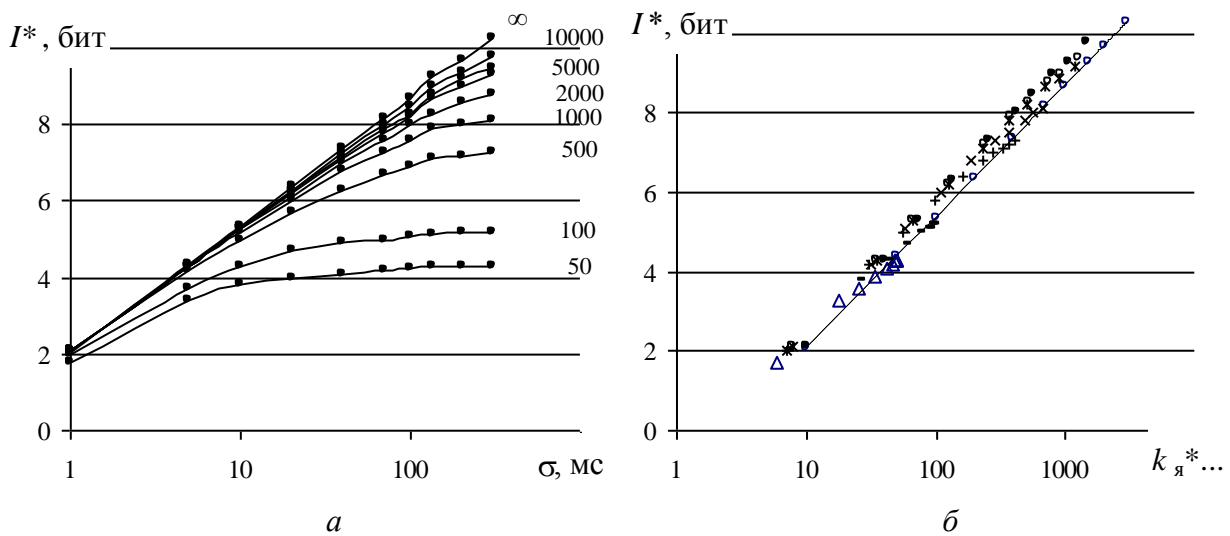


Рис. 2. Графики зависимости информационной энтропии $I^*(\sigma, n)$ (а) и $I^*(k_{\text{я}}^*, n)$ для возрастающего ряда значений σ и для разных n : 50 (Δ), 100 (-), 500 (+), 1000 (x), 3600 (ж), 10000 (\bullet) и $n \rightarrow \infty$ (o) с уравнением трендовой линии $I^* = \log_2(k_{\text{я}}^*) - 1,28$ при $R^2=1$

На рис. 2 б приведен график зависимости $I^*(k_{\text{я}}^*)$ в полулогарифмическом масштабе для разных n , построенный по возрастающему ряду значений σ (1, 5, 10, ..., 300). Видно, что при росте числа ярусов зависимость степени неупорядоченности ярусной структуры вДРС от числа ярусов на ней слабеет по логарифмическому закону.

Предложенные характеристики вДРС могут быть полезны при сравнении значений параметров реальной ДРС, описывающей регулируемое формирование диаграммы и вДРС, описывающей нерегулируемое хаотическое формирование диаграммы. Применение структурно-топологических характеристик ($k_{\text{я}}^*, I^*$) при анализе диаграмм ритма имеет очевидные преимущества над использованием параметров ВСП, так как последние могут быть адекватными в применении лишь для стационарных процессов.

Выводы

1. Причинно-следственные отношения между параметрами энтропии ДРС, являются основным доказательным аргументом естественной нормализации ритмограммы, непрерывно следующей за эффектами работы механизмов регуляции ритма сердца здоровых молодых людей в состоянии покоя.

2. Показателем степени отклонения распределения ритмограммы от нормального закона распределения является числовой параметр избытка продукции энтропии.

3. Постоянная величина $\delta i = 0,4612$ бит имеет технологическую природу и характеризует минимальный избыток продукции энтропии ДРС при заданной частоте оцифровки исходных данных ритмограмм.

4. Форма функциональной связи $\delta H(X) = i + 0,4612$ подтверждает экспериментальную форму функциональной зависимости: $I^* = \log_2 3\sigma - i$.

5. Виртуальная ДРС является математической моделью ДРС с первично заданной величиной стандартного отклонения (σ) и распределением по нормальному закону. Ярусная структура в ДРС формируется без внешней регуляции, представляет хаотическую составляющую ритма с максимальной степенью неупорядоченности в рамках заданной величины σ , определяющую динамическую базу механизмов адаптации организма к внешним влияниям.

Библиографический список

1. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // European Heart Journal. 1996. V.17. P. 354–381.
2. Кузнецов А.А. Системный анализ и обработка электрокардиографической информации: дисс. ... д.т.н. – Н. Новгород: 2012. – 297 с.
3. **Баевский, Р.М.** Введение в донозологическую диагностику / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. – М.: Слово. 2008. – 176 с.
4. **Анохин, П.К.** Философские аспекты теории функциональной системы: избр. труды / П.К. Анохин. – М.: Наука. 1978. – 400 с.
5. **Кузнецов, А.А.** Методы анализа и обработки электрокардиографических сигналов: Новые подходы к выделению информации: монография / А.А. Кузнецов. – Владимир: Изд-во ВлГУ. 2008. – 140 с.
6. **Кузнецов, А.А.** Энтропия ритма сердца: монография / А.А. Кузнецов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2009. – 172 с.
7. **Мун, Ф.** Хаотические колебания. Вводный курс для научных сотрудников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир. 1990. – 312 с.
8. **Кузнецов, А. А.** Характеристики виртуальной диаграммы ритма сердца // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 91– 6.
9. **Кузнецов, А. А.** Структурно-топологические особенности диаграмм ритма сердца // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 80–85.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

A.A. Kuznetsov, S.A. Permjakov

ABOUT NATURAL NORMALIZATION OF THE HEART RHYTHM DIAGRAM

Vladimir state university

On 230 spring series registration electrocardiogram data the structural - topological analysis on base of heart rhythm diagrams storey technologies processing with use of entropy parameters is spent. The concept of information entropy superfluous production is entered and change of this parameter is analyzed. According to the analysis the conclusion about the mechanism of natural normalization of a heart rhythm is made. It is offered to use results of work for formation of a «reference rhythm» with realization in the form of the heart rhythm virtual diagram. The physiological treatment of «reference rhythm» is offered and its characteristics are investigated.

Key words: the electrocardiogram, the normal law of distribution, the heart rhythm virtual diagram

УДК 519.3+513.7

Л. Н. Кривоносов, В.А. Лукьянов

**ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ В 4-МЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
КОНФОРМНОЙ СВЯЗНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Электрон в атоме движется свободно, в противном случае он бы излучал. Свободное движение, т.е. движение по инерции, без воздействия сил, геометрически трактуется как движение по экстремали функционала длины дуги. В геометрии Минковского такими экстремальными являются только прямые, что явно не согласуется с траекторией электрона в атоме. Ближайшим обобщением геометрии Минковского является геометрия 4-мерного пространства конформной связности. Локально эти две геометрии имеют одинаковые структуры, но различие их глобальных структур приводит к существованию в пространстве конформной связности весьма сложных экстремальных кривых, которые можно использовать для моделирования свободного движения элементарных бозоновских частиц. В статье изучаются экстремальные кривые двух видов: времениподобные и изотропные. Времениподобные кривые характеризуются тремя функциями длины дуги: m , c , и p , которые для экстремальных кривых выражаются через эллиптическую функцию Вейерштрасса. Изотропные кривые характеризуются двумя функциями длины дуги: f и g , которые для экстремальных кривых оказываются константами. Такие изотропные кривые могли бы моделировать движение гравитона, но отсутствие экспериментальных данных о его свойствах не позволяет что-либо сказать о согласии этой модели с реальностью. В отличие от гравитона, экспериментальные данные о фотоне очень богаты. Но авторам не удалось справиться с вычислительными трудностями при исследовании **плоской** экстремальной изотропной кривой, которая могла бы моделировать движение фотона, т.к. фотон является плоской волной. Хотя лагранжиан для плоской изотропной кривой авторам известен, в статью он не включен.

Экстремальные кривые в 4-мерном пространстве конформной связности изучались в работе [1], но в ней были допущены некоторые вычислительные ошибки. В данной статье устранены ошибки и уточнены некоторые формулировки

Ключевые слова: многообразие конформной связности, эллиптическая функция Вейерштрасса, уравнение Эйлера-Лагранжа, экстремальные кривые, изотропная экстремальная кривая, времениподобная экстремальная кривая.

Исходные положения

Пространства конформной связности были введены Картаном в [2]. Если $x(x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ и $z(z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$ - две точки проективного 5-мерного пространства P_5 , то их скалярное произведение определим как

$$(x, z) = x_0z_5 + x_5z_0 - x_1z_1 + x_2z_2 + x_3z_3 + x_4z_4.$$

Каждой точке x поставим в соответствие репер $\{x, y_i, X\}$, $i = 1, 2, 3, 4$ состоящий из шести линейно независимых точек пространства P_5 , удовлетворяющих условиям ортогональности

$$(x, x) = (X, X) = (x, y_i) = (X, y_i) = 0, \quad (x, X) = 1, \quad (y_i, y_j) = \eta_{ij}, \tag{1}$$

где

$$(\eta_{ij}) = (\eta^{ij}) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Уравнения инфинитезимальных перемещений репера $\{x, y_i, X\}$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} dx = \omega^i y_i + \omega_0^0 x, \\ dy_i = \omega_i^k y_k + \omega_i^5 x + \omega_i^5 X, \\ dX = \omega_5^k y_k - \omega_0^0 X, \end{cases} \tag{2}$$

где пфаффовы формы (инфинитезимальные коэффициенты) удовлетворяют соотношениям [2, с. 161]:

$$\omega_i^5 + \eta_{ij} \omega^j = 0, \quad \eta_{ik} \omega_j^k + \eta_{jk} \omega_i^k = 0, \quad \eta_{ij} \omega_5^j + \omega_i = 0.$$

Здесь и далее все индексы пробегают значения 1,2,3,4; по одноименным верхним и нижним индексам предполагается суммирование. Условия интегрируемости системы (2) имеют вид [2, с. 160]

$$\begin{cases} d\omega_0^0 + \omega_k \wedge \omega^k = 0, \\ d\omega^i + \omega_k^i \wedge \omega^k + \omega^i \wedge \omega_0^0 = 0, \\ d\omega_i + \omega_k \wedge \omega_i^k + \omega_0^0 \wedge \omega_i = 0, \\ d\omega_i^j + \omega_k^j \wedge \omega_i^k + \omega^j \wedge \omega_i + \eta^{jm} \omega_m \wedge \eta_{in} \omega^n = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В настоящей статье мы будем использовать лагранжианы, представимые в виде функции от скалярных произведений $(x^{(k)}, x^{(l)})$, где $k, l \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, а символом $x^{(k)}$ обозначена производная k -го порядка. Если L - лагранжиан, то обозначим за $L_{x^{(k)}}$ величину, вычисляемую по формуле

$$L_{x^{(k)}} = \sum_{k \neq l} \frac{\partial L}{\partial (x^{(k)}, x^{(l)})} x^{(l)} + \frac{2\partial L}{\partial (x^{(k)}, x^{(k)})} x^{(k)}.$$

В частности, если $L = L(x^{(k)}, x^{(l)})$, то

$$L_{x^{(p)}} = \begin{cases} 0, & \text{если } p \neq k, p \neq l; \\ x^{(l)}, & \text{если } p = k \neq l; \\ 2x^{(k)}, & \text{если } p = k = l. \end{cases} \quad (4)$$

Времениподобная кривая

Рассмотрим перемещение подвижного репера $\{x, y_i, X\}$ вдоль времениподобных кривых, то есть таких кривых, что $(dx, dx) < 0$. С помощью формул перемещения канонического репера мы найдем дифференциальное уравнение экстремальных кривых, то есть кривых, являющихся экстремальными функционала

$I = \int_{s_0}^{s_1} ds$, где ds - элемент длины дуги времениподобной кривой.

Канонический репер времениподобной кривой

Реперы первого порядка определяются равенствами $\omega^2 = \omega^3 = \omega^4 = 0$, а ω^1 - параметрическая форма. Внешним дифференцированием, используя формулы (3), получим, что реперы пятого порядка будут определяться равенствами

$$\begin{aligned} \omega^2 = \omega^3 = \omega^4 = \omega_1^2 = \omega_1^3 = \omega_1^4 = \omega_2^4 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_0^0 = 0, \\ \omega_2 = \omega^1, \quad \omega_3^3 = c\omega^1, \quad \omega_1 = m\omega^1, \quad \omega_3^4 = p\omega^1, \end{aligned}$$

где $c(s), m(s), p(s)$ - инварианты, а $\omega^1 = ds$ - дифференциал длины дуги. Следовательно, согласно формулам (2), уравнения инфинитезимальных перемещений канонического репера будут такими:

$$\begin{cases} \overline{x}' = \overline{y}_1, \quad \underline{\quad} \\ \overline{y}_1' = \overline{m}x + \overline{X}, \\ \overline{X}' = \overline{m}y_1 - \underline{y}_2, \\ \underline{y}_2' = x + \underline{c}y_3, \quad \underline{\quad} \\ \underline{y}_3' = -c\underline{y}_2 + p\underline{y}_4, \\ \underline{y}_4' = -p\underline{y}_3. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\bar{x} = \lambda x$ - инвариантно пронормированная точка x , а штрихом обозначена производная по инвариантному параметру s .

Теперь займемся поисками экстремалей функционала $I = \int_{s_0}^{s_1} ds = \int_{t_0}^{t_1} L(t)dt$. Согласно

рассуждениям, приведенным в [3, с. 43], если лагранжиан L записан в виде $L(t) = \frac{\Delta_3(t)^{\frac{1}{4}}}{\Delta_2(t)^{\frac{1}{3}}}$, где

$$\Delta_3(t) = \begin{vmatrix} (x, x) & (x, \dot{x}) & (x, \ddot{x}) & (x, \dddot{x}) \\ (x, \dot{x}) & (x, \ddot{x}) & (x, \dddot{x}) & (x, \dots) \\ (x, \ddot{x}) & (x, \dddot{x}) & (x, \dots) & (x, \dots) \\ (x, \ddot{x}) & (x, \dddot{x}) & (x, \dots) & (x, \dots) \\ (x, \ddot{x}) & (x, \dddot{x}) & (x, \dots) & (x, \dots) \end{vmatrix}, \quad \Delta_2(t) = \begin{vmatrix} (x, x) & (x, \dot{x}) & (x, \ddot{x}) \\ (x, \dot{x}) & (x, \ddot{x}) & (x, \ddot{x}) \\ (x, \ddot{x}) & (x, \ddot{x}) & (x, \ddot{x}) \end{vmatrix} \quad (6)$$

(здесь символом \dot{x} обозначена производная по параметру t), то он будет удовлетворять нужным нам условиям

$$L[c(t)x, (c(t)x)', (c(t)x)'', (c(t)x)'''] = L[x, x', x'', x'''],$$

$$L[x(t), x'(t), x''(t), x'''(t)]dt = L[x(s), x'(s), x''(s), x'''(s)]ds.$$

Первое условие означает инвариантность лагранжиана L относительно умножения x на произвольную функцию $c(t)$. Необходимость этого требования следует из того, что в проективном пространстве координаты точки определены с точностью до множителя. Второе условие означает инвариантность функционала $I = \int_{t_0}^{t_1} L(t)dt$ относительно замены параметра.

Так как у нас имеется условие связи $(x, x) = 0$, уравнение Эйлера-Лагранжа нужно составлять для лагранжиана

$$L^*(t) = L(t) + \lambda(x, x) = \frac{\Delta_3(t)^{\frac{1}{4}}}{\Delta_2(t)^{\frac{1}{3}}} + \lambda(x, x),$$

где $\lambda(t)$ - произвольная функция.

Уравнение Эйлера-Лагранжа

Экстремальные кривые должны удовлетворять уравнению Эйлера-Лагранжа

$$\frac{d^3}{ds^3} L_{x'''}^* - \frac{d^2}{ds^2} L_{x''}^* + \frac{d}{ds} L_{x'}^* - L_x^* = 0. \quad (7)$$

Вычислив величины $\frac{d^k}{ds^k} L_{x^{(k)}}^*$ по формулам (4) и (6) и используя (5), получим

$$\left(c^2 + \frac{4m}{3} - 4\lambda \right) \bar{x} + (3cc' + m') \bar{y}_2 + (c^3 - c'' + cp^2 + 2cm) \bar{y}_3 + (2c'p + cp') \bar{y}_4 = 0.$$

Отсюда система уравнений

$$\begin{aligned} c^2 + \frac{4m}{3} - 4\lambda &= 0, \\ 3cc' + m' &= 0, \\ c^3 - c'' + cp^2 + 2cm &= 0, \\ 2c'p + cp' &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Пусть A, B, D - константы, тогда $2m = A - 3c^2$, $c^2 p = B$. Если положить

$$u = \frac{2}{3}m, \quad g_2 = \frac{4}{3}A^2 + 4D, \quad g_3 = 4B^2 - \frac{8}{27}A^3 - \frac{4}{3}AD,$$

то получим:

$$u'^2 = 4u^3 - g_2u - g_3. \quad (9)$$

Таким образом, u является эллиптической функцией Вейерштрасса:

$$u = \wp(s + E, g_2, g_3),$$

где E - постоянная интегрирования уравнения (9). Поэтому решение системы (8) имеет вид

$$m = \frac{3}{2}\wp(s + E, g_2, g_3), \quad c^2 = \frac{A}{3} - \wp(s + E, g_2, g_3), \quad p = \frac{B}{\frac{A}{3} - \wp(s + E, g_2, g_3)}. \quad (10)$$

Если же записать уравнение Эйлера-Лагранжа (7) с помощью x и его производных, то получим

$$\bar{x}^{-(6)} - 4m\bar{x}^{-(4)} - 8m'\bar{x}'' + (4m^2 + 1 - 9m'')\bar{x}' - 32mm'\bar{x}' - (6mm'' + 7m'^2 + c^2 + 2m)\bar{x} = 0. \quad (11)$$

Это и есть дифференциальное уравнение времениподобных кривых, где функции m и c удовлетворяют условиям (10).

Интересен частный случай, когда траектория плоская. Это будет при $c = 0$. Тогда $m = \text{const}$, а p остается произвольной функцией от s . Уравнение (11) примет вид

$$\bar{x}^{-(6)} - 4m\bar{x}^{-(4)} + (4m^2 + 1)\bar{x}'' - 2m\bar{x} = 0.$$

Оно интегрируется в конечном виде, так как левая часть характеристического уравнения $v^6 - 4mv^4 + (4m^2 + 1)v^2 - 2m = 0$ раскладывается на множители: $(v^2 - 2m)(v^4 - 2mv^2 + 1) = 0$.

Отметим также очевидное следствие системы (8).

Утверждение 1

Времениподобные кривые с **постоянными** инвариантами m , c и p являются экстремальными тогда и только тогда, когда выполняется равенство

$$c(c^2 + p^2 + 2m) = 0.$$

Изотропная кривая

В этом разделе мы рассмотрим перемещение подвижного репера $\{x, y_i, X\}$ вдоль изотропных кривых, т.е. таких кривых, что $(dx, dx) = 0$. С помощью формул перемещения канонического репера мы найдем дифференциальное уравнение экстремальных кривых, т.е. кривых, являющихся экстремальными функционала $I = \int_{s_0}^{s_1} ds$, где ds - элемент длины дуги изотропной кривой.

Чтобы упростить вычисления, изменим условия ортогональности (1), положив

$$(\eta_{ij}) = (\eta^{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Канонический репер изотропной кривой

Реперы первого порядка определяются равенствами $\omega^2 = \omega^3 = \omega^4 = 0$, а ω^1 - параметрическая форма. Внешним дифференцированием, применяя равенства (3), находим, что реперы седьмого порядка будут определяться условиями:

$$\begin{aligned} \omega^2 = \omega^3 = \omega^4 = \omega_1^4 = \omega_2^4 = \omega_3^4 = \omega_3 = \omega_1 = \omega_0^1 = 0, \\ \omega_1^3 = \omega_4 = \omega^1 = ds, \quad \omega_2 = g\omega^1, \quad \omega_1 = f\omega^1, \quad \omega_2^3 = -\frac{3}{2}f\omega^1, \end{aligned}$$

где $f(s), g(s)$ - инварианты. В соответствии с (2), уравнения инфинитезимальных перемещений канонического репера $\{x, y_i, X\}$ примут вид:

$$\begin{cases} \overline{x}' = \overline{y}_1, \\ \overline{y}_1' = f\overline{x} + \overline{y}_3, \\ \overline{y}_3' = \frac{3}{2}f\overline{y}_1 - \overline{y}_2, \\ \overline{y}_2' = -\frac{3}{2}f\overline{y}_3 + g\overline{x} - \overline{X}, \\ \overline{X}' = -g\overline{y}_1 - f\overline{y}_2 - \overline{y}_4, \\ \overline{y}_4' = \overline{x}. \end{cases}$$

Здесь снова штрихом обозначена производная по инвариантному параметру s .

Согласно рассуждениям, приведенным в [3, с. 43], чтобы лагранжиан L был инвариантен относительно умножения x на произвольную функцию $c(t)$, а функционал $I = \int_{t_0}^{t_1} L(t)dt$ был инвариантен относительно замены параметра, лагранжиан должен иметь вид

$$L(t) = \frac{\Delta_5(t)^{\frac{1}{6}}}{\Delta_4(t)^{\frac{1}{5}}}, \text{ где } \Delta_5 \text{ и } \Delta_4 - \text{ определители 6-го и 5-го порядков, составленные по аналогии с}$$

(6).

Так как в случае изотропной кривой имеются уже не одно, а два условия связи: $(x, x) = 0$ и $(x', x') = 0$, уравнение Эйлера-Лагранжа нужно составлять для лагранжиана

$$L^*(t) = L(t) + \lambda(x, x) + \mu(x', x') = \frac{\Delta_5(t)^{\frac{1}{6}}}{\Delta_4(t)^{\frac{1}{5}}} + \lambda(x, x) + \mu(x', x'),$$

где $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ - произвольные функции.

Уравнение Эйлера-Лагранжа

Экстремальные кривые должны удовлетворять уравнению Эйлера-Лагранжа, которое в случае изотропной кривой запишется в виде

$$\frac{d^5}{ds^5} L_{x^{(5)}}^* - \frac{d^4}{ds^4} L_{x^{(4)}}^* + \frac{d^3}{ds^3} L_{x^{(3)}}^* - \frac{d^2}{ds^2} L_{x^{(2)}}^* + \frac{d}{ds} L_{x'}^* - L_x^* = 0. \tag{12}$$

Вычислив с помощью (4) величины $\frac{d^k}{ds^k} L_{x^{(k)}}^*$ и используя (5), получим

$$(-18f'' + 6f^2 + 8g - 30\mu f + 30\lambda)\overline{x} + (3f' + 4\mu')\overline{y}_0 - (10f + 30\mu)\overline{y}_2 + (-5f''' + 20ff' + 5g')\overline{y}_3 = 0.$$

Приравнявая к нулю коэффициенты при \overline{y}_0 и \overline{y}_2 находим, что $f' = 0$. Из равенства нулю коэффициента при \overline{y}_3 придем к $g' = 0$. Итак, получен основной результат:

Утверждение 2

На экстремальной изотропной кривой инварианты f и g постоянны.

Если же теперь записать уравнение Эйлера-Лагранжа (12) с помощью x и его производных, то получим уравнение экстремальных изотропных кривых:

$$(2f^2 + g)\overline{x}^{(6)} - 5f\overline{x}^{(4)} + 2(2f^2 + g)\overline{x}' + \overline{x} = 0.$$

Справедлив также и результат, обратный Утверждению 2:

Утверждение 3

Если у изотропной кривой инварианты f и g постоянны, то она является экстремалью.

Библиографический список

1. **Кривоносов, Л. Н.** Развитие конформной теории поля // Деп. в ВИНТИ № 1005-В92. 1992. – 59 с.
2. **Карган, Э.** Пространства аффинной, проективной и конформной связности / Э. Карган. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1962. – 210 с.
3. **Лукьянов, В. А.** Одномерные лагранжианы, порожденные квадратичной формой // Изв. вузов. Матем. 2009. № 5. С. 33–44.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

L. N. Krivonosov, V. A. Lukianov

EXTREME CURVES ON 4-DIMENSIONAL CONFORMALLY CONNECTED SPACE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The movement of electron in atom is free, otherwise it would radiate. Free movement, i.e. movement by inertia, without influence of forces, is geometrically treated as movement along the extreme curve of an arch length functional. In Minkowski geometry such extreme curves are straight lines only, that obviously doesn't match with a trajectory of electron in atom. The nearest generalization of Minkowski geometry is the geometry of a 4-dimensional conformally connected space. Locally these two geometries have identical structures, but distinction in their global structures leads to existence of rather difficult extreme curves in conformally connected space, which can be used for free movement modeling of boson elementary particles.

In the article extreme curves of two kinds are studied: time-like and null. Time-like curves are characterized with three functions of arch length: m , c , and p , which for extreme curves are expressed with the help of elliptic Weierstrass function. Null curves are characterized with two functions of arch length: f and g , which for extreme curves appear to be constant. Such null curves could model the movement of graviton, but the absence of experimental data about its properties does not allow us to tell anything about the correlation of this model with reality. Unlike graviton, experimental data about photon are very rich. But authors did not manage to cope with calculating difficulties when researching a flat extreme null curve, which could model photon movement, since photon is a flat wave. Though the authors know the lagrangian for the flat null curve, it is not included in the article.

Extreme curves in 4-dimensional conformally connected space were studied in work [1], but some computing mistakes were committed in it. In this article all mistakes are eliminated and some formulations are specified.

Key words: conformally connected manifold, Weierstrass elliptic function, Euler-Lagrange equation, extreme curves, null extreme curve, time-like extreme curve.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Тел. 8 312 4367372
E-mail: rio@nntu.nnov.ru**

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 4 (97)

Редакторы: **О.В. Пугина, Н.Н. Максимова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 17.12.2012. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 47,25. Уч.-изд. л. 42. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»